

1 บทนำ

1.1 อีนาเมล

ความหมายของอีนาเมล

อีนาเมล คือผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดหนึ่งหรือที่เรียกว่าโลหะเคลือบ ซึ่งส่วนเคลือบเป็นเคลือบทางเซรามิก ส่วนโลหะถือว่าเป็นตัวรูป (body) ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น เมื่อเผาหรืออบด้วยความร้อนไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาสั้นประมาณ 5-10 นาที จนกระทั่งเคลือบและผิวโลหะจับกันแน่น ทำให้ผลิตภัณฑ์โลหะเคลือบที่ได้มีความทนทานดี เคลือบชนิดนี้มีส่วนผสมตะกั่วและตัวช่วยหลอมที่ปราศจากตะกั่ว ซึ่งเป็นส่วนประกอบช่วยลดอุณหภูมิการหลอม การหลอมนิยมใช้ตะกั่วในปริมาณมากเพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีผิวเรียบและมัน รวมถึงทำให้เคลือบมีความต้านทานต่อการกะเทาะ เพราะเกิดการเกาะยึดติดกันระหว่างเคลือบกับโลหะได้ดี จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวาง¹⁻²

ประโยชน์ของอีนาเมล

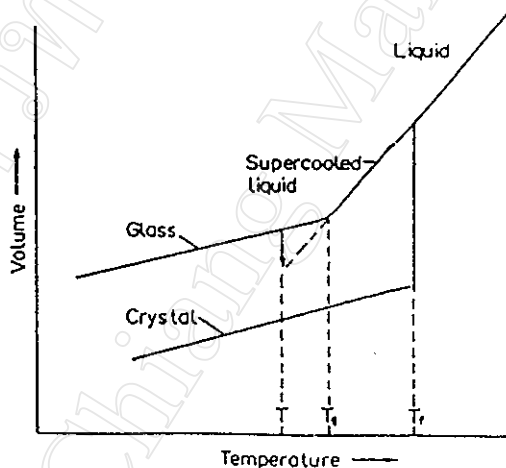
อีนาเมล คือ เคลือบที่ห่อหุ้มเนื้อของโลหะ ซึ่งให้ประโยชน์ทั้งด้านความสวยงามและความทนทานต่อการใช้งาน มีการใช้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรมและในครัวเรือน ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์ของอีนาเมล ได้แก่ เครื่องครัว เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องมือทางการเกษตร อุปกรณ์เคมี เครื่องประดับ ชิ้นงานทางสถาปัตยกรรม เป็นต้น

1.2 สมบัติของอีนาเมล (Properties of enamel)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงสมบัติของอีนาเมล ในประเด็นของโครงสร้าง การขยายตัวเนื่องจากความร้อน จุดอ่อนตัว ความหนืด และแรงดึงผิว ตามลำดับดังนี้

1.2.1 โครงสร้างของอีนาเมล (Structure of enamel)³

แก้วหรือเคลือบอีนาเมล ถือว่าเป็นอนินทรีย์วัสดุชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อหลอมแล้วและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นของแข็งที่ปราศจากการตกผลึก ดังรูป 1.1 แสดงความแตกต่างของแก้ว (glass) กับของแข็งที่เป็นผลึก (crystal) คำอธิบายในเรื่องนี้ กล่าวได้ว่าแก้วที่เกิดขึ้นปราศจากการตกผลึกนั้น เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ณ อุณหภูมิหนึ่งที่ทำให้แก้วกลายเป็นของแข็งทำให้อะตอมในโครงสร้างจัดเรียงตัวในระยะเวลาสั้นๆ ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างอะตอมที่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างแก้วนั้นมีปริมาตรสูงกว่าโครงสร้างที่เป็นผลึก เพราะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่วนการเกิดผลึกเกิดเนื่องจากการที่แก้วเย็นตัวอย่างช้า จึงเปิดโอกาสให้อะตอมเคลื่อนตัวเข้ามาหากันได้อย่างใกล้ชิด ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง เป็นเหตุให้ปริมาตรของโครงสร้างเล็กลง ประโยชน์ในเรื่องโครงสร้างของอีนาเมลนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าเคลือบเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะได้เคลือบใสและมันวาว ความทนทานไม่ค่อยดี แต่ถ้าเคลือบเย็นตัวอย่างช้าๆ จะได้เคลือบไม่ค่อยใสมากนัก แต่มีความทนทานดีเนื่องจากโครงสร้างของเคลือบเกาะตัวกันอย่างหนาแน่น

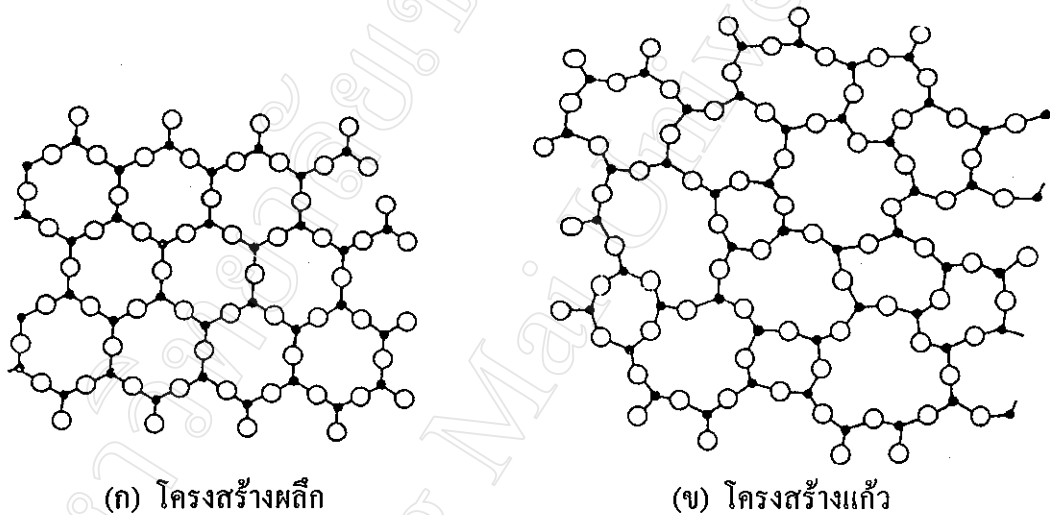


รูป 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิที่ต่างกันของแก้วกับของแข็งที่เป็นผลึก³

Zachariasen (1936) ได้เสนอโครงสร้างแก้วหรืออีนาเมลว่าเป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมไม่แน่นอน (random) ทั้งนี้การจัดเรียงตัวระหว่างอะตอมของธาตุและออกซิเจน ซึ่งถือว่าออกซิเจนเป็นไอออนที่อยู่ระหว่างกลางที่ทำให้เกิดโครงสร้างของแก้ว ตำแหน่งที่โครงสร้างแก้วจะแตกคือตำแหน่งของออกซิเจนที่อาจมีไอออนชนิดอื่นเข้ามาเชื่อมโยง แต่อย่างไรก็ตามระหว่างไอออนของธาตุย่อมจะมีออกซิเจนอยู่ระหว่างกลางเสมอ การจัดเรียงของโครงสร้างแบบ

ร่างแห นั้นเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ การจัดกลุ่มเป็นวงของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปแบบของเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction pattern) ของแก้วชนิดนั้น

จากการศึกษาโครงสร้างของแก้วประกอบด้วยสองรูปแบบ คือ โครงสร้างที่เป็นผลึก ดังรูป 1.2 (ก) และโครงสร้างที่เป็นแก้วในรูป 1.2 (ข) ซึ่งเกิดขึ้นกับกรณีที่แก้วชนิดนี้มี แคลโซออนอย่างเดียวนั้น จะเห็นความแตกต่างได้ชัด เมื่อแก้วมีผลึกเกิดขึ้น โครงสร้างของอะตอมจะ เกาะตัวได้แน่น มีระยะห่างใกล้ชิดกว่าและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่วนโครงสร้างแก้ว นั้น ระยะอะตอมจะวางห่างกัน และไม่เป็ระเบียบ ด้วยเหตุนี้แก้วที่มีผลึกจะทนทานต่อแรงกดดันต่อความร้อน และทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าเนื้อแก้วที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ



รูป 1.2 โครงสร้างผลึกและโครงสร้างแก้ว³

1.2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion)³

เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อแรงกดได้ดีแต่ทนแรงดึงได้น้อย ซึ่งมีผลต่อการขยายตัวเนื่องจากความร้อนจึงทำให้แก้วเกิดการขยายตัวและอยู่ในสภาพที่มีแรงดึง ดังนั้นเมื่อแก้วได้รับความร้อนเกิดการขยายตัวและการหดตัวที่ไม่สมดุลกันย่อมทำให้โครงสร้างหรือเนื้อแก้วแตกได้ นอกจากนี้ ความแตกต่างของการขยายตัวของแก้วและโลหะเมื่อได้รับความร้อน ก็มีผลต่อการแตกของแก้วและหลุดออกจากโลหะได้ด้วย ในทางปฏิบัตินี้แก้วควรจะมีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกับโลหะหรือต่ำกว่า ทำนองเดียวกันเมื่อแก้วและโลหะเย็นตัวลงจนมีสภาพเป็นของแข็งอัตราการหดตัวของแก้วก็ควรอยู่ใกล้เคียงกันหรือน้อยกว่าของโลหะอีกเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จะทำให้แก้วเกาะติดโลหะได้ดี ทั้งนี้เพราะการเกาะติดโลหะจะอยู่ในสภาพที่มีแรงกด

(compression) กับแก้วอยู่เสมอ แต่อย่างไรก็ตามในการเย็นตัวลงจะพบว่าแก้วหดตัวได้เร็วกว่าโลหะ เพราะแก้วมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficient) สูงกว่า และมีแรงตึงผิว ในระหว่างการเกาะติดอีกด้วย ถ้าความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วสูงกว่าโลหะมาก ผลการขยายตัวและหดตัวจะทำให้แก้วร้าวตัว ในทางกลับกันถ้าแก้วขยายตัวและหดตัวต่ำกว่าโลหะจะก่อให้เกิดแรงกดจากโลหะมาก มีผลทำให้แก้วแตกหลุดออกจากโลหะได้ง่ายหรืออาจมีผลทำให้โลหะหลุดด้วย ด้วยเหตุนี้ความเหมาะสมของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วและโลหะจึงเป็นปัจจัยสำคัญ อีกส่วนหนึ่งที่ผู้ปฏิบัติการจะต้องทำการวัดให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับองค์ประกอบของแก้ว มีผลกับโลหะโดยการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า dilatometer สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วอยู่ในระหว่าง $5-8.5 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-500 $^{\circ}\text{C}$ และโลหะทองแดงมีค่า $540 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-500 $^{\circ}\text{C}$

1.2.3 จุดอ่อนตัว (Soften point)³

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ดินอีนามลเข้าเตาเผาเพื่อทำการทดลองส่วนผสมของเคลือบให้เป็นแก้ว จากนั้นลดอุณหภูมิเพื่อทำให้แก้วเกิดการหดตัวลงเนื่องจากเกิดความเครียด (stress) ในเนื้อแก้วขึ้น ทั้งนี้ความเครียดเกิดในขณะเมื่อแก้วเหลวกำลังเปลี่ยนสภาพเข้าสู่การเป็นแก้วแข็ง และจะเริ่มมีสภาพเป็นแก้วหลังจากจุดอ่อนตัว ซึ่งเป็นจุดที่แก้วจะเกาะกับผิวโลหะได้ดี จุดอ่อนตัวของแก้วขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ โดยทั่วไปแล้วจะมีฟริต(frit)ในส่วนผสมด้วย ซึ่งฟริตมีอัลคาไลด์สูง ทำให้แก้วมีจุดหลอมตัวต่ำ และมักจะมีสมบัติการขยายตัวสูง อุณหภูมิจุดอ่อนตัวของแก้วนี้ จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของฟริต ถ้ามีปริมาณมากอุณหภูมิจุดอ่อนตัวจะต่ำ และถ้ามีปริมาณฟริตน้อย จุดอ่อนตัวของแก้วจะมีค่าสูงด้วยเช่นกัน อาจกล่าวได้ว่าฟริตหรือตัวช่วยหลอมในส่วนผสมจะก่อให้เกิดแรงกด (compression) สูง เมื่อเย็นตัวลงทำให้การเกาะติดที่ผิวระหว่างแก้วกับโลหะเกิดขึ้นได้ดี อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเกาะติดที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดอ่อนตัวของแก้ว ผู้ปฏิบัติการผลิตดินอีนามลจำเป็นต้องทราบและวัดจุดอ่อนตัวของแก้วด้วย

1.2.4 ความหนืด และแรงตึงผิว (Viscosity and surface tension)³

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด แรงตึงผิว และองค์ประกอบของเนื้อเคลือบมีความซับซ้อนมาก ความปรารถนาที่จะได้เนื้อแก้ว เมื่อหลอมตัวแล้วมีความหนืดต่ำที่อุณหภูมิทำการหลอม และควรพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรเคลือบดินอีนามลด้วย เพื่อให้ได้จุดหลอมตัว

ค่าตามที่ต้องการรวมถึงต้องการแรงดึงผิวต่ำที่อุณหภูมิ ณ ที่เผา สำหรับแรงดึงผิวต่ำที่อุณหภูมิก็เป็นความต้องการอีก เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ (exchange condition) ที่ผิวโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวของโลหะกับเคลือบจะเกิดขึ้นได้ดี ในกรณีที่มีทั้งความหนืดแรงดึงผิว และส่วนผสมของเคลือบนั้น ทั้ง 3 ส่วนจะต้องเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน เพื่อให้ได้คุณสมบัติการเป็นเคลือบอีนามัลที่ดี

เมื่อกล่าวถึงความหนืดของเคลือบหลอมในสภาพของแก้ว ณ อุณหภูมิจุดหลอมตัว ถ้าได้เนื้อแก้วหลอมมีความหนืดต่ำจะทำให้เคลือบไหลตัวบนผิวโลหะได้ดี และจะสามารถครอบคลุมผิวโลหะได้โดยตลอด ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของการยึดเกาะระหว่างเคลือบหลอมกับผิวโลหะ หากเคลือบหลอมมากเกินไปอาจไหลตัวล้นโลหะได้ แต่ถ้าเคลือบมีความหนืดสูงเกินไปการไหลตัวย่อมไม่ดีและทำให้เนื้อแก้วไม่สุกตัวอีกด้วย ในส่วนของแรงดึงผิวของเคลือบหลอม ถ้าแรงดึงผิวมีค่าต่ำย่อมทำให้เคลือบหลอมสามารถเคลื่อนตัวในระนาบกับผิวโลหะได้ดีทำให้สามารถเปียกบนผิวโลหะที่ใช้ ดังนั้นแรงดึงผิวจึงมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนืดของเคลือบหลอม แรงดึงผิวที่มีค่าต่ำยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเคลือบ โดยที่เคลือบชนิดนั้นจะต้องหลอมตัวได้ดี ณ ที่อุณหภูมิกำหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเคลือบอีนามัลมีจุดหลอมตัวต่ำ ส่วนผสมของเคลือบจะมีปริมาณตัวช่วยหลอมค่อนข้างสูง จึงเป็นเหตุผลให้การพิจารณาน้ำเอาฟริตซึ่งเป็นวัตถุหลอมตัวต่ำเข้ามาผสมในสูตรเคลือบค่อนข้างมาก อาจมีปริมาณอยู่ในระหว่าง 85-95% ขึ้นอยู่กับจุดหลอมตัวของเคลือบอีนามัลที่ต้องการ

1.3 ทฤษฎีการเกาะติดระหว่างโลหะกับเคลือบอีนามัล

ได้มีการศึกษาถึงการเกาะติด (adherence) ระหว่างโลหะกับเคลือบอีนามัลตรงรอยต่อสัมผัสของวัตถุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด โดยเคลือบอีนามัลที่มีสภาพเป็นแก้วซึ่งจัดเป็นวัตถุอินทรีย์ เปรียบเทียบกับอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นโลหะ (metal) ความแตกต่างของวัตถุนี้ ทำให้อยากทราบว่า การเกาะติดเกิดขึ้นได้อย่างไร และสามารถอธิบายได้ ตั้งแต่ปี 1950 มีผู้สนใจศึกษาในเรื่องนี้กันมาก และได้ประเมินถึงการเกาะติดระหว่างเคลือบอีนามัลกับโลหะ พบว่ามีปัญหาการเกาะติดที่ไม่สมบูรณ์ในผลิตภัณฑ์อีนามัลขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ กัน เป็นต้นว่า เกิดผิวเปลือกลอก (peeling) เกิดแตกเป็นลายงา (crazing) เกิดการเดือดอยู่ภายใต้ผิว (reboiling หรือ bubble) การหลุดลอกออกเป็นชิ้น ๆ หรือสะเก็ด (cracking) เป็นต้น ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือว่าการเกาะติดเกิดขึ้นได้ไม่ดี ในทางปฏิบัติต้องการให้การเกาะติดนั้นมีความสมบูรณ์จนถึงขั้นเป็นการเกาะติดอย่างสมบูรณ์ (excellent

adherence) ซึ่งเป็นสิ่งต้องแสวงหาและศึกษาถึงทฤษฎีของการเกาะติด ธรรมชาติของการเกาะติดด้วยพันธะระหว่างโลหะกับเคลือบอีนาเมล เมื่อเกิดสภาพที่เป็นการเกาะติดอย่างสมบูรณ์ดังกล่าวจากการวิเคราะห์ของผู้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกาะติดของผลิตภัณฑ์อีนาเมล พบว่ามี 2 ทฤษฎีที่เป็นหลักของคำอธิบายถึงการเกาะติด¹ โดยทฤษฎีหนึ่งจะเกี่ยวข้องกับเกาะติดด้วยพันธะเคมี (chemical bonds) และอีกทฤษฎีหนึ่งจะอธิบายถึงการเกาะติดด้วยเหตุผลทางกล (mechanical action) ซึ่งเกิดจากผิวเคลือบกับพื้นผิวหยาบของโลหะ สำหรับคำอธิบายของทฤษฎีทางเคมีมีความเห็นว่าการเกาะติดด้วยการปรากฏของชั้นออกไซด์ (oxide film) ตามเดิมของธาตุที่เป็นชั้นถ่ายเทหรือเชื่อมโยงระหว่างแผ่นโลหะกับเนื้อแก้วที่หมายถึงการมีออกไซด์ของธาตุในเคลือบเชื่อมโยงกับออกไซด์ของโลหะที่ผิวระหว่างโลหะกับเคลือบที่มีการเกาะติดกันอย่างมั่นคง การจะพิจารณาว่าความหนาและความหนาแน่นของเคลือบที่ตรงผิวนั้น สมควรจะมีมากหรือไม่ นั้นย่อมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเคลือบ ความหนืด ณ ที่จุดหลอมตัว และแรงดึงผิวระหว่างเคลือบกับโลหะจะมีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับการเกาะติด

สำหรับในหลักการทางกลเกี่ยวกับทฤษฎีการเกาะติดมีความเข้าใจถึงผิวโลหะควรจะเป็นผิวหยาบ ยิ่งผิวหยาบมากเท่าใด จะเอื้ออำนวยการเกาะติดได้ดีขึ้น ภายใต้ทฤษฎีอธิบายถึงกลไกได้มีทฤษฎีประกอบในเรื่องนี้เรียกว่าทฤษฎีเดนไดรต์ (dendrite theory) ที่อธิบายถึงการตกตะกอนของเฟสโลหะ (metallic phase) ซึ่งเดิมมีการลอยตัวอยู่ในเนื้อแก้วตรงระหว่างผิวสัมผัส และเมื่อเย็นตัวลง เกิดการตกตะกอนทำให้เฟสของโลหะที่แขวนลอยในเนื้อแก้วตรงบริเวณสัมผัส สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเกาะติด² นอกจากนี้ยังมีอีกทฤษฎีหนึ่งคือ ทฤษฎีทางไฟฟ้าเรียกว่าทฤษฎีอิเล็กโทรไลติก (electrolytic theory)⁶ ได้เสนอถึงการแลกเปลี่ยนประจุในทางไฟฟ้าบนผิวหยาบของโลหะก่อให้เกิดโครงสร้างที่ยึดติดกันระหว่างแก้วกับโลหะ และทฤษฎีนี้ได้มีการพิสูจน์ถึงความเป็นไปได้เมื่อแก้วหลอมจะเปียก (wetting) บนผิวโลหะ และการเกิดสภาพเปียกนี้เองจะมีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ที่ชั้นระหว่างผิวทั้ง 2 ของโลหะ และน้ำเคลือบหลอม อย่างไรก็ตามทั้งทฤษฎีทางเคมีและทฤษฎีทางกลก็ยังเกี่ยวข้องซึ่งกันและกันไม่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน

ธรรมชาติของการเกาะติด

เมื่อวิเคราะห์ถึงธรรมชาติของการเกาะติดระหว่างวัตถุที่เป็นของแข็ง จะเห็นได้ว่ามีลักษณะของพันธะ 3 ลักษณะ ดังนี้

- (1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' forces)
- (2) พันธะเคมี (chemical bond)
- (3) พันธะทางกล (mechanical bond)

อาจกล่าวได้ว่า พันธะเคมีแรกที่เป็นแรงวัลเตอร์วาลส์นั้น จะมีแรงของพันธะน้อยที่สุด ด้วยแรงยึดเกาะที่กล่าวมาเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เมื่ออะตอมเหล่านั้นเข้ามาใกล้โดยปราศจากการเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ได้มีผู้ศึกษาในเรื่องนี้พบว่า พลังงานของพันธะจะอยู่ระหว่าง 0.5-4 kcal/mol ของแรงวัลเตอร์วาลส์ เมื่อเปรียบเทียบกับพันธะในทางเคมีแล้วกล่าวได้ว่ามีแรงสูงกว่าแรงวัลเตอร์วาลส์ถึง 100 เท่า สำหรับพันธะทางเคมียังจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ พันธะไฟฟ้าสถิต (electrostatic) หรืออาจเรียกว่าพันธะไอออนิก (ionic bonding) พันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะของโลหะ (metallic bond) ในทางปฏิบัติแล้วถือว่า สารประกอบหรือธาตุต่าง ๆ ที่เกาะติดกันได้นั้นเนื่องจากพันธะเคมี โดยมีผู้คำนวณแรงของพันธะได้ถึง $1,000,000 \text{ lb/in}^2$ ดังนั้นหากพิจารณาถึงการยึดเกาะระหว่างเคลือบกับโลหะของผลิตภัณฑ์ อีนาเมล แรงยึดระหว่างผิวจะมีแรงที่แข็งแกร่งมาก

การเกาะติดในสภาพที่เกิดขึ้นจริง

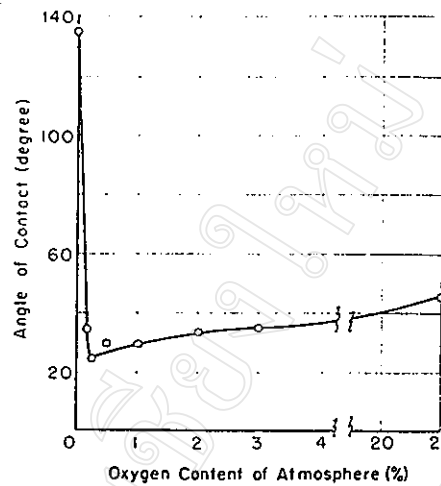
หากพิจารณาการเกาะติดที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างผิวเคลือบกับโลหะของผลิตภัณฑ์ อีนาเมล สิ่งแรกที่เห็นได้ชัดคือสภาพการเปียก (wetting) ยิ่งการเปียกของเคลือบบนผิวโลหะได้ดีเพียงใดยิ่งทำให้การเกาะติดดีขึ้น อีกสิ่งหนึ่งจะเกี่ยวกับสภาพผิวระหว่างผิวของเคลือบกับโลหะนั้น คือความสามารถในการเกาะยึดระหว่างแก้วที่เป็นสารอนินทรีย์กับโลหะ นอกจากนี้หากพิจารณาถึง สมมติฐานของการเกาะติด อธิบายได้ดังนี้

(1) การเปียก

คำอธิบายที่จะบอกว่าเคลือบอีนาเมลเปียกโลหะอย่างไร ถ้าผู้ปฏิบัติงานได้ติดตามถึง กระบวนการหลอมเคลือบบนโลหะที่เริ่มต้นด้วยการทาหรือฉาบส่วนผสมของเคลือบดิบลงบนแผ่นโลหะ และจากนั้นนำไปเผาในเตาและภายใต้บรรยากาศปกติ ในขณะที่เผาโลหะจะเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 316°C (600°F) มีผลทำให้ผิวของโลหะเกิดสะเก็ด (scale) เป็นผิวคั้น เมื่อส่วนผสมเคลือบหลอมตัวเข้ายึดเกาะกับผิวโลหะจะทำให้เกิดออกซิเดชันของผิวโลหะหยุดลง เนื่องจากถูกปกคลุมด้วยเคลือบที่หลอม ในช่วงนี้การเกิดการเปียกบนผิวโลหะจากเคลือบหลอมจะปกคลุมผิวโลหะออกไซด์ก่อให้เกิดการยึดติดได้ทั่วถึง จากการเกิดขึ้นสะเก็ดที่ผิวโลหะเป็นส่วนช่วยให้ผิวโลหะมีความหยาบเกิดขึ้นแล้วยังทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่เป็นแรงทางกลและเกิดแรงทางเคมีได้อีกด้วย

การเกิดออกไซด์ของชั้นผิวโลหะมาจากออกซิเจนในอากาศที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจน ขณะที่เผาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นออกไซด์ที่ปรากฏบนผิวโลหะจะทำให้เกิดการ

เกาะติดมากขึ้น และส่งผลให้เกิดสภาพการเปื่อยคดียิ่งขึ้น ดังทดลองในกราฟเป็นผลการทดลอง⁷ แสดงในรูป 1.3



รูป 1.3 ผลของออกซิเจนที่มีในบรรยากาศกับมุมที่สัมผัสระหว่างเหล็กกับแก้วซึ่งเผาที่ $1,300^{\circ}\text{C}$ ⁴

เมื่อพิจารณาต่อไปถึงเคลือบขณะหลอมย่อมประกอบไปด้วย การรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ในส่วนผสมเคลือบที่พยายามจะจับและรวมตัวกันเป็นโมเลกุลออกไซด์ของเคลือบที่ผิวบริเวณสัมผัสกับโลหะจะมีโอกาสเชื่อมโยงกับออกไซด์ของแผ่นโลหะ สร้างพันธะเคมีเกิดขึ้น และมีผลให้เกิดการเกาะยึดขณะที่เคลือบยังอยู่ในสภาพเป็นของเหลว ปรากฏการณ์เช่นนี้จะอธิบายถึงสภาพการเปื่อยของเคลือบที่ผิวโลหะ

(2) สภาพที่ผิวระหว่างแก้วกับโลหะ

ตราบใดที่แก้วหรือเคลือบเปื่อยบนโลหะเกิดขึ้นแล้วย่อมจะก่อให้เกิดการพัฒนาของการเกาะติดดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ทำให้เห็นว่าการเกาะติดมีปัจจัยเป็นองค์ประกอบสำคัญ 2 ประการ ได้แก่

ประการแรกปริมาณออกไซด์ของโลหะที่ถูกปกคลุมด้วยสารละลายของเคลือบหลอม สารละลายเหล่านี้นั้นจะต้องสัมผัสโดยตรงกับผิวโลหะ นั่นหมายถึง การสร้างสะพานเชื่อมโยงระหว่างอะตอมของโลหะกับออกซิเจน และต่อเนื่องด้วยอะตอมของธาตุเชื่อมโยงกับออกซิเจนในเคลือบเป็นลูกโซ่ต่อไป

ประการที่สองที่ชั้นของโลหะจะต้องไม่ปรากฏเฟสของโลหะตกตะกอนหลายชั้นบนแผ่นโลหะ เพราะจะทำให้ชั้นต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถหลุดหรือแยกออกจากผิวโลหะได้ขณะเมื่อเคลือบมาฉาบบนผิวโลหะ

ได้มีการศึกษา^๑ สภาพในชั้นผิวของเคลือบกับโลหะประกอบขึ้นโดยเห็นความสำคัญของโลหะที่เป็นเหล็ก มุ่งพิจารณาถึงเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่จะชี้ให้เห็นว่าออกไซด์ของเหล็กชนิดใดจะเป็น FeO หรือ Fe₂O₃ ถึงจะสร้างพันธะการยึดเกาะได้ดีกว่ากัน รวมทั้งผลของผิวโลหะที่หยาบ โดยการศึกษาในเรื่องนี้ให้ผลการทดลองดังนี้คือ

(ก) ผลของปริมาณ FeO ที่ผิวโลหะ : ได้พบว่าถ้าปริมาณการเกิด FeO มีความหนาแน่นมากจะก่อให้เกิดการเกาะติดได้ดี แต่ขณะเดียวกันยังพบการเกาะติดที่ไม่ดีเกิดขึ้นได้ในบางส่วนของชั้นทดสอบจึงทำให้ผู้ศึกษายังไม่กล้ายืนยันในเรื่องนี้

(ข) ผลของความหยาบของผิวโลหะ : ความหยาบอาจเกิดขึ้นได้จากออกไซด์ของโลหะที่ทำให้เกิดสะเก็ด หรืออาจเกิดจากการตกจมลงในลักษณะตะกอนของธาตุบางชนิดเช่น Co หรือ Ni จากส่วนผสมของเคลือบเป็นไปตามทฤษฎีของเคนไดรท์รวมทั้งความหยาบที่เกิดขึ้น หรือความหยาบของโลหะที่มาจากสาเหตุอื่นส่งผลให้การเกาะติดดีขึ้น

นอกจากสภาพการเกาะติดที่กล่าวมาแล้วทั้ง 2 กรณี มีผลเกี่ยวข้องกับการเปื่อยของชั้นผิวโลหะกับเคลือบและสภาพที่ผิวแก้วกับโลหะ พอที่จะนำมากล่าวสรุปเป็นสมมุติฐานได้ดังนี้

สมมุติฐานของการเกาะติด

ความต้องการที่จะสนับสนุนให้เกิดการเกาะติดระหว่างเคลือบกับโลหะของผลิตภัณฑ์อินามัล สมควรที่จะมีปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้

- (1) เคลือบอินามัลจะต้องเปียกบนโลหะได้ดี
- (2) ระหว่างชั้นผิวของเคลือบโลหะควรมีออกไซด์ของโลหะเกิดขึ้นอย่างอึดตัว หรือมีความหนาแน่นสูง
- (3) ออกไซด์ของโลหะเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายที่เป็นแก้วจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์ (reduced) โดยไอออนของธาตุอื่น เพราะจะทำให้การลดลงของออกซิเจนมีผลทำให้พันธะอ่อนลง สมมุติฐานนี้ผู้ศึกษา^๑ ได้กล่าวนำไปในเอกสาร

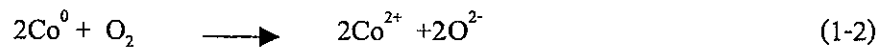
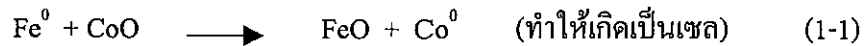
1.3.1 ทฤษฎีทางกล

ในทฤษฎีนี้เน้นความสำคัญที่ผิวของโลหะตรงที่มีความหยาบ (roughness) ผลจากการทดลองพบว่าการเกาะติดกับผิวของโลหะที่หยาบ จะเกิดได้ดีเมื่อมีความหนาแน่น (density) ของจุดเกาะติด (anchor points) (เป็นปัจจัยหลักหรือเป็นพันธะทางกล) และขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเฉพาะ

(specific surface area) ที่ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดพันธะระหว่างพื้นที่ผิวเฉพาะที่มีความหนาแน่นของจุดเกาะติด (anchor point density) เหล่านั้น จะถูกอธิบายเป็นเหตุผลทางกล แต่ขณะเดียวกันพื้นที่ผิวเฉพาะซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่มีประจุที่อาจก่อให้เกิดการเกาะติดหรือยึดเกาะอธิบายเป็นเหตุผลทางเคมีก็ได้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่เกี่ยวข้องกันโดยให้ความสำคัญถึงพื้นที่ผิวเฉพาะหรือความหนาแน่นของจุดเกาะติด ในทฤษฎีทางกลว่าเป็นพื้นฐานธรรมชาติของพันธะทางการเกาะติด

ด้วยเหตุผลการยึดเกาะทางกลจะสามารถแสดงผลนี้ได้ 2 แนวทาง โดยแนวทางหนึ่งอธิบายในทฤษฎีของเดนไดรต์ตามที่กล่าวมาแล้วว่า ในระหว่างชั้นผิวสัมผัสของแก้วและโลหะจะมีเฟสโลหะตกจมลง (precipitation) ในระหว่างชั้นนี้ ซึ่งชั้นโลหะนั้นอาจเป็น เหล็ก ทองแดง โครเมียม และอื่น ๆ ทฤษฎีนี้ถูกเรียกว่าเป็นทฤษฎีเดนไดรต์ ได้มีผู้ศึกษาการตกตะกอนเดนไดรต์ของเหล็ก (dendrite of iron) และเดนไดรต์ของโคบอลต์ (dendrite of cobalt)⁸ สำหรับผลิตภัณฑ์อื่นาเมที่ได้พบการยึดเกาะที่ดีเป็นไปตามทฤษฎีนี้ อีกทฤษฎีหนึ่งที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการเกาะติดด้วยวิธีทางกลนั้นคือทฤษฎีอิเล็กโตรไลติก (electrolytic theory) หรืออาจเรียกว่าทฤษฎีการกัดกร่อน กัลวานิก (galvanic - corrosion theory) ทฤษฎีดังกล่าวจะให้เหตุผลในทางไฟฟ้าที่อธิบายเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อิเล็กโตรไลติก เหตุผลที่เห็นได้ชัดว่า เมื่อมีการแลกเปลี่ยนประจุเกิดขึ้นจะทำให้ประจุของโลหะธาตุหนึ่งเปลี่ยนแปลงเกิดประจุไอออนสูงขึ้น (oxidation) พร้อมกับไอออนโลหะธาตุอีกชนิดหนึ่งมีประจุลดลง (reduction) การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะทำให้เกิดการเข้าไปยึดเกาะฝังตัวหรือบางที่เปรียบเสมือนการทอดสมอ (anchoring) เป็นเหตุให้เกิดการยึดเกาะได้ และขณะนั้นเมื่อโลหะไอออน หลุดออกจากที่หนึ่งไปเกาะยึดกับอีกที่หนึ่งย่อมมีผลให้เกิดการกัดกร่อน (corrosion) ดังกล่าวเป็นทฤษฎีของ galvanic corrosions

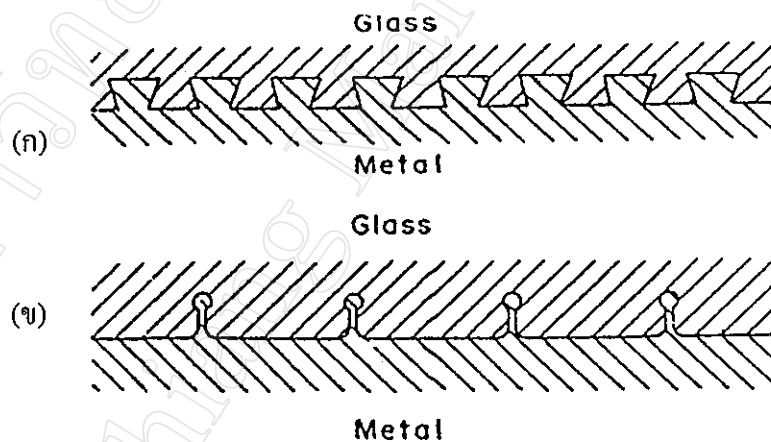
ในสมมุติฐานจากการเสนอของ Dietzel⁹ การตกตะกอนนอกจากใช้โคบอลต์แล้วยังสามารถใช้ निकเกิลเป็นสารตกตะกอนจากแก้วให้สัมผัสกับพื้นผิวของโลหะด้วยชั้นโคบอลต์และ निकเกิล มีความสามารถสร้างให้เกิดเซลล์ตรงตำแหน่งนั้น ๆ และสร้างระบบ electrolytic cell เมื่อแผ่นโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (anode) ส่วนสำหรับโคบอลต์ หรือนิกเกิล จะเป็นขั้วลบ (cathode) กระแสอิเล็กตรอนจะไหลจากเหล็กผ่านแก้วเหลวไปยังโคบอลต์ และหมุนวนกลับมาที่เหล็ก ทำให้เกิดวงจรไฟฟ้ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสภาพของเคลือบเป็นของเหลว การเป็นประจุบวกเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อผิวของโลหะมีความหยาบ เป็นเหตุให้น้ำแก้วเหลวที่มีโคบอลต์และ/หรือนิกเกิลสามารถเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวหยาบ ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นช่องหรือรูที่น้ำแก้วเหลวเข้าไปฝังตัวได้ ด้วยเหตุนี้การแลกเปลี่ยนประจุจะก่อให้เกิดการเกาะติดเป็นอีกทฤษฎีหนึ่ง



จากปฏิกิริยาเหล่านี้ที่เกิดขึ้น ณ ชั้นผิวระหว่างเคลือบหลอมเหลวกับโลหะ ที่เป็นปฏิกิริยากลับไปกลับมาสรางความสมดุลระหว่างเซลและระหว่างอะตอมของธาตุต่างๆในแก้วที่มีบทบาทกับอะตอมของธาตุต่างๆในแก้ว ที่มีบทบาทของอะตอมในโลหะ โคบอลต์จะตกจมลงบนผิวโลหะสร้างให้เกิดเซลอย่างต่อเนื่อง จึงยอมสร้างให้เกิดศักยภาพการสัมผัสระหว่างเหล็กกับโคบอลต์

อนึ่งในปฏิกิริยาที่กล่าวมานี้ อาจมีผลให้การเกาะติดไม่ดีตามที่คาดไว้ ถ้าผิวของโลหะมีสิ่งเจือปนและความหยาบไม่เพียงพอ จะทำให้ทฤษฎีที่กล่าวมามีจุดอ่อนในทางปฏิบัติ¹⁰

เมื่อก้าวถึงพันธะทางกลโดยตรงแล้ว โลหะจะมีความสำคัญสำหรับแก้ว เนื่องจาก การยึดเกาะสามารถปรากฏเป็นสะเก็ดหรือสะเก็ด (scale) เขียนเป็นความคิดเห็นของภาพ ดังในรูป 1.4



รูป 1.4 ผิวโลหะกับแก้วที่สนับสนุนพันธะทางเคมี¹⁰

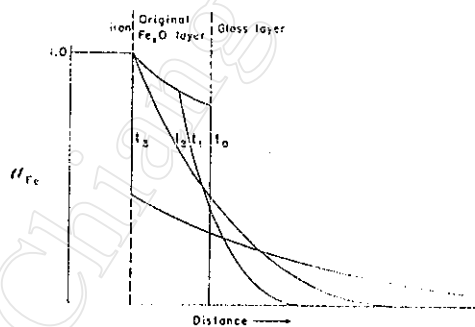
(ก) การเกาะติดแบบฟันปลาในอุดมคติ

(ข) การเกาะติดแบบฟันปลาของโลหะกับแก้วตามความเป็นจริง

ลักษณะของผิวที่หยาบสามารถทำให้แก้วฝังตัวอยู่ในช่องว่างหรือหลอด อันเนื่องมาจากผิวหยาบของโลหะ มีแรงดึงดูดยึดเกาะระหว่างแก้วกับโลหะกับแก้วในลักษณะแรงกล จะสร้างพันธะให้เกิดขึ้น ทั้งนี้พันธะที่เกิดอาจเกี่ยวข้องกับลักษณะของพันธะทางเคมีด้วย

1.3.2 ทฤษฎีทางเคมี

ความรู้ในเรื่องวัสดุอินทรีย์ที่แก้วเชื่อมติดกับโลหะ โดยให้ความสนใจเกี่ยวกับ เหตุผลการเกาะติด ความเข้าใจในเรื่องนี้ ถ้าพิจารณาถึงเหตุผลทางเคมี ทำให้ยากทราบว่าการ พันธะทางเคมี (chemical bond) เกิดขึ้นได้อย่างไร ทั้งนี้เชื่อว่าแรงยึดของพันธะชนิดนี้ จะเป็นตัวเสริมหรือรักษาความมั่นคงให้ผิวแก้วกับโลหะยึดเกาะกันได้ดี เมื่อกล่าวถึงทฤษฎีทางเคมีก็พิจารณาเกี่ยวกับความสมดุลของพลังงานระหว่างพันธะ (bond energy) และแรงผลักระหว่างธาตุที่เป็นโลหะกับธาตุเนื้อแก้วที่ผิวสัมผัส โดยหลักการแล้วพลังงานของพันธะจะมีค่าสูงกว่าจึงสามารถทำให้เกิดการยึดเกาะแก้วกับโลหะที่ผิวสัมผัสได้ พลังงานของพันธะที่ช่วยในการยึดเกาะได้ดี เมื่อออกไซด์ของโลหะมีวาเลนซ์ต่ำ (low-valent oxide) ดังนั้นการศึกษาอินทรีย์พอร์เคลนบนแผ่นโลหะเหล็กที่ผู้ศึกษาพอใจถึงการเกาะติดที่ดี มีผลมาจากผิวระหว่างโลหะกับเคลือบเป็นออกไซด์ของเหล็กในรูปเฟอร์ไรต์ (FeO) ทำให้โครงสร้างของเหล็กออกไซด์สัมผัสแก้วด้วยสารเชื่อมโยงอะตอมของธาตุใดธาตุหนึ่งในเนื้อแก้ว จากผลการศึกษาได้พิจารณาเห็นว่า การเชื่อมโยงองค์ประกอบอะตอมในแก้วเกิดขึ้นได้หลายอะตอมทำให้โครงสร้างซับซ้อน อย่างไรก็ตามส่วนผสมของแก้วที่เป็นแก้วชนิด $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ เชื่อมโยงกับแผ่นโลหะเหล็ก (Fe) และเกิดออกไซด์ของเหล็ก (FeO) ทำให้ส่วนประกอบต่างๆเหล่านั้นนำมาแสดงเป็นปฏิกิริยา ที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้พันธะทางเคมี แสดงเป็นไดอะแกรมในรูป 1.5



รูป 1.5 ไดอะแกรมของเหล็กที่เป็นสมมุติฐานมีผลกับระยะทางการแทรกซึมระหว่างผิวของโลหะและแก้วที่สัมผัสกัน โดยมีเหล็กเฟอร์ไรต์ออกไซด์และแก้วที่เข้ามาสัมผัสกัน¹¹

เมื่อเนื้อแก้ว $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ถูกฉาบให้สัมผัสกับโลหะเหล็กที่มีชั้นผิวเป็น FeO สารละลาย FeO เกิดขึ้นได้ในรูป $\text{Na}_2\text{Fe}_x\text{Si}_2\text{O}_{5+x}$ อยู่ในชั้นระหว่างผิว อัตราของการเกิดสารละลายขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของ FeO ที่สัมผัสกับเนื้อแก้วหลอมเหลว สิ่งที่น่าสนใจของปฏิกิริยาระหว่างผิวนี้นี้คือ

การเกิดสารละลายดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในเรื่องนี้ทำให้ยากทราบถึงความสามารถในปฏิกิริยา (activity) หรือศักยภาพทางเคมีของเหล็กที่รวมในปฏิกิริยา

รูป 1.5 แสดงถึงการทำงานของเหล็กในระหว่างแก้วกับเหล็กออกไซด์ ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งถึงเคลือบหลอมเป็นแก้วถึงขั้นตอนการเกาะติด

ตามเส้น t_0 แสดงถึงสถานะที่แก้วเริ่มต้นสัมผัสกับเหล็กที่ถูกออกซิเดชัน ซึ่งพร้อมกันนั้นเหล็กในโลหะและออกไซด์ที่เกิดกับเหล็ก จะเกิดพร้อมกันด้วยเฟสที่สมดุลกัน

เส้น t_1 ได้แสดงพฤติกรรมของเหล็กในแก้วและออกไซด์ของเหล็กในที่ระหว่างผิวสัมผัสจะมีออกไซด์เป็นปริมาณมากและอึดตัว ดังนั้นทำให้เกิดความสมดุลระหว่างไอออนออกไซด์ในแก้ว

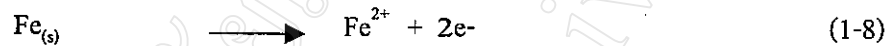
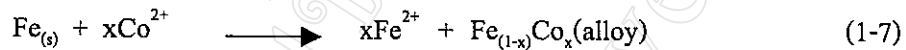
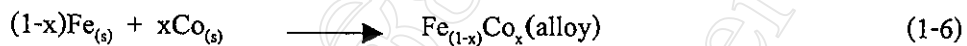
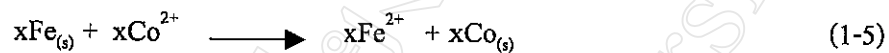
เส้น t_2 แสดงถึงสถานะที่เหล็กออกไซด์ถูกละลาย แต่แก้วตรงผิวสัมผัสยังคงมีโครงสร้างตาข่าย ณ จุดนี้ การเกิดความสมดุลระหว่างไอออนของเหล็กที่เชื่อมโยงกับออกซิเจนและเชื่อมโยงกับไอออนของธาตุในแก้วเป็นไปอย่างสมดุลอีกเช่นกัน

เส้น t_3 แสดงถึงสถานะเมื่อออกไซด์ของเหล็กที่ถูกละลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้ความเข้มข้นของเหล็กในแก้วที่ผิวสัมผัสมีปริมาณลดลง เพราะการกระจายตัวเข้าไปในแก้ว เมื่อเป็นเช่นนั้นสมดุลระหว่างผิวสัมผัสจะหายไป เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ระหว่างเหล็กกับแคลโซออนในแก้ว $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (sodium disilicate glass) เป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้เกิด Fe^{2+} เป็นปริมาณมากจนอึดตัว สภาพที่เกิดขึ้นเช่นนี้จะทำให้เส้น t เข้าถึงจุดวิกฤต และทำให้มีผลการยึดเกาะที่ดีในทางปฏิบัติ ¹¹

เมื่อพิจารณาถึงเหล็กออกไซด์บนชั้นผิวโลหะกับออกไซด์ของธาตุในแก้ว โดยเฉพาะแก้วที่มีองค์ประกอบ $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ นั้น โซเดียมไอออน และซิลิเกตไอออนซึ่งขณะหลอมเหลวจะอยู่ในสภาพเป็นออกไซด์ บรรดาธาตุ Na^+ และ Si^{4+} จะไม่สามารถช่วยรีดิวซ์เหล็กเมื่อถูกเผาให้เหล็กอยู่ให้สภาพเป็น Fe^{2+} ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามขณะเมื่อเผาเหล็กอาจได้รับออกซิเจน ทำให้เป็นเหล็กออกไซด์ในสภาพ Fe^{3+} เป็นเหตุให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นสารผสม complex จะไม่เอื้อให้เกิดการเกาะติดได้ดี ด้วยเหตุนี้เป็นผลให้พิจารณาเลือกตัวเติมมาใช้เพื่อช่วยเสริมให้เกิดการเกาะติดด้วยปฏิกิริยาทางเคมี

นอกจากโคบอลต์ออกไซด์ที่ช่วยในการเกาะติดแล้ว ยังออกไซด์อย่างอื่นอีก เช่น นิกเกิลออกไซด์ ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมเคลือบอีนาเมลพอร์เคลน ใช้เพื่อช่วยให้เกิดเสริมให้เกิดการยึดเกาะ ดังนั้นสารช่วยเสริมนี้จะอยู่ในสภาพที่เป็นเส้น t_2 ซึ่งจะมีผลให้รักษาความสมดุลของปฏิกิริยาในองค์ประกอบที่ชั้นผิวสัมผัส ผลจากการศึกษาในเรื่องนี้ทำให้สามารถเขียนเป็น

สมการเคมีได้ ดังสมการ (1-5) - (1-9) เมื่อแก๊วมีส่วนผสมของโคบอลต์เข้าไปสัมผัสในส่วนที่เป็นโลหะเหล็กจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (1-5) และในระหว่างผิวสัมผัสนั้นจะทำให้เกิดส่วนผสมเป็นโลหะผสม (alloy) สมการ (1-6) ปฏิกิริยาการเกิดอัลลอยด์ทั้งหมดสามารถเขียนได้ในสมการ (1-7) และเมื่อเหล็กถูกเผาอยู่ในบรรยากาศออกซิเดชัน โลหะเหล็กสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ (half-cell reaction) แสดงในสมการ (1-8) เมื่อเหล็กถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กไอออน $2+$ (Fe^{2+}) อิเล็กตรอนของเหล็กจะให้เข้าร่วมปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็น O^{2-} ดังสมการ (1-9)



ผลการศึกษาอินามาเมลพอร์ตเลน เมื่อแก๊วสัมผัสกับโลหะเหล็กขณะเคลือบหลอมเป็นแก๊ว จะเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อนสร้างความสมดุลระหว่างแก๊วกับโลหะดังแสดงไว้ ในสมการปฏิกิริยา (1-5) - (1-9) กล่าวว่าปฏิกิริยาระหว่างเฟสของโลหะและแก๊วจะเกิดขึ้นสมดุล ซึ่งหมายถึงเป็นปฏิกิริยาไป - กลับที่เท่ากัน และนี่คือเหตุผลการเกิดปฏิกิริยาเคมีสร้างพันธะทางเคมีให้เกิดขึ้น แต่ถ้าทราบใดที่ปฏิกิริยาเคมีไม่เกิดสภาพความสมดุลระหว่างผิวสัมผัสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของธาตุภายในเนื้อแก๊ว มีผลให้ไม่สามารถเกิดการเกาะติดได้หรืออาจเป็นเพียงการยึดเกาะบางส่วนเท่านั้น การศึกษาลงความเห็นว่าปฏิกิริยาเคมีที่สมดุลจะเป็นผลให้การเกาะติดระหว่างแก๊วกับโลหะเป็นผลดี ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยปฏิกิริยาจะช่วยทำให้เกิดโลหะผสม (alloy) ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม และจะเกิดการปรับตัวเองที่สร้างความสมดุลทางเคมีภายในเนื้อแก๊วกับโลหะไอออนที่ผิวสัมผัส ปฏิกิริยานี้ยังอาจกล่าวว่ามีกลไกของการให้อิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาการเผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชันจากโลหะ ในที่สุดออกไซด์ที่ทำให้เกิดการเกาะติดซึ่งถือว่าเป็นของผสม complex จะนำไปสู่การเกิดเดนไดรต์ (dendrite) ซึ่งเป็นผลของการตกตะกอนในสารผสมเหล่านั้น จนทำให้เกิดจมลงบนผิวของโลหะฝังตัวแล้วทอดสมอย่างหนาแน่น (anchor point density) นั่นคือ เป็นผลทำให้เกิดผิวหยาบ (roughness) กระจายตัวเป็นเหตุของการยึดเกาะทางกลและยังเป็นตัวช่วยให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างผิวสัมผัสอีกด้วย

กล่าวโดยสรุปได้ว่า

- (1) พันธะระหว่างผิวเคลือบและโลหะของผลิตภัณฑ์อื่นาเมลน่าจะประกอบขึ้นด้วยพันธะทางเคมีเป็นหลัก
- (2) การเกาะติดให้ได้ผลดี จะต้องทำให้ระหว่างผิวสัมผัสของโลหะและเคลือบจะต้องมีออกไซด์ของโลหะอึดตัวหรือความหนาแน่นสูง และออกไซด์นี้เมื่ออยู่ในเคลือบหลอมเหลวจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์เพราะจะทำให้แรงพันธะอ่อนลง
- (3) การเกาะติดที่ผิวระหว่างเคลือบกับโลหะจะมีผลจากพันธะโลหะกับโลหะด้วยกัน เมื่ออะตอมของธาตุโลหะกับไอออนโลหะ ซึ่งเกิดในรูปของโลหะออกไซด์ จะต้องมีความแข็งแรงในการยึดเกาะด้วยเหตุผลทางเคมีและเทอร์โมไดนามิกส์
- (4) ออกไซด์ที่ช่วยสนับสนุนให้เกิดการเกาะติด (adherence promotor) เช่น Co และ Ni จะทำหน้าที่ช่วยหรือรักษาสภาพการยึดเกาะได้ดีอย่างยิ่ง แต่สารตัวช่วยเสริมนี้จะต้องเป็นตัวสร้างพันธะโดยตรงกับตัวมันเอง หมายถึงการสร้างพันธะควรรมาจากไอออนของโลหะและไอออนของธาตุในเคลือบจะก่อให้เกิดพันธะการยึดเกาะที่แข็งแรงกว่า

1.4 การเกิดฟองอากาศในผลิตภัณฑ์อื่นาเมล

ฟองอากาศเป็นปัญหาหนึ่งที่ปรากฏบนผิวของผลิตภัณฑ์อื่นาเมล โดยฟองอากาศนี้สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากในระหว่างการหลอมเคลือบ มักพบเสมอว่า มีฟองอากาศเกิดขึ้นในระหว่างการหลอม เนื่องจากวัตถุดิบบางชนิด สามารถปล่อยก๊าซออกมา เช่น สารประกอบประเภทคาร์บอนेट และสารประกอบซัลไฟด์หรือซัลเฟตรวมถึงวัตถุที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้การเกิดฟองอากาศ อาจมาจากการเผาผลิตภัณฑ์ เมื่อแม้จะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 900 °C จะสามารถปล่อยฟองในระหว่างเผาผลิตภัณฑ์ เป็นฟองมาจากผิวโลหะหรือชั้นระหว่างผิวโลหะกับเคลือบได้อีกด้วย ฟองอากาศหรือก๊าซสามารถเกิดขึ้นได้จากความร้อนที่ใช้ในการหลอมเคลือบและการเผาผลิตภัณฑ์

ได้มีผู้ศึกษา¹² การเกิดฟองอากาศจากผลิตภัณฑ์อื่นาเมลหลายชนิดพบว่า ฟองเหล่านั้นเกิดจากปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้ฟองเกิดขึ้น ปัจจัยประการแรกเกี่ยวกับชนิดของฟrit ซึ่งโดยปกติแล้วฟritเป็นสารช่วยหลอม ฟritบางชนิดมีจุดหลอมตัวต่ำ อาจหลอมได้ที่อุณหภูมิ 650-700 °C เมื่อส่วนผสมของเคลือบอื่นาเมลที่ใช้ฟritมาก (90-95%) เป็นเหตุผลให้ฟritเกิดหลอมก่อน 900 °C (อุณหภูมิเผาผลิตภัณฑ์อื่นาเมลตามปกติ) เคลือบจะเดือดเป็นสาเหตุทำให้เกิดฟองอากาศเป็นอย่างดี

ประการที่สอง ความละเอียดเนื่องจากการบดเคลือบ เมื่อเคลือบมีความละเอียดมากย่อมสามารถจุดหลอมตัวได้ดี ถ้าหากการกระจายอนุภาคนาโนเล็กมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เคลือบสุกตัวเร็วและเค็ดยึดง่าย ยิ่งอนุภาคนาโนเล็กมีมากการเค็ดยึดก็เกิดได้เร็ว ฟองอากาศที่เกิดขึ้นยิ่งมากขึ้น ซึ่งลักษณะฟองอากาศมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ประการที่สาม สภาพการเผา เมื่ออุณหภูมิประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนอาจเป็นอุณหภูมิสูงเกินไปสำหรับเคลือบบางชนิด ซึ่งมีเคลือบที่เผาสุกตัวได้ดีและพอมะนาวกับอุณหภูมิที่ $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ หากใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะทำให้เคลือบเค็ดยึดเป็นฟอง การให้ความร้อน ถ้าผู้เผาให้ความร้อนจากหัวพันไฟตรงบริเวณของเคลือบหรือโลหะเป็นเวลานานเกินไป จะทำให้บริเวณนั้นเกิดฟองได้มาก ระยะเวลาเผายังนานก็เป็นเหตุให้ฟองอากาศเกิดขึ้นได้ง่ายเช่นกัน อีกปัจจัยหนึ่งที่มักจะเป็นสาเหตุของการเกิดฟองอากาศคือ ความตึงผิวของเคลือบที่หลอมจนบนผิวโลหะมีผลทำให้เกิดการเปียก ถ้าบริเวณชั้นผิวการถ่ายเทความร้อนจากโลหะจะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากสภาพผิวที่ช่วยกระทำ (surface-active condition)

หรืออย่างไรก็ตาม ยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้เกิดฟองอากาศ เช่น ผู้ทำการเคลือบมีชั้นผิวของเคลือบหนาหรือบางต่างกันก็ย่อมทำให้เกิดการสุกตัวไม่เท่ากัน เคลือบชั้นบางกว่าจะถึงจุดเค็ดยึดก่อน และปัญหาการเกิดฟองอาจมีสาเหตุอย่างอื่นอีกเช่น มีสิ่งเจือปนในเคลือบและที่ผิวโลหะมีสาเหตุจากมีผงฝุ่น หรือ ล้างผิวโลหะด้วยกรดไม่สะอาด ลักษณะของผิวไม่เรียบ และการเกิดของผสม complex บางชนิดที่มีจุดหลอมตัวต่ำระหว่างชั้นผิว อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักดังที่กล่าวมาแล้ว คือ ปัจจัยโดยหลักที่เกี่ยวกับชนิดของฟrit ขนาดอนุภาคของการบด สภาพของผิวที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาและสภาพการเผา สิ่งต่างๆเหล่านี้ ถ้ามีความเข้าใจและระมัดระวังก็จะทำให้ผลงานของอีนาเมลลดการเกิดฟองและ สร้างคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีนาเมลได้ดี

1.5 โลหะที่ใช้งาน

ต่อไปนี้จะกล่าวถึง โลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม และการยึดเกาะของผิวแก้วอีนาเมลกับโลหะทองแดงดังต่อไปนี้

1.5.1 โลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม ¹³

ทองแดงเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง $1,080\text{ }^{\circ}\text{C}$ โลหะชนิดนี้มีข้อดีสามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์อีนาเมลจัดอยู่ในประเภทอีนาเมลทองแดง (copper enamel) ทองแดง

สัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างอุณหภูมิ 0-300 °C มีค่าเท่ากับ $540 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ทองแดงสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเป็นสารประกอบออกไซด์ได้ง่ายและเมื่อสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นจะสามารถรวมตัวทางปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุหลอมเหลว เช่น แก้ว ให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้อีก ทองแดงบริสุทธิ์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99% ขึ้นไปจะนำไปใช้ทำเป็นลวดตัวนำไฟฟ้า แต่สิ่งที่น่าสนใจนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นามลจะเป็นโลหะผสมของทองแดง

โลหะผสมของทองแดง แยกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ ทองเหลือง (brass) บรอนซ์ (bronze) และอื่นๆ

ทองเหลือง (brass) คือ โลหะผสมของทองแดง โดยมีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลักและมักจะมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ปริมาณสังกะสีในทองเหลืองมีตั้งแต่จำนวนเล็กน้อยถึงมากกว่า 40% โดยน้ำหนักจะทำให้สีของทองเหลืองแตกต่างกัน และมีความแข็งแรงทางกลแตกต่างกันอีกด้วย ถ้าปริมาณสังกะสีมีมากจะทำให้โลหะมีความเหนียวดีขึ้น ส่วนผสมในทองเหลืองนอกจากสังกะสีแล้วยังมี อะลูมิเนียม แมงกานีส ซิลิคอน และเหล็ก โดยธาตุเหล่านี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทองเหลืองที่นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์อื่นามลจะมีสังกะสี 5-10% ทองเหลืองชนิดนี้สามารถรวมปฏิกิริยากับแก้วที่ขึ้นระหว่างผิวได้ดีพอสมควร และการขีดเกาก็สามารถเกิดขึ้นได้

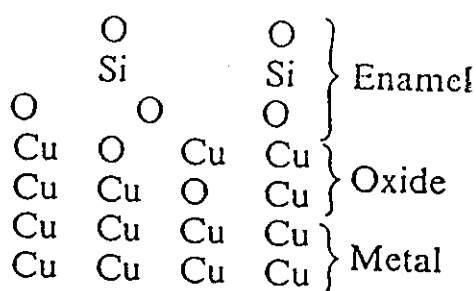
บรอนซ์ (bronze) หมายถึง โลหะผสมระหว่างทองแดงกับธาตุอื่น ธาตุอื่นที่ผสมอยู่อาจเป็นสังกะสีก็ได้ แต่ปริมาณสังกะสีต้องไม่มาก บรอนซ์ทางการค้าประกอบด้วยทองแดง 90% และสังกะสี 10% ส่วนบรอนซ์สำหรับเครื่องประดับตกแต่ง (jewellery) มีปริมาณทองแดง 81.5% และสังกะสี 12.5% จะเห็นว่าโลหะในส่วนผสมดังกล่าวนี้ คือ ทองเหลือง (brass) นั่นเอง คำว่าบรอนซ์ในที่นี้ จึงมีความหมายเป็นความรู้สึกละเอียดของโลหะที่สวยงามเท่านั้น บรอนซ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ บรอนซ์ดีบุก (tin bronze) บรอนซ์อะลูมิเนียม (aluminium bronze) บรอนซ์ซิลิคอน (silicon bronze) และบรอนซ์โคบอลต์ (cobalt bronze)

บรอนซ์หรือทองเหลืองที่กล่าวมา เป็นโลหะผสมชนิดหนึ่งได้ถูกนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์อื่นามล อาจเรียกโลหะชนิดนี้ว่า บรอนซ์สังกะสี (zinc bronze) ที่มีปริมาณทองแดง 95% และสังกะสี 5% โดยน้ำหนัก

1.5.2 การยึดเกาะของแก้วอีนาเมลกับโลหะทองแดง

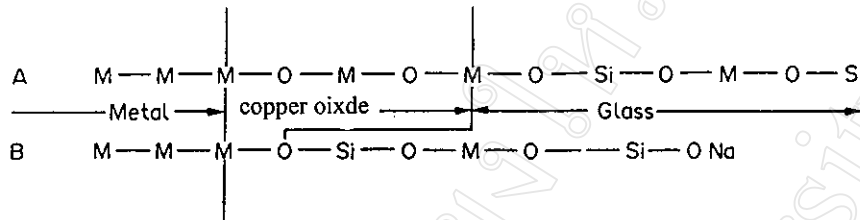
เมื่อติดตามการศึกษากการยึดเกาะที่เกิดขึ้นหลังจากเผาเคลือบอีนาเมลที่ฉาบหรือทาลงบนผิวโลหะทองแดง จะมีการยึดเกาะอย่างแข็งแรงเกิดขึ้น แรงชนิดนี้เรียกว่า ความแข็งแรงของการยึดเกาะ (bonding strength) การยึดเกาะเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อแผ่นทองแดงจะต้องมีความสามารถเปียก (wetting ability) ได้ดี โดยที่ผิวโลหะควรสะอาดปราศจากสิ่งเจือปน แต่ถ้าผิวโลหะมีความหยาบการยึดเกาะจะเกิดได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ผิวโลหะจะต้องสะอาดปราศจากออกไซด์ก่อนทำการเคลือบ แต่เมื่อเคลือบแล้ว การเกิดเป็นชั้นบางๆ (เป็น film) ของออกไซด์จะเกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นของการเผา ในที่สุดออกไซด์บนผิวโลหะจะทำปฏิกิริยากับเคลือบที่หลอมเป็นแก้วทำให้เกิดการเกาะยึดติดกัน ในการสร้างพันธะการยึดติดกัน องค์ประกอบเคลือบอีนาเมลมีความสำคัญเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิการหลอม ความตึงผิว (surface tension) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of thermal expansion) ปัจจัยดังกล่าวนี้ จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการเกาะยึด นอกจากนี้อาจให้มีตัวช่วยเพื่อการยึดเกาะ (adhering promoter) นั่นคือ ออกไซด์ของโคบอลต์ และนิกเกิล เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้เป็นตัวช่วยเชื่อมประสานที่ผิวสัมผัส เช่น การเติม 0.3-0.5% ของโคบอลต์ลงในเคลือบชั้นพื้น (ground coat) จะทำให้เคลือบอีนาเมลหลังเผาไม่หลุดลอกจากแผ่นโลหะ

เมื่อแผ่นโลหะทองแดงมีการยึดเกาะกับแก้วระหว่างผิวสัมผัส กล่าวได้ว่าออกไซด์ของทองแดงจะมีคิวปริออกไซด์ (Cu_2O) เป็นตัวร่วมอยู่ในการละลายของอีนาเมลจำนวนหนึ่งและอีกจำนวนหนึ่งจะกระจายอยู่ในผลึกที่เป็นโลหะผสมของทองแดง ก่อให้เกิดเป็นชั้นยึดเหนี่ยว (bonding layer) และอาจจะมีออกไซด์ของไอออน Cu^+ หรือ CuO เกิดขึ้นพร้อมกัน อยู่ในระหว่างชั้นกลางของแก้วกับโลหะ สิ่งนี้เป็นการปรากฏของพันธะทางเคมี (chemical bond) ที่อาจเขียนพันธะนี้เป็น $\text{Si}-\text{O}-\text{Cu}$ และสามารถเขียนเป็นแนวความคิดของชั้นระหว่างแก้วอีนาเมลกับโลหะทองแดงที่มีชั้นออกไซด์ของทองแดงอยู่เป็นชั้นกลางดังรูป 1.6¹⁴



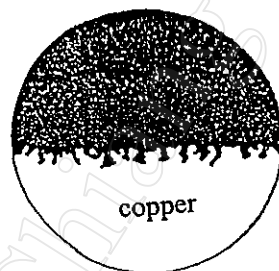
รูป 1.6 การจัดเรียงพันธะในชั้นอีนาเมลกับโลหะทองแดง¹⁴

และในทำนองเดียวกัน ที่ชั้นระหว่างผิวเคลือบแก้วกับโลหะทองแดงจะเกิด interatomic bonding ระหว่างออกไซด์ของโลหะโดยมีการเชื่อมโยงกับธาตุในองค์ประกอบของเคลือบแก้ว³ ซึ่งสามารถแสดงดังรูป 1.7



รูป 1.7 การเกิด interatomic bonding ระหว่างผิวเคลือบแก้วกับโลหะทองแดง³

คำอธิบายเพิ่มเติมของการยึดเกาะ ยังกล่าวอีกว่า ระหว่างผิวสัมผัสที่มีออกไซด์ Cu_2O และ CuO พร้อมด้วยธาตุที่มีอยู่ในเคลือบ สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complex) และตกจมลงบนผิวโลหะ เกิดเป็นโลหะผสม (metal alloy) ทำให้เกิดการยึดเกาะเป็นร่างแหฝังอยู่ โดยอาจเรียกว่า dendrite หรือ การฝังลักษณะเรือทอดสมอ (anchoring) สร้างการยึดเกาะเกิดขึ้น ซึ่งการตกจมลงหรือเกิดสภาพ dendrite หรือการทอดสมอ มีปริมาณความหนาแน่นมากเท่าใด ย่อมสร้างการยึดเกาะได้ดี ลักษณะการฝังร่างแหหรือการทอดสมอเกิดได้ดังรูป 1.8¹⁴



รูป 1.8 การทำลายผิวโลหะขณะเผาภายใต้ชั้นเคลือบอีนาเมล¹⁴

1.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารอ้างอิง

จากรายงานการศึกษาของ Healy และ Andrews ⁵ โดยใช้เทคนิคพิเศษ อธิบายว่า ข้อมูลจากปรากฏการณ์ยัดเกาะของโคบอลต์ที่ใช้เคลือบพื้นของอีนาเมล และการพัฒนาทฤษฎีรีดักชันของไฮโดรเจน (hydrogen – reduction theory) ซึ่งแสดงว่าโคบอลต์ออกไซด์ของอีนาเมล ถูกรีดิวซ์ไปเป็นโลหะโคบอลต์ซึ่งเกิดพันธะกับเหล็กและอีนาเมล

จากรายงานการศึกษาของ King และ คณะ ⁴ อธิบายการเกาะติดของอีนาเมลกับโลหะโดยทฤษฎีพันธะเคมี โดยแสดงการยัดเกาะที่ดีของพอร์เคลนอีนาเมลบนโลหะเหล็ก เป็นผลจากแก้วที่อิมมัลด้วยเหล็กออกไซด์(FeO) ที่ระหว่างผิวแก้วกับเหล็ก

จากรายงานการศึกษาของ Hagan และ Ravitz ¹⁰ การศึกษาการเกาะติดของอีนาเมลกับโลหะ โดยศึกษาพอร์เคลนอีนาเมลธรรมดา เปรียบเทียบองค์ประกอบที่เป็นอะตอมกับโครงสร้างของแก้วที่มีลักษณะซับซ้อน ซึ่งเป็นแก้วในระบบของ $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, Fe และ Fe_xO (Fe_x เมื่อ $x = 0.875-0.945$ ที่ 1000 องศาเซลเซียส) เป็นตัวอย่างของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆเมื่อมีการเกิดพันธะเคมี

จากรายงานการศึกษาของ Pask และ Fulrath ¹¹ ได้การศึกษากการเกาะติดของแก้วกับโลหะโดยพันธะเคมี โดยอาศัยสมมูลของพลังงานกับโครงสร้างของอิเล็กตรอนที่ต่อเนื่องระหว่างผิวแก้วกับโลหะจะเกิดพันธะเคมี เมื่อองค์ประกอบที่สมดุลปรากฏที่ระหว่างผิวแก้วกับโลหะ ดังนั้นสมมูลของแก้วที่อิมมัลด้วยออกไซด์ที่มีวาเลนซ์ (valent) ต่ำของโลหะที่เป็นฐาน

จากการรายงานการศึกษาของ Borom และ Pask ⁸ ได้ศึกษาบทบาทของออกไซด์ที่ยัดเกาะระหว่างแก้วกับโลหะ การยัดเกาะเป็นผลของออกไซด์ที่ยัดเกาะในรูปของอัลลอยด์ระหว่างผิวแก้วกับโลหะ มีสมมูลและการรักษาสมมูลของแก้วที่ติดกับผิวของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศ ซึ่งมีเดนไดรต์ในเนื้อแก้วและเป็นฟังก์ชันของ nickel flash ในพอร์เคลนอีนาเมล

จากรายงานการศึกษาของ Joseph ¹² ทำการตรวจสอบโครงสร้างการเคลือบอีนาเมลด้วยไมโครสโคปิก ซึ่งเกิดการหลอมของเม็ดฟrit ระหว่างการเผาและประกอบด้วยอนุภาคของอีนาเมล วัสดุทนไฟ และฟองก๊าซ อิทธิพลจำเพาะที่มีผลต่อโครงสร้างของเคลือบประกอบด้วยสมบัติของฟrit ตัวแปรเสริมการเป็นเม็ด (grinding parameter) การเติมในขณะบด และสภาวะการเผา ความรู้ของตัวแปรเสริมเหล่านี้ และปฏิสัมพันธ์เหล่านี้ เป็นสาระสำคัญสำหรับการเลือกที่น่าจะดีที่สุด และการเตรียมของอีนาเมล และเป็นพื้นฐานของการทำอีนาเมลที่มีคุณภาพสูง

จากรายงานการศึกษาของ Mackert และ คณะ¹⁵ ได้การศึกษาเสนอวิธีการที่พัฒนาไปสู่การรวบรวมสารที่เป็นผลึกทั้งหมด อาจจะปรากฏอยู่ในโซนระหว่างผิว เพื่อจะทำมากขึ้นเป็นตามกฎเกณฑ์เพื่อวัดโดย เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X – ray diffraction) ตลอดจนการใช้ของ wüstite มาตรฐาน เทคนิคที่เสนอนี้แสดงความสามารถของการวัดชั้นของ wüstite ที่ระหว่างผิวอีนามัล – เหล็กที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.3 ไมโครเมตร

1.7 วัตถุประสงค์การศึกษา

1.7.1 เพื่อศึกษาการเกาะติดของแก้วอีนามัลกับโลหะทองแดง

1.7.2 ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น เมื่อการเกาะติดไม่สมบูรณ์ เช่น การปรากฏรอยแตก การเกิดฟอง