

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เส้นใยนาโน $\text{SiC-Al}_4\text{O}_4\text{C-Al}_4\text{SiC}_4$ โดยวิธีการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการเสริมแรงให้แก่ผิวเคลือบ Al-12Si กระบวนการเตรียมผิวเคลือบโดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยความร้อน รวมทั้งวิธีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบแบบต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)

ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุทนไฟประเภทที่มีซิลิคอน (Si) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบคุณสมบัติต่างๆ ของซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์ [9]

น้ำหนักโมเลกุล	40.10 g
ค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนที่ 25-1400 °C	$4.4 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)	410 GPa
จุดหลอมตัว (melting point)	2700°C
ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)	0.285 Cal/gK
ความแข็ง (hardness)	9.0-9.5 Moh's scale
ความหนาแน่น (density)	2.0 g/cm ³
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	3.2

2.1.1 คุณสมบัติสารประกอบซิลิคอนคาร์ไบด์[10]

สารประกอบซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถถูกเผาไหม้ได้ในบรรยากาศออกซิเดชั่น (oxidation atmosphere) ซิลิคอนคาร์ไบด์มีจุดหลอมเหลวที่ 2700 องศาเซลเซียส มีค่าการนำความร้อนสูง การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนค่อนข้างต่ำ ทนต่อความร้อนสูง ทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี

(thermal shock resistance) มีค่าความแข็งแรงทางกลสูง ทนทานต่อการสึกกร่อน ทนทานทางเคมี (Chemical resistance) ทนทานต่อบรรยากาศออกซิเดชัน (oxidation resistance) เป็นต้น

ซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ แต่เป็นสารที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น โดยปกติซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีโครงสร้างผลึกอยู่สองแบบ คือ แบบลูกบาศก์ (cubic) และแบบทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) ซิลิคอนคาร์ไบด์แบบลูกบาศก์นั้นจะเรียกว่า เบตาซิลิคอนคาร์ไบด์ (β -SiC) สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้โดยให้ส่วนประกอบของซิลิคอนกับคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000 องศาเซลเซียส ส่วนซิลิคอนคาร์ไบด์แบบทรงหกเหลี่ยมนั้นจะเรียกว่า แอลฟาซิลิคอนคาร์ไบด์ (α -SiC) ดังรูป 2.1 สำหรับการสังเคราะห์ซิลิคอนคาร์ไบด์มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน คือ

- 1) สังเคราะห์จากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างซิลิคอนกับคาร์บอน



- 2) สังเคราะห์จากปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ระหว่างซิลิกากับคาร์บอน

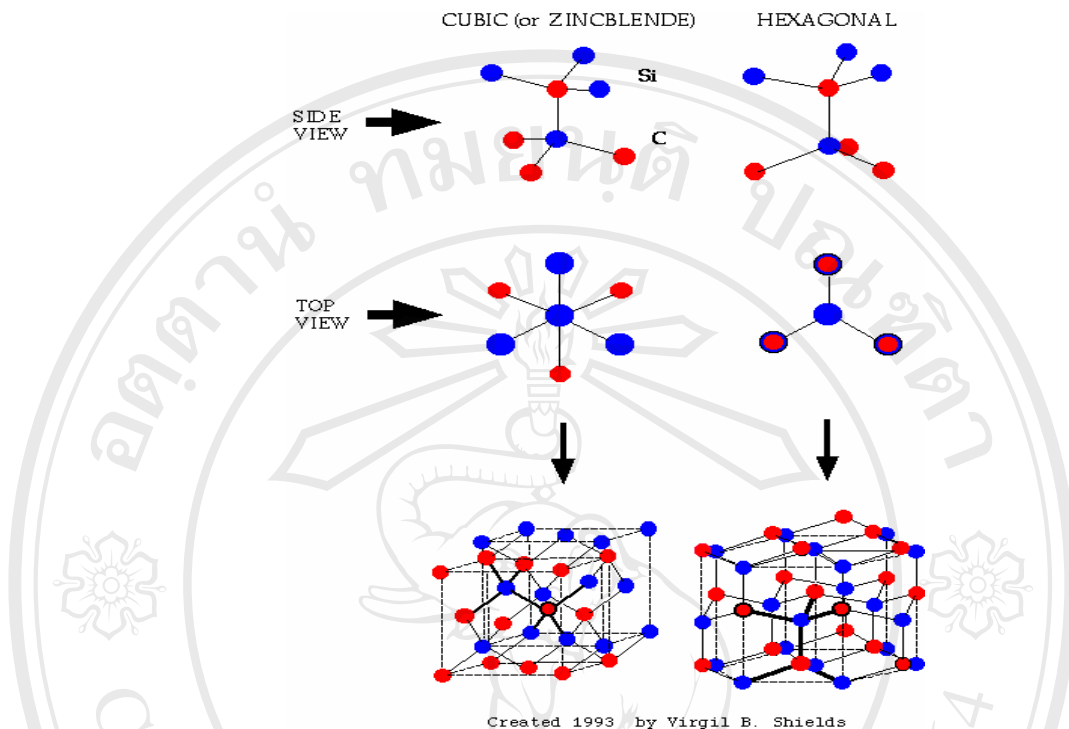


- 3) สังเคราะห์จากปฏิกิริยาในสภาวะไอ (Vapor phase reaction or Chemical Vapor Deposition, CVD) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (SiCl_4) ที่อยู่ในสภาวะไอทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (CH_4)



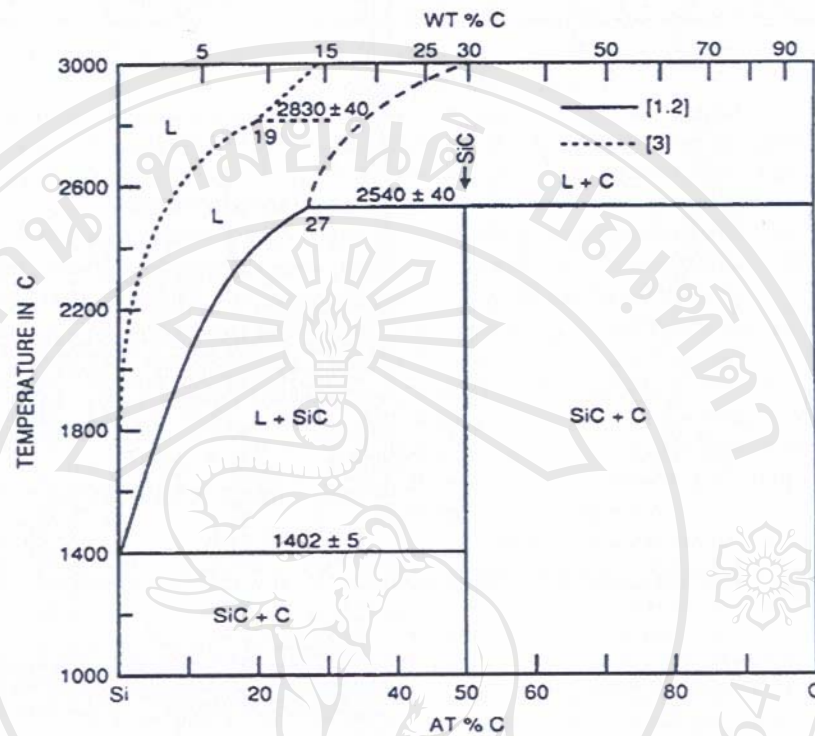
- 4) สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิคอนไตรคลอไรด์ (Methylsilicon trichloride)





รูป 2.1 แสดงโครงสร้างซิลิคอนคาร์ไบด์ทรงลูกบาศก์ (β -SiC) และทรงหกเหลี่ยม (α -SiC)

ในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิคอนและคาร์บอนจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1050°C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิประมาณ $1500-1900^{\circ}\text{C}$ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ ทำให้ได้ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปของเบตาซิลิคอนคาร์ไบด์ดังรูป 2.1 ส่วนการสังเคราะห์แอลฟาซิลิคอนคาร์ไบด์จะสามารถสังเคราะห์ต่อได้จากปฏิกิริยาการเตรียมเบตาซิลิคอนคาร์ไบด์ เมื่อได้เบตาซิลิคอนคาร์ไบด์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $1500-1900^{\circ}\text{C}$ จนอุณหภูมิสูงถึง 2100°C เบตาซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นแอลฟาซิลิคอนคาร์ไบด์จนอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2400 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนจากเบตาซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นแอลฟาซิลิคอนคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูป 2.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) [11]

นอกจากนี้ซิลิคอนคาร์ไบด์ยังสามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ได้หลากหลายรูปแบบ ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากซิลิคอนคาร์ไบด์มีใช้หลากหลายชนิด โดยอาศัยสมบัติที่โดดเด่นในการนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงพอเป็นสังเขป คือ[12]

- 1) แหวนกันซึม : แหวนกันซึมที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีความคงทนต่อการสึกหรอ และการกัดกร่อน มีความเสียดทานน้อย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน สามารถนำความร้อนได้ดี มีขนาดที่แม่นยำ และมีน้ำหนักเบา แหวนกันซึมซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถนำมาใช้กับระบบปั๊มที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ ใช้ในโรงงาน โรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ การทำเหมือง เครื่องจักร และการแช่เย็น
- 2) ไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) : ไฮโดรไซโคลนซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีความคงทนการสึกหรอสูง สามารถใช้ได้ดีมากกับเหมืองหิน อายุการใช้งานของไฮโดรไซโคลนจะนานกว่า

ไฮโดรไซโคลนที่ทำจากเซรามิกชนิดอื่นถึง 5 เท่า

- 3) ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange) : ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซิลิคอนคาร์ไบด์ มีความคงทนต่อการกัดกร่อน สามารถนำความร้อนได้ดี และมีความแข็งแรงสูง นำมาใช้ในโรงงานต่างๆ เช่น โรงผลิตสารเคมี
- 4) อุปกรณ์วัสดุกึ่งตัวนำ : วัสดุกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง นำความร้อนได้ดีกว่าวัสดุกึ่งตัวนำที่ผลิตจากโลหะ สามารถผลิตให้หลากหลายรูปร่างและขนาด

2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์คาร์ไบด์ ($\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$) [13,14]

อะลูมิเนียมออกไซด์คาร์ไบด์หรืออะลูมิเนียมเตตรอกไซด์คาร์ไบด์ (Aluminium Tetroxycarbide) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และแกรไฟต์ดังสมการ 2.5 อะลูมิเนียมออกไซด์คาร์ไบด์ ($\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$) จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthombic)

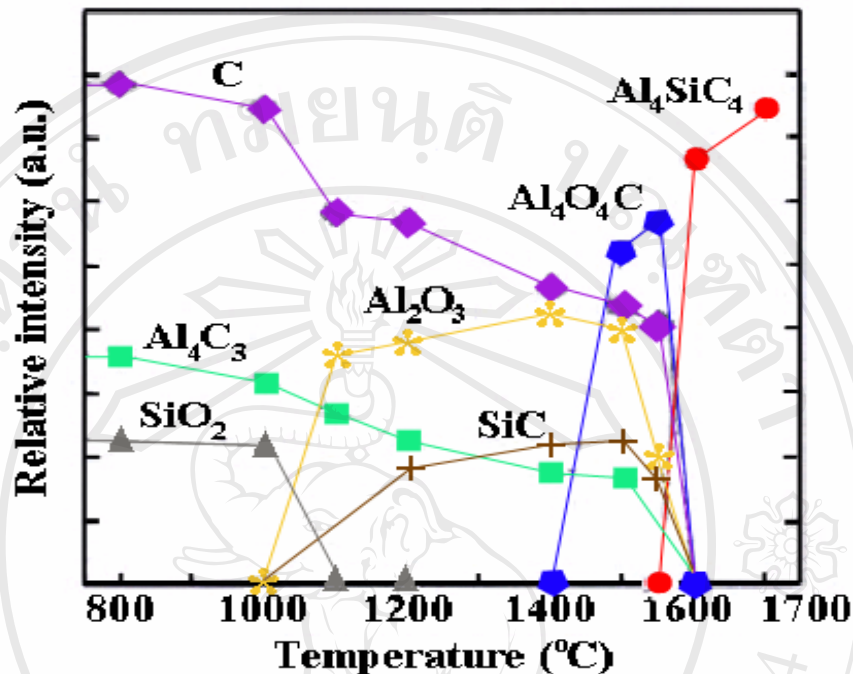


2.2.1 กระบวนการเกิดออกไซด์คาร์ไบด์

ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และแกรไฟต์เทียบเท่ากับระบบที่ประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม-ออกซิเจน-คาร์บอน (Al-O-C system) ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) ปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์คาร์ไบด์ (oxycarbide formation reaction)
- 2) ปฏิกิริยาการระเหย (volatilization reaction)

ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มปฏิกิริยานี้ไม่สามารถแบ่งช่วงของการเกิดได้อย่างชัดเจน สารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบ Al-O-C นี้ คือ $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$, Al_2O_3 และ Al_4C_3 สารประกอบที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่อุณหภูมิ 800-1700 °C แสดงดังรูป 2.3



รูป 2.3 การเปลี่ยนเฟสของสารประกอบที่อุณหภูมิ 800 - 1700 °C [14]

ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสารประกอบในระบบ Al-O-C คือ



สารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบ Al-O-C ได้แก่

- 1) อะลูมิเนียมเตตระออกไซด์คาร์ไบด์ (aluminium tetroxycarbide; $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$) ระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิระเหยของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับแกรไฟต์ แต่การระเหยจะมีช่วงอุณหภูมิที่ซ้อนกันได้ และภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ เกิดการสร้างตัวได้จากไอ ซึ่งจะเกิดอย่างช้าๆ จากปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และแกรไฟต์ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 - 1600 °C และความดันต่ำ การประยุกต์ใช้ $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ มีการประยุกต์ใช้ในด้าน การเป็นวัสดุทนการสึกกร่อน (High - hardness abrasive) และทนการขัดถูเป็นส่วนใหญ่ (wear resistant)

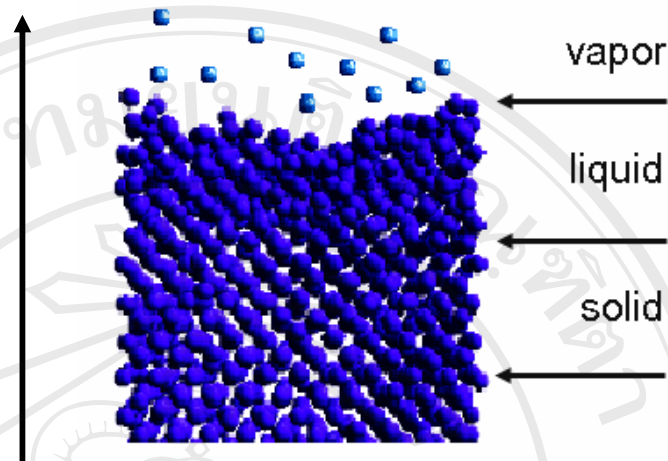
- 2) อะลูมิเนียมโมนอกไซด์คาร์ไบด์ (aluminium monoxycarbide; Al_2OC) วัสดุสามารถสร้างตัวจากปฏิกิริยาของแข็ง-ของแข็ง (solid-solid reaction) โดยตรงแต่ในกรณีของ Al_2OC สามารถเกิดการสร้างตัวจากไอได้เช่นกัน
- 3) อะลูมิเนียมคาร์ไบด์ (aluminium carbide; Al_4C_3) เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบ Al-O-C ที่อุณหภูมิสูงกว่า $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ และ Al_2OC ซึ่งลำดับของการสร้างตัวจะอาศัย $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน แสดงดังสมการ 2.8 โดยสารประกอบ Al_4C_3 มีความไม่เสถียร ส่วนคาร์ไบด์ถูกแยกตัวได้ง่ายในอากาศที่มีความชื้นจะทำให้เกิด $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (hydrates of alumina) และมีเทน (methane)

2.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน

2.3.1 ทฤษฎีการสร้างตัวของเส้นใยนาโนแบบกลไกไอ-ของเหลว-ของแข็ง

การเกิดของเส้นใยนาโนมีกลไกแบบไอ-ของเหลว-ของแข็ง (Vapor-Liquid-Solid mechanism, VLS) ซึ่งขั้นตอนการเกิด คือ เมื่อแท่งสารตั้งต้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะทำให้ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแท่งสารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ ซึ่งโมเลกุลหรืออะตอมของธาตุจะแพร่จากบริเวณที่อุณหภูมิสูงไปอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการรวมตัวเป็นของเหลว และของเหลวเกิดการตกตะกอน (precipitation) เป็นของแข็ง ซึ่งกลไกนี้เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวของสถานะของเหลวและของแข็ง (liquid - solid interface) สำหรับสถานะของแข็งที่เกิดจากกลไกนี้จะเป็นรูปร่างใหม่เป็นเส้นใยนาโนชนิดลูกปัดหรือเส้นใยนาโนชนิดเรียบ

ทิศทางการสร้างตัวของเส้นใยนาโน

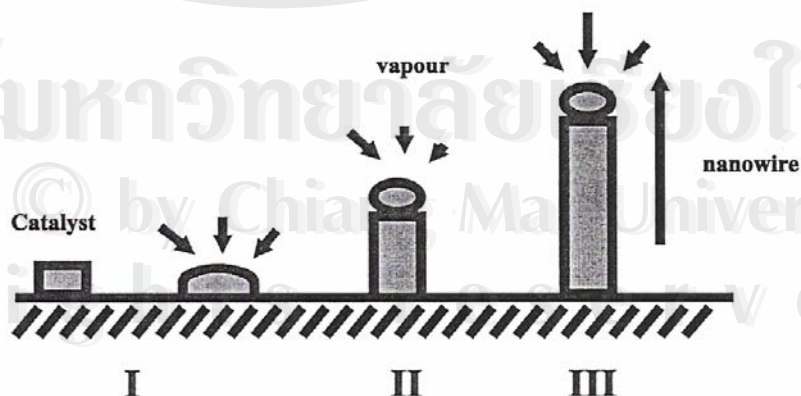


รูป 2.4 แสดงรอยต่อระหว่าง ของแข็ง - ของเหลว และ ของเหลว-ก๊าซ [15]

การสร้างตัวของเส้นใยนาโนจะสร้างตัวเป็นของแข็งที่มีการจัดเรียงอะตอมที่เป็นระเบียบ และรอยต่อระหว่างสถานะของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ไม่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน โดยการสร้างตัวของเส้นใยจะค่อยๆ สร้างตัวขึ้นในทิศทางหนึ่ง โดยขึ้นกับอุณหภูมิและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามตำแหน่งและทิศทาง

2.3.2 กลไกการเกิดเส้นใยนาโนแบบไอ-ของเหลว-ของแข็งในกรณีที่มีตัวคะตะลิสต์[16]

ในกรณีที่สังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยมีการใช้ตัวคะตะลิสต์เพื่อช่วยในการสร้างตัวของเส้นใยนาโนนั้น สามารถอธิบายโดยใช้กลไกการเกิดแบบ ไอ-ของเหลว-ของแข็ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

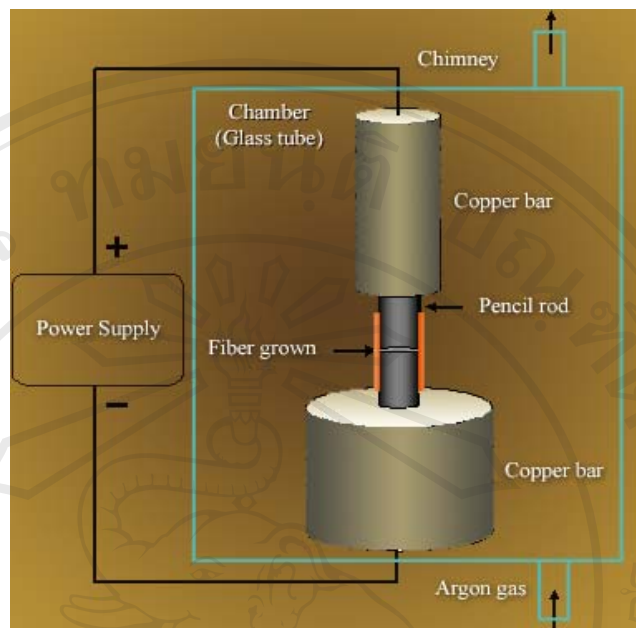


รูป 2.5 แสดงเงื่อนไขการเกิดเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์โดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากรณีที่มีการเติมตัวคะตะลิสต์[16]

คะตะลิสต์ที่ใช้เป็นโลหะหรืออัลลอยด์ก็ได้ ซึ่งคะตะลิสต์นี้จะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีในการเกิดเส้นใยนาโน จากรูป 2.5 เมื่อตัวคะตะลิสต์ได้รับความร้อนจนกลายเป็นของเหลว (ช่วง I) จากนั้นจะมีไอของสารตัวที่ต้องการจะทำการเป็นเส้นใยนาโนมารวมตัว ณ บริเวณรอยต่อของตัวคะตะลิสต์ที่มีสถานะเป็นของเหลว หลังจากนั้นจะฟอร์มตัวกลายเป็นของแข็งและจะยืดตัวขึ้นเรื่อยๆ (ช่วง II) จนกลายเป็นเส้นใยนาโน (ช่วง III) สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กหรือใหญ่นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของคะตะลิสต์ที่ใช้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำมาอธิบายการเกิดเส้นใยนาโนที่ใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าได้ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

2.3.3 เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า (current heating technique)

การสังเคราะห์เส้นใยนาโนชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์-อะลูมิเนียมเตตระออกไซด์คาร์ไบด์ โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมแท่งสารตั้งต้น ได้แก่ ไลด์นีสอเบอร์ EE ยี่ห้อ STAEDTLER ที่ตั้งอยู่ระหว่างขั้วทองแดง ที่ถูกครอบด้วยภาชนะแก้วภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ใช้ คือ 2 ลิตร/นาที่ เพื่อลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศของสารประกอบในแท่งสาร ความต่างศักย์ที่ใช้อยู่ในช่วง 25-35 โวลต์ และค่ากระแสประมาณ 10 แอมแปร์ เพื่อปรับกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงประมาณ 250-350 โวลต์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่แท่งสารและอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ 1500-1700 °C นี้ทำให้อาตู่ที่เป็นส่วนประกอบในแท่งสารตั้งต้นเกิดการหลอมระเหยกกลายเป็นไอแล้วรวมตัวใหม่เป็นเส้นใยนาโน



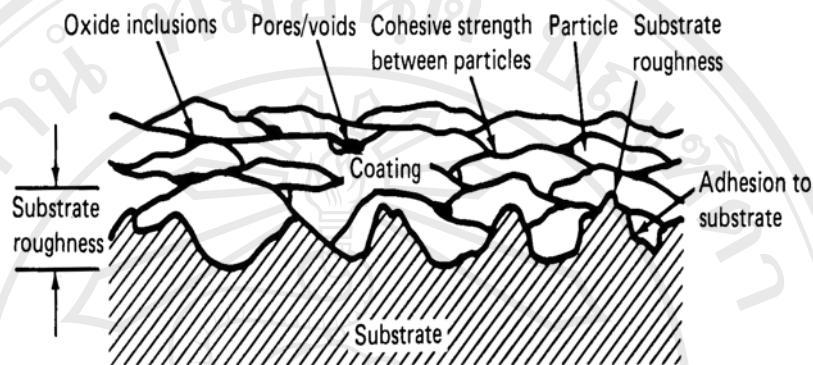
รูป 2.6 แผนผังอุปกรณ์วิธีการสังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยวิธีการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า [16]

2.4 การพ่นเคลือบด้วยความร้อน[17]

การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (thermal spray coating) เป็นหนึ่งในวิศวกรรมพื้นผิว (surface engineering) ที่สามารถเคลือบผิวที่มีความหนาตั้งแต่ 50 ไมครอนขึ้นไป โดยนำวัสดุต่างๆ เคลือบลงบนผิวของวัสดุอีกชนิดหนึ่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างของวัสดุนั้น เช่น เคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอของวัสดุ การซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ เพิ่มความนำไฟฟ้า เพิ่มความทนทานที่อุณหภูมิสูง การป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมี และเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุ เป็นต้น โดยจะสามารถเลือกใช้วัสดุที่นำมาเคลือบได้หลายประเภท เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยวัสดุที่นำมาเคลือบได้แก่ โลหะ อโลหะ เซรามิก โลหะผสมเซรามิก (cermet) และวัสดุคอมโพสิตต่างๆ เป็นต้น

หลักการของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน คือ การหลอมวัสดุเคลือบให้อยู่ในภาวะหลอมเหลวหรือกึ่งหลอมเหลว แล้วพ่นด้วยแรงดันแก๊สให้ไปตกกระทบผิวชิ้นงานโดยอนุภาคที่หลอมจะแผ่ออกมาบนผิวตามแรงอัด หลังจากนั้นจะเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำ อนุภาคแบนที่แข็งตัวบนผิวชิ้นงานจะเรียกว่า splat เมื่อ splat มาทับถมกันหลายๆ ชั้นขึ้นก็จะ

กลายเป็นโครงสร้างของผิวเคลือบขึ้นมา เรียกว่า lamellar



รูป 2.7 ลักษณะของผิวเคลือบที่พ่นเคลือบด้วยความร้อน [18]

ข้อดีของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

- 1) สามารถเลือกใช้วัสดุที่นำมาเคลือบได้หลายชนิด โดยจะต้องเป็นวัสดุที่ให้ความร้อนแล้วเกิดการหลอมละลายได้โดยไม่เกิดการสลายตัว
- 2) ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะเคลือบทำให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบที่จะเคลือบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง บิดเบี้ยวผิดรูป
- 3) สามารถเคลือบผิวซ้ำได้ เพื่อการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของผิววัสดุ

ข้อจำกัดของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

- 1) สามารถเคลือบได้เฉพาะส่วนที่หัวพ่นหรือปืนพ่นเข้าไปถึง ทำให้ไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนมาก
- 2) ผิวเคลือบอาจมีสิ่งปนเปื้อนได้ เนื่องจากในขั้นตอนของการพ่นระหว่างปลายหัวพ่นผ่านไปยังผิววัสดุอาจเกิดการปนเปื้อนได้
- 3) การควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบทำได้ยาก เพราะอาจมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหลอมของวัสดุเคลือบ

2.4.1 ประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

จากหลักการของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน พบว่า แหล่งความร้อนและวิธีการเร่งวัสดุเคลือบให้ไปตกกระทบและแข็งตัวบนชิ้นงานถือเป็นสิ่งสำคัญซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบ จึงสามารถแยกประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1) แหล่งความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (combustion heat sources)
 - 1.1 การพ่นแบบเปลวไฟ (flame spray)
 - 1.2 การพ่นแบบเชื้อเพลิงออกซิเจนความเร็วสูง (high velocity oxy-fuel spray)
 - 1.3 การพ่นแบบปืนจุดระเบิด (detonation-gun)
- 2) แหล่งความร้อนที่ได้จากไฟฟ้า (electrical heat source)
 - 2.1 การพ่นแบบพลาสมา (plasma spray)
 - 2.2 การพ่นแบบอาร์คไฟฟ้า (wire-arc spray)

2.4.1.1 การพ่นแบบเปลวไฟ

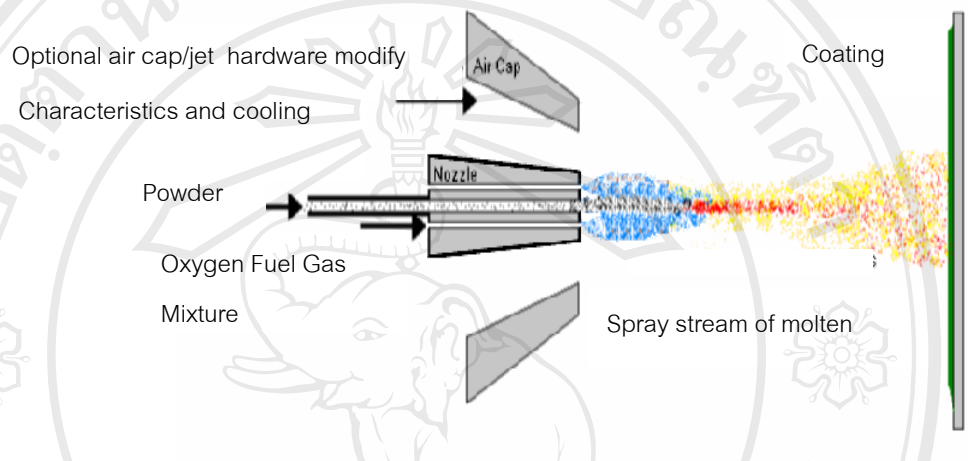
การพ่นแบบเปลวไฟ (flame spray) เป็นวิวัฒนาการเริ่มแรกสุดของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน โดยอาศัย แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ (combustion) ระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้มีหลายชนิด ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน เมทิลอะเซทิลีน -โพรพาไดอิน และไฮโดรเจน อุณหภูมิ และลักษณะของเปลวไฟจะขึ้นอยู่กับชนิดและอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจน การพ่นแบบเปลวไฟเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่ายกว่าเทคนิคอื่น ได้อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบสูง ลักษณะของผิวเคลือบโดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงของพันธะต่ำ ความพรุนสูง เนื่องจากการพ่นแบบเปลวไฟให้อุณหภูมิไม่สูงมากซึ่งอยู่ในช่วง 2000-3000 °C และปรับอุณหภูมิของการพ่นได้ไม่มากนัก จึงใช้ได้กับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเป็นส่วนใหญ่ เช่น Al , Mo, Cu, Zn และ Ni - base เป็นต้น

กระบวนการพ่นแบบเปลวไฟสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของวัสดุเคลือบคือ

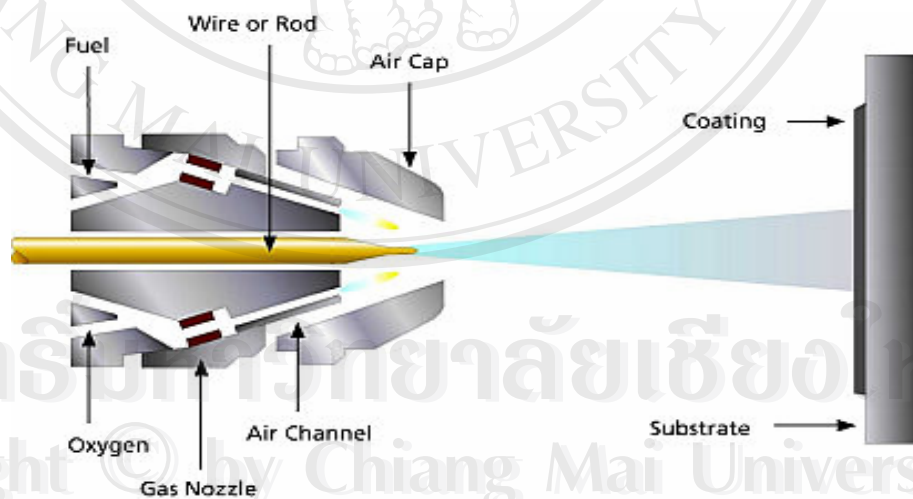
- 1) แบบใช้กับผง (powder flame spray, PFS)
- 2) แบบใช้กับลวด (wire flame spray, WFS)

โดยทั้งสองแบบมีหลักการเหมือนกัน จะต่างกันก็ตรงที่การออกแบบปืนพ่น ส่วนตัวป้อนวัสดุ

(feeder) ซึ่งเป็นแบบใช้กับลวดก็ต้องมีอุปกรณ์ขับเคลื่อนลวดเข้าไปที่เปลวไฟ



รูป 2.8 การพ่นเคลือบด้วยระบบเปลวไฟโดยใช้ผง[19]

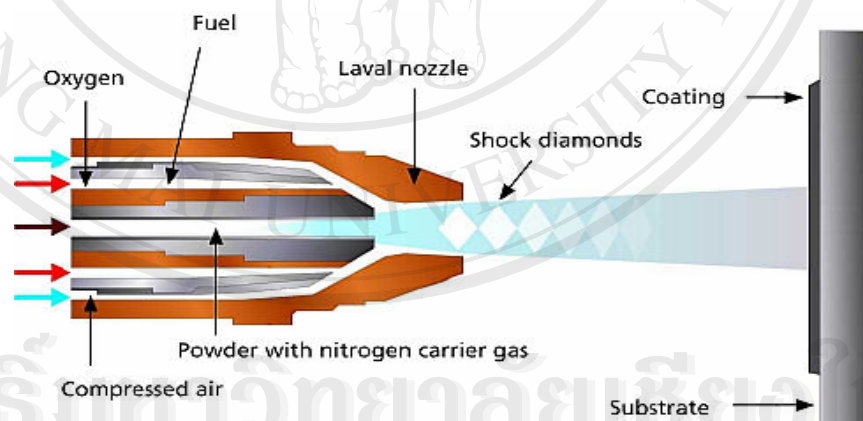


รูป 2.9 การพ่นเคลือบด้วยระบบเปลวไฟโดยใช้ลวด[20]

2.4.1.2 การพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง

การพ่นเคลือบแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง (high velocity oxy-fuel spraying, HVOF) มีพื้นฐานการทำงานเช่นเดียวกับการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ แต่แตกต่างกันตรงที่การพ่นแบบ HVOF เกิดการเผาไหม้ภายในกระบอกปืน (internal combustion) ตรงบริเวณห้องเผาไหม้ (combustion chamber) ในส่วนของหัวพ่น (nozzle) จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเล็กและยาวต่อจากห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันก๊าด อะเซทิลีน โพรพิลีน ไฮโดรเจน โพรเพน และเมทิลอะเซทิลีน-โพรพาไดอิน โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะถูกลำเลียงเข้าไปในห้องเผาไหม้และเกิดการเผาไหม้โดยจะเกิดความร้อนและการขยายตัวเคลื่อนที่ผ่านออกไปตามหัวพ่นที่ยาว (long nozzle) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิ และความดันสูงจนวัสดุเคลือบที่ถูกพ่นออกมามีความเร็วสูงถึง 600-800 m/s

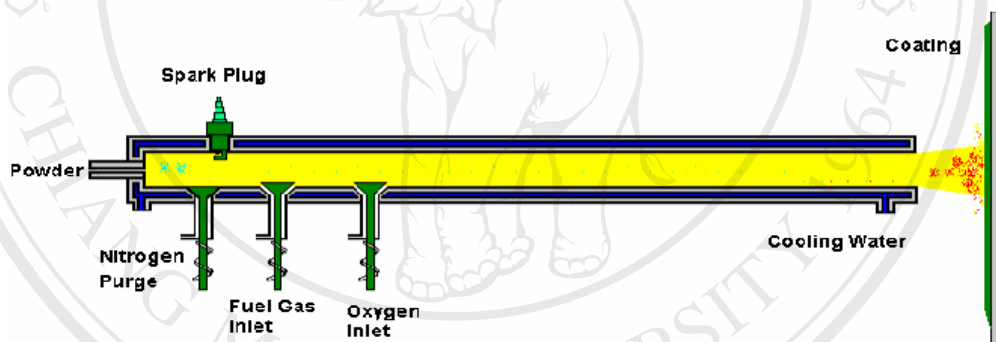
การพ่นเคลือบการพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูงเป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีความหนาแน่นสูงมีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบและผิวชิ้นงานดี และมีปริมาณออกไซด์ต่ำ



รูป 2.10 กระบวนการพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนเหลว[20]

2.4.1.3 การพ่นแบบปืนจุดระเบิด

การพ่นแบบปืนจุดระเบิด (detonation gun spray, D-Gun™) ได้พัฒนามาจากการพ่นแบบเปลวไฟโดยทำให้มีความเร็วของอนุภาคสูงขึ้น เป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่ให้ความเร็วของวัสดุเคลือบสูงที่สุด โดยอาศัยการจุดระเบิดเป็นจังหวะทำให้ได้ความเร็วสูงถึง 800-1000 m/s โครงสร้างของปืนพ่นแบบนี้แสดงในรูป 2.11 โดยทั่วไปจะเป็นท่อระบายความร้อนด้วยน้ำ มีวาล์วสำหรับป้อนก๊าซ ผงพ่น ออกซิเจนและเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ท่อพร้อมกับผงพ่น จากนั้น ปลั๊กสปาร์คจะทำหน้าที่จุดไฟ ทำให้เกิดความร้อนและความดันจากการระเบิดอย่างรุนแรง และเร่งให้ผงพ่นวิ่งไปตามท่อด้วยความเร็วเหนือเสียง หลังจากนั้นก็จะใช้ก๊าซไนโตรเจนไล่ไอเสียออกจากท่อเพื่อการจุดระเบิดในครั้งต่อไป โดยมีความถี่ของการระเบิดสูงถึง 10 ครั้งต่อวินาที การเคลื่อนที่เข้ากระทบบผิวชิ้นงานด้วยความเร็วสูงนี้ทำให้ได้ผิวเคลือบมีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูง [21,22]



รูป 2.11 กระบวนการพ่นแบบปืนจุดระเบิด[20]

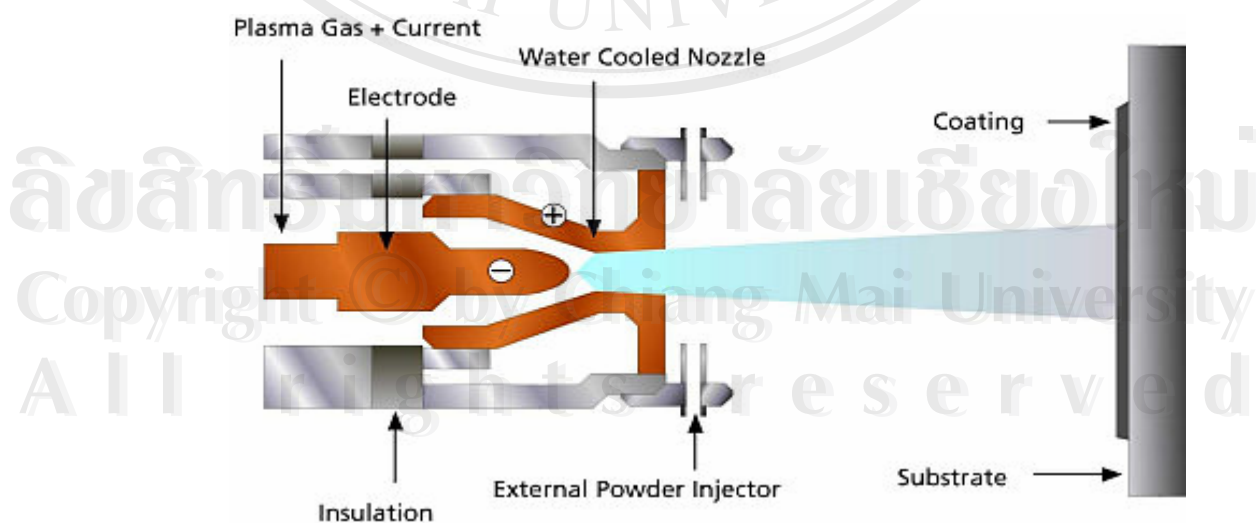
2.4.1.4 การพ่นแบบพลาสมา

การพ่นแบบพลาสมา (plasma spray) จัดว่ามีความซับซ้อนกว่ากระบวนการพ่นเคลือบแบบอื่นๆ ปืนพ่นประกอบด้วยขั้วแอโนดที่ทำจากทองแดง และขั้วคาโทดที่ทำด้วยทังสเตน ซึ่งทั้งสองขั้วจะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำ โครงสร้างของแอโนดและคาโทดนี้จะถูกออกแบบให้มีรูปร่างเพื่อใช้เป็นหัวพ่น (nozzle) ซึ่งอยู่ภายนอกลำกล้องของปืนพ่น ลักษณะของปืนพ่นดังแสดงในรูป 2.12 ก๊าซพลาสมาที่ใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ อาร์กอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ฮีเลียม โดยจะไหลผ่านลำกล้อง และช่องว่างระหว่างแอโนดกับคาโทด ด้วย เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง (direct current, DC) ซึ่งทำให้

ความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองสูงมาก จะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเฉพาะที่ (localized ionization) อยู่ระหว่างขั้วทั้งสองเป็นผลให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้า และเกิดอาร์คไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความร้อนสูงทำให้อุณหภูมิของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดการแตกตัวเป็นลพลาสมา ลพลาสมานี้เมื่อเคลื่อนที่ออกจากหัวพ่น จะกลายเป็นลพลาสมาอิสระหรือพลาสมาที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน พลาสมาที่ทางออกนี้อาจมีอุณหภูมิสูงมากประมาณ 2,200-28,000 °C ผงวัสดุที่ใช้พ่นพอกจะถูกส่งเข้าไปในลพลาสมาที่ด้านหน้าของหัวพ่น ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด และผงวัสดุจะหลอมเหลวและถูกเร่งให้มีความเร็วสูงประมาณ 100-300 m/s เข้าไปกระทบบนผิวชิ้นงานและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยพลาสมาที่ใช้กันทั่วไปมักจะทำงานที่สภาพบรรยากาศ และเรียกกันว่า air plasma spray (APS) ส่วนกระบวนการพ่นเคลือบด้วยพลาสมาที่ทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุมหรือภายในห้องความดันต่ำ ซึ่งบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อยจะเรียกว่า vacuum plasma spray (VPS) หรือ low pressure plasma spray (LPPS)

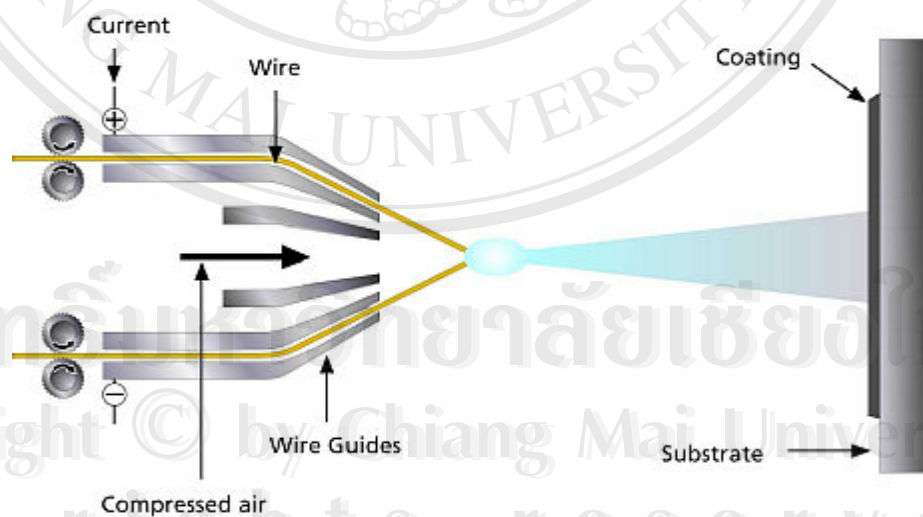
กระบวนการพ่นเคลือบด้วยพลาสมามีข้อดี คือ สามารถใช้วัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้เช่น ทังสเตนและเซรามิก ชิ้นผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการนี้มีความหนาแน่นและความแข็งแรงดีกว่ากระบวนการพ่นพอกด้วยความร้อนแบบอื่นๆ กระบวนการพ่นพอกด้วยพลาสมาเป็นกระบวนการที่มีช่วงการใช้งานกว้างที่สุด อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของกระบวนการนี้ คือ ต้องการลงทุนที่สูง และการที่ระบบมีอุณหภูมิสูงมากอาจทำให้วัสดุเคลือบบางชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเกิดการระเหิดตัวได้



รูป 2.12 กระบวนการพ่นแบบพลาสมา[20]

2.4.1.5 การพ่นแบบอาร์ค

การพ่นแบบอาร์ค (arc spray) เป็นกระบวนการที่แหล่งความร้อนจากไฟฟ้า โดยใช้กระแสไฟฟ้าระหว่างสองขั้ว และทำให้ลวดตัวนำทั้งสองซึ่งถูกสอดเข้าไปยังขั้วที่แตกต่างกันนั้นเกิดการอาร์ค (arc) และหลอมตัว โดยวัสดุเคลือบต้องอยู่ในรูปของเส้นลวดที่นำไฟฟ้าได้ จากนั้นก็ใช้อากาศอัดพ่นให้วัสดุหลอมเหลวนั้นให้แตกตัวเป็นละออง และวิ่งไปกระทบบนผิวชิ้นงาน ซึ่งละอองของวัสดุเหลวจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการเย็น (cold process) เช่นกัน โดยทั่วไปชิ้นผิวเคลือบที่ได้จากการบวนการพ่นเคลือบวิธีนี้ จะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงพันธะสูงกว่ากระบวนการพ่นเคลือบแบบเผาไหม้ (combustion thermal spray process) นอกจากนี้ ยังมีต้นทุนการดำเนินการต่ำกว่า อัตราการพ่นและประสิทธิภาพที่สูงกว่า ทำให้กระบวนการนี้เหมาะสำหรับ ชิ้นงานที่มีพื้นที่มาก และต้องการความรวดเร็ว ข้อจำกัดของกระบวนการนี้ คือ วัสดุหรือลวดที่ใช้พ่นต้องเป็นวัสดุนำไฟฟ้า และในกรณีที่ต้องการการอุ่นชิ้นงาน (preheat) ก็ต้องติดตั้งระบบอุ่นชิ้นงานเพิ่มเติมการประยุกต์การใช้งานของกระบวนการนี้ ได้แก่ งานพ่นพอกด้วยสังกะสีและอลูมิเนียมเพื่อป้องกันการกัดกร่อน (anticorrosion) และชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่



รูป 2.13 กระบวนการพ่นแบบอาร์ค[20]

2.4.2 การเปรียบเทียบการใช้งานของแต่ละกระบวนการ

เนื่องจากกรรมวิธีพ่นเคลือบผิวมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีความเหมาะสมกับลักษณะงานแตกต่างกัน เพราะฉะนั้นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งาน มิเช่นนั้นจะทำให้เสียเวลา ค่าใช้จ่าย เสียโอกาส ผลงานไม่มีประสิทธิภาพ โดยได้เปรียบเทียบความเหมาะสมในการใช้งานของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแต่ละวิธีไว้ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

ระบบ	การลงทุน	อุณหภูมิ (°C)	แหล่งความร้อน	ความเร็วอนุภาค (m/s)	ความพรุน (% by vol)	ความแข็งแรงพันธะ	อัตราการพ่น (kg/hr)
FS	ต่ำ	2500	การเผาไหม้	100	สูงถึง 20	ต่ำ	2-6
D-Gun TM	สูง	4000	การเผาไหม้	800	<1	สูงมาก	0.5
HVOF	สูง	3000	การเผาไหม้	600	<1	สูงมาก	2-4
Arc spray	ปานกลาง	6000	การอาร์ค	200	สูงถึง 10	สูง	12
APS	สูง	12000	พลาสมา	300	สูงถึง 10	สูง	3-9
VPS	สูง	12000	พลาสมา	400	<5	สูงมาก	3-9

2.4.3 วัสดุเคลือบ[21]

วัสดุเคลือบสำหรับการพ่นเคลือบด้วยความร้อนมีหลายประเภท ได้แก่ โลหะ อัลลอย เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม เช่น เซอร์เมท (เซรามิก+โลหะ) แต่ละประเภทก็มีหลายรูปแบบ ได้แก่

แบบผง แบบเส้นลวด และแบบแท่ง โดยวัสดุประเภทโลหะ อัลลอย และ เซอร์เมท ส่วนใหญ่จะเป็นแบบผงและแบบลวด ส่วนวัสดุเซรามิกส่วนใหญ่จะเป็นแบบผง การเลือกใช้วัสดุขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวเคลือบที่ต้องการจะนำไปใช้ในแต่ละการใช้งาน โดยต้องเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับกระบวนการพ่นเคลือบ โดยทั่วไปจะต้องทำการวิเคราะห์วัสดุเคลือบในแง่ของขนาด องค์ประกอบทางเคมี และรูปร่างก่อนที่จะนำไปพ่นเคลือบ ทั้งนี้แต่ละปัจจัยมีผลโดยตรงต่อผิวเคลือบดังนี้

1) ขนาดอนุภาค (particle size) เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับระบบของการพ่นและชนิดของปืนพ่น เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ต่างกันจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับชิ้นงาน อัตราเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ถึงผิวหน้าของชิ้นงาน ตลอดจนการฟุ้งกระจายของอนุภาคขณะที่ทำการพ่นเคลือบ ซึ่งจะมีผลต่อการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการพ่นดังนี้

- 1.1) ระยะการพ่นเคลือบ
- 1.2) อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้
- 1.3) อัตราเร็วรอบของชิ้นงาน

2) องค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบสำคัญทั้งนี้ทั้งนี้ที่ใช้ในการพ่นจะต้องทราบค่าปริมาณความบริสุทธิ์ และองค์ประกอบของวัสดุก่อนพ่นและหลังพ่น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง การเกิดออกไซด์ เป็นต้น การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยเทคนิค EDS-SEM และ XRD

3) รูปร่างของผงเคลือบ รูปร่างของผงเคลือบจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และความหนาแน่นของผิวเคลือบ โดยทั่วไปอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและสม่ำเสมอ จะให้อัตราการเคลือบสูงกว่าอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมและไม่สม่ำเสมอ เทคนิคที่สามารถตรวจสอบรูปร่างของผงเคลือบ การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยเทคนิคโดย กล้องจุลทรรศน์แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

2.4.4 การประยุกต์ใช้งานของผิวเคลือบ

2.4.4.1 ผิวเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอ

การสึกหรอของชิ้นงานโลหะนั้นเมื่ออยู่หลายประเภทโดยจะแตกต่างกันตรงที่กลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้น สำหรับการสึกหรอแต่ละประเภทก็ต้องการสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เช่น การใช้งานลูกปืนแข็งในสภาวะการสึกหรอแบบเกาะติด ผิวเคลือบจะต้องมีความแข็งใกล้เคียงกับผิวที่มาสัมผัส

(ซึ่งก็คือผิวที่ทำให้เกิดการสึกหรอ) และทนต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างดีเพื่อที่จะได้ความเรียบของผิวสัมผัสทั้งสองไว้ นอกจากนี้ต้องสามารถทนต่อแรงกดสูงได้และผิวเคลือบควรมีความลื่นในตัวเอง (self lubricant) ซึ่งอาจจะเนื่องจากเนื้อวัสดุที่มีความลื่นดี หรืออาจจะเกิดจากโครงสร้างของผิวเคลือบที่มีปริมาณรูพรุนปานกลาง (4 - 8%) ซึ่งจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นซึมเข้าไปอยู่ได้ และปล่อยออกมาขณะที่ใช้ งาน

2.4.4.2 ผิวเคลือบป้องกันการกัดกร่อน

ชิ้นงานและโครงสร้างโลหะบางกรณีถูกใช้งานภายใต้บรรยากาศที่มีความกัดกร่อนสูง เช่น ในน้ำทะเล หรือ ใกล้ทะเล ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งในสภาวะแวดล้อมของเมืองที่เป็นมลพิษ ดังนั้นผิวเคลือบจึงมีหน้าที่ปกป้องโครงสร้างของโลหะจากสภาพแวดล้อมเหล่านี้ ผิวเคลือบต้องมีโครงสร้างที่มีสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถไม่ให้สารกัดกร่อน เช่น เกลือ แก๊ส SO_2 , O_2 และไอระเหยของกรด ผ่านผิวเคลือบเพื่อเข้าไปกัดกร่อนโลหะที่อยู่ใต้ผิวเคลือบได้นอกจากนั้นหากชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และยา มีการสัมผัสกับอาหารและยาขณะใช้งาน ผิวเคลือบจะต้องไม่ทำปฏิกิริยา ไม่ทิ้งสิ่งแปลกปลอม และไม่มีผลกับส่วนผสมและคุณภาพของอาหารและยา

2.4.4.3 ผิวเคลือบป้องกันความร้อน

ผิวเคลือบป้องกันความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ผิวเคลือบสำหรับใช้งานในบรรยากาศในอุณหภูมิสูง (ไม่เกิน 850°C) เช่น ชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า ฯลฯ และผิวเคลือบสำหรับห่อหุ้มโลหะที่อุณหภูมิร้อนแดง เช่น แม่พิมพ์หล่อโลหะ ฯลฯ ในการใช้งานในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นในการแก้ปัญหาดังกล่าวในหลายกรณี ผู้ใช้จะเลือกใช้ผิวเคลือบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในขณะเดียวกัน เช่น การใช้ผิวเคลือบด้านล่างเป็นอัลลอยด์ของ Ni-Cr หรือ Ni-Al เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันและใช้ผิวเคลือบเซรามิกส์ ZrO_2 เป็นชั้นบนเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนเพื่อใช้ลดอุณหภูมิของชิ้นงาน ส่วนการเลือกใช้ผิวเคลือบสำหรับการห่อหุ้มโลหะก็จะขึ้นอยู่กับโลหะที่ห่อหุ้ม โดยผิวเคลือบต้องสามารถคงสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งและความเหนียวไว้ได้ที่ จุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ และต้องไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะนั้นที่อุณหภูมิหลอมเหลว

2.4.4.4 ผิวเคลือบตัวนำหรือฉนวนไฟฟ้า

ผิวเคลือบที่ใช้สำหรับชิ้นส่วนไฟฟ้ามักมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่เป็นจุด

สัมผัสให้กระแสผ่าน เช่น จุดสัมผัสของตัวเก็บประจุหรือฉนวนไฟฟ้า (dielectric) เพื่อป้องกันการไหลของกระแสไฟฟ้า ฉนวนสำหรับน็อตและสกรู นอกจากนี้ยังมีฉนวนเคลือบอีกชนิดที่สามารถใช้กรองคลื่นความถี่สูงได้เพื่อกักเก็บคลื่นความถี่นี้ต่อลงดิน

2.4.4.5 ฉนวนเคลือบเพื่อการซ่อมบำรุง

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะสึกหรอลงไปตามอายุการใช้งาน และเมื่อชิ้นงานสึกหรอจนไม่ได้ตามขนาดตามที่กำหนดไว้ก็就会被ถอดเปลี่ยนออกมา ซึ่งชิ้นงานบางประเภทมีราคาแพง ทำให้การซ่อมบำรุงชิ้นงานเก่าที่สึกไปเพื่อนำมาใช้ใหม่เป็นทางเลือกที่ประหยัดกว่า ทั้งทางด้านต้นทุนการผลิต พลังงาน และทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นการพ่นเคลือบด้วยความร้อนจึงมีบทบาทมากในการซ่อมบำรุง โดยการนำฉนวนเคลือบที่เหมาะสมมาพ่นเคลือบลงบนชิ้นงานสร้างเป็นใหม่ขึ้นมา และทำการตกแต่งผิวให้เรียบและมีขนาดตามที่ต้องการ ในการเลือกใช้วัสดุฉนวนเคลือบ ผู้ใช้ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น การยึดเกาะของฉนวนเคลือบบนชิ้นงาน ความต้านทานการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน และความยากง่ายในการตกแต่งผิว ฯลฯ

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของฉนวนเคลือบ

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของฉนวนเคลือบ โดยธรรมชาติจะมีลักษณะซับซ้อน ทำให้การศึกษาโครงสร้างจุลภาคต้องอาศัยข้อมูลการวิเคราะห์จากหลาย เทคนิคประกอบกันได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของเฟสต่างรูปร่าง และการจัดเรียงอนุภาค จุดบกพร่อง (defect) ต่างๆ เช่น รูพรุน (voids) หรือรอยร้าวในระดับไมครอน (micro scale) และโครงสร้างของฉนวนเคลือบในแนวดิ่ง (จากผิวหน้าถึงชั้นสเตรต) เป็นต้น การได้มาซึ่งข้อมูลเหล่านี้ ต้องอาศัยเทคนิคและเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope, OM) เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว และใช้ง่าย ราคาไม่แพง ข้อมูลที่สามารถบอกได้ คือ การยึดเกาะระหว่างฉนวนเคลือบกับชั้นสเตรต และการเสียรูป (deformation) ของชั้นสเตรตที่บริเวณรอยต่อกับผิว ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนและเฟสต่างๆ ในฉนวนเคลือบ ความหนาของฉนวนเคลือบ เป็นต้น

2.5.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) สามารถให้ข้อมูลได้ทั้งลักษณะพื้นฐาน และการวิเคราะห์ประกอบของเฟส โดยใช้เทคนิค energy dispersive x-ray diffraction (EDS) ซึ่งจะให้ข้อมูลทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเฟสต่างๆ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้ภาพโดยใช้ภาพถ่ายจาก SEM ของผิวเคลือบ มี 2 แบบ คือ

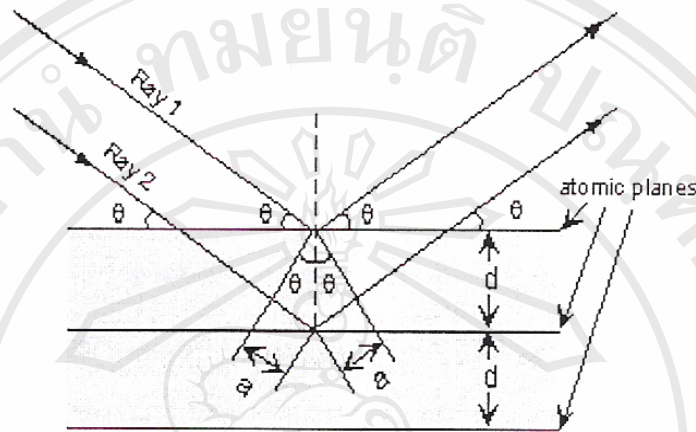
- 1) ภาพถ่ายแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron image, SE) ส่วนใหญ่จะใช้ดูลักษณะพื้นฐานทั่วไป เช่น ผิวบนของผิวเคลือบ ซึ่งจะบอกลักษณะทั่วไป ลักษณะ splat การหลอมของอนุภาค และความหยาบผิว
- 2) ภาพแบบอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (back scattered electron image, BSE) โดยภาพแบบ BSE จะอาศัยการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับนิวเคลียสของธาตุที่วิเคราะห์ ปริมาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ จะแปรตามเลขอะตอมของธาตุ ภาพที่เห็นจึงมีความเข้ม (contrast) แตกต่างกัน ตามชนิดของธาตุที่องค์ประกอบชิ้นงานที่จะถ่ายภาพด้วย SEM ได้ต้องนำไฟฟ้า

2.5.3 การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry, XRD) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้วิเคราะห์เฟสที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง ซึ่งใช้วิเคราะห์ได้ทั้งผงเคลือบและผิวเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลของเฟสในผงก่อนพ่นกับเฟสที่พ่นในผิวเคลือบ จะทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการสลายตัว (decomposition) และการเปลี่ยนเฟส (phase transformation) จากกระบวนการพ่น รวมทั้งปริมาณและชนิดของออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผิวเคลือบข้อมูลเหล่านี้จะบอกถึงคุณภาพของผิวเคลือบ ซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะการพ่น ที่จำเป็นต้องมีการปรับภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส และการเกิดออกไซด์น้อยที่สุด

หลักการของ XRD คือ การตรวจหามุมกระเจิง (diffraction angle, θ) ซึ่งสัมพันธ์กับค่า d-spacing และเป็นข้อมูลจำเพาะของแต่ละเฟสตามสมการของ Bragg's

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.9)$$



รูป 2.14 แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์

2.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ

สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ (mechanical properties) เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบก่อนการนำผิวเคลือบไปใช้งาน และเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้เทคนิค และการปรับพารามิเตอร์ของการพ่นเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีสมบัติตรงกับการใช้งานมากที่สุด

2.6.1 ความแข็ง

ความแข็ง (hardness) เป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัสดุที่บอถึงความสามารถในการรับแรงกด สำหรับผิวเคลือบที่ผ่านกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนนั้นจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีรูพรุน และออกไซด์รวมอยู่ในผิวเคลือบ ดังนั้นในการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบชนิดนี้จึงพบว่า มีค่าความแข็งต่ำกว่าค่าความแข็งจริงของวัสดุนั้นๆ ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบอื่นเป็นก้อน (bulk) โดยการวัดค่าความแข็งของผิวเคลือบสามารถวัดได้ทั้งแบบมหภาค ซึ่งจะได้ค่าความแข็งโดยรวมของทั้งผิวเคลือบ และแบบจุลภาคจะเป็นการวัดความแข็งเฉพาะที่ โดยวิธีทดสอบที่นิยมใช้กับผิวเคลือบชนิดนี้คือ การวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness) และแบบรูปล (Knoop hardness) การวัดค่าความแข็งจุลภาคมีการวัดตามแนวตัดขวางของผิวเคลือบ (cross-section) เพราะจะเป็นการวัดค่าความแข็งของเนื้อผิวเคลือบโดยตรง โดยหัววัดจะถูกกดไปบนผิว

เคลือบที่ไม่มีชั้นสเตรตอยู่ด้านล่าง ในขณะที่การวัดในแนวตั้งฉากกับผิวเคลือบ (perpendicular direction) หัวกดของเครื่องวัดจะกดไปบนผิวเคลือบซึ่งมีชั้นสเตรตอยู่ด้านล่าง ในกรณีนี้ความหนาของผิวเคลือบและชั้นสเตรตที่อยู่ด้านล่างอาจมีผลต่อค่าความแข็งที่วัดได้ แต่วิธีในแนวนิ่งหรือตั้งฉากกับผิวเคลือบนี้จะกระทำมิได้สะดวกกว่า เพราะเพียงแค่ขีดผิวหน้าของผิวเคลือบให้เรียบก็สามารถวัดค่าได้เลย โดยผิวเคลือบจะต้องมีความหนาน้อยกว่า 10 เท่าของความลึกที่เกิดจากการกดหัววัด

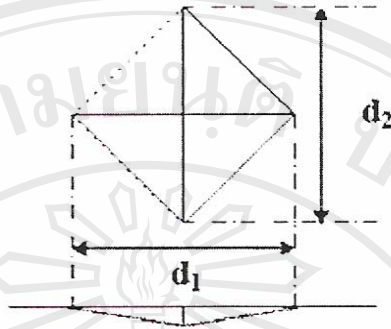
2.6.1.1 การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม (Vickers Microhardness Test) ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งแรงจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สำหรับการทดสอบความแข็งวิธีนี้ หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่อ่อนมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (HV ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 นิวตัน ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุที่ทดสอบ

$$HV = \frac{2F \sin(136/2)}{d^2} \quad (29)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (N/mm^2)

F คือ แรงกด (N)

d คือ ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ของรอยกด $= (d_1 + d_2)/2$ (mm^2)



รูป 2.15 แสดงลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการกดแบบวิกเกอร์

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- 1) การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าขึ้นงานอ่อนและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชร ตอนคลายหัวกดได้ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มีชั้นออกไซด์ หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)
- 2) ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y
- 3) ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ
- 4) การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุมจะขึ้นกับสายตาของผู้ทำการตรวจสอบ ดังนั้นควรให้บุคคลใดหนึ่งเป็นผู้อ่านค่าเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจหารอยกดที่เกิดขึ้น

2.6.2 ความต้านทานการสึกหรอ

2.6.2.1 การทดสอบแบบจานหมุน

เครื่องมือทดสอบแบบจานหมุน (Pin-On-Disk) เป็นการทดสอบที่ทำโดยยึดหัวหมุน (Pin) ให้อยู่กับที่ ส่วนจานจะหมุนขัดสีกับหัวหมุนในแนวราบ หัวหมุนอาจจะมีความเป็นลูกบอลที่ไม่มีการหมุนหรือเป็นวัสดุรูปครึ่งวงกลม หรือเป็นด้านเรียบของวัสดุทรงกระบอก เครื่องทดสอบแบบนี้ ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบไถล (sliding) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient) หรือสามารถหาอัตราการสึกหรอได้จากขนาดของรอยการสึกหรอ การหาค่าอัตราการสึกหรอ (wear rate) ที่แปรผันกับน้ำหนักที่กดทับต่อวัสดุตั้งสมการ

$$Q = KW = K \frac{V}{H} \quad (2.10)$$

$$Q = \frac{V}{L} \quad (2.11)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าความแข็ง และปริมาตร หรือน้ำหนักของวัสดุที่หายไป ได้ดังสมการ (2.10) และ (2.11)

เมื่อ Q = อัตราการสึกหรอ (wear; mm³/m)

K = ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ (wear coefficient)

W = น้ำหนักกดทับที่ให้กับวัสดุ (load; g)

H = ค่าความแข็งของวัสดุ (hardness)

V = ปริมาตรหรือน้ำหนักของวัสดุที่สึกหรอ (volume loss or mass loss; mm³)

L = ระยะทางที่เคลื่อนผ่านบนผิววัสดุ (sliding distance; m)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ

- 1) ความแข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการสึกหรอ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนมากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำ ในกรณีการสึกหรอแบบขัดถู (abrasive wear) ที่มีลักษณะสามองค์ประกอบ (three bodies abrasive wear) ค่าความแข็งของอนุภาคขัดสี (abrasive particle) จะมีผลต่อการสึกหรอของวัสดุด้วย

- 2) น้ำหนักที่กระทำกับวัสดุ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสึกหรอของวัสดุ โดยเมื่อให้แรงที่มากระทำกับวัสดุเพิ่มขึ้นจะเป็นผลทำให้มีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ Archard
- 3) อุณหภูมิ การที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในระบบที่มีการสึกหรอจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากจะทำให้ค่าความคงทนของวัสดุ (yield strength) ลดลง และยังอาจมีผลทำให้เกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อน (corrosive wear) ได้ง่ายขึ้นอีกด้วย [21]
- 4) ความเร็วของผิวสัมผัส เมื่อความเร็วในการสัมผัสเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นด้วยโดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการสึกหรอแบบกัดกร่อน (corrosive wear) ความเร็วของอนุภาคขัดสีที่มากระทบบริเวณผิววัสดุจะทำให้มีอัตราการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นด้วย
- 5) ความชื้น ซึ่งความชื้นจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบเสริมกันทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจะทำให้เกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อน แต่ในบางกรณีที่มีความชื้นสูงมากพอจะกลายเป็นตัวสำหรับหล่อลื่น (lubricant) จึงทำให้เกิดการสึกหรอลดลง [22]
- 6) อนุภาค พบว่า ค่าความแข็ง ขนาดและรูปร่างของอนุภาคจะมีผลต่อการสึกหรอ โดยถ้าอนุภาคมีความแข็ง ขนาดและอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมสูงจะทำให้มีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น โดยความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาคขัดถูจะมีผลต่ออัตราการสึกได้มากกว่าค่าความแข็งของอนุภาค