

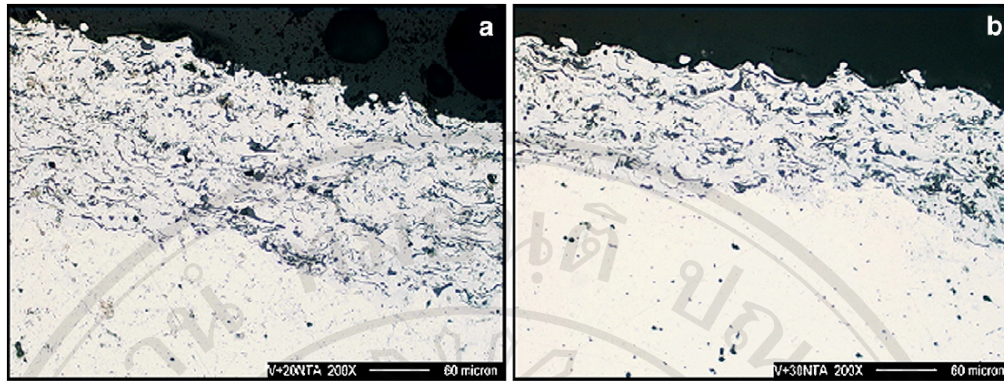
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับผิวพ่นเคลือบด้วยความร้อนนาโนคอมโพสิต เหล็กกล้าไร้สนิม ท่อนาโนคาร์บอน ในส่วนนี้กล่าวถึงลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอน วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยการตกตะกอนไอเคมี และการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการสังเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ การพ่นเคลือบด้วยความร้อน กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน พร้อมทั้งอธิบายเกี่ยวกับความแข็ง ความต้านทานต่อการขีดข่วน และการสึกหรอของผิวเคลือบอีกด้วย โดยเนื้อหาจะรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทบทวนเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับผิวพ่นเคลือบด้วยความร้อนนาโนคอมโพสิต

ปัจจุบันวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในหลายแขนง ทั้งทางด้านการแพทย์ ทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านวิทยาศาสตร์ เนื่องจากวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนจะมีสมบัติด้านต่างๆ ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีโครงสร้างระดับไมโครเมตร เช่น สมบัติทางกล ทางความร้อน ทางไฟฟ้า ทางแม่เหล็ก เป็นต้น กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับผงพ่น และผิวเคลือบที่มีโครงสร้างนาโนมาพอสมควร ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตอะลูมิเนียมเป็นฐานหลักเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (hypereutectic aluminum-based) กับอะลูมินาที่มีขนาดนาโนที่เสริมแรงบนชั้นสเตรทของอะลูมิเนียม 6061 (6061Al) ถูกศึกษาโดย A. Agarwal และคณะ [14] โดยทำการเตรียมผิวเคลือบจากการผสมผงอะลูมิเนียมเกรดไฮเปอร์ยูเทคติกขนาด 50–100 ไมครอน กับอะลูมินาขนาด 30–60 นาโนเมตร ในปริมาณ 20 และ 30 wt% จากนั้นนำไปทำการพ่นเคลือบแบบพลาสมา ผลการศึกษา พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบไม่ปรากฏรอยแตกขนาดเล็กๆ มีความพรุน และมีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชั้นสเตรทดี ดังรูป 2.1 ผิวเคลือบที่มีปริมาณอะลูมินา 30% มีความพรุนน้อยกว่าเนื่องจากการไหล (flowability) ของผงต่ำเพราะมีปริมาณผงอะลูมินามาก นอกจากนี้ พบว่า ผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตมีความแข็งดีกว่าชั้นสเตรท 6061Al เนื่องจากมีอนุภาคแข็งของอะลูมินาอยู่ในผิวเคลือบ การที่มีอนุภาคอะลูมินาที่ทั้งแข็งและเปราะส่งผลให้พฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบดีด้วย ดังตาราง 2.1

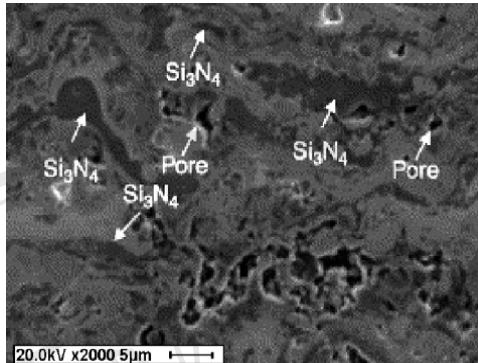


รูป 2.1 ภาพถ่าย OM ของผิวเคลือบพลาสติกที่มีอะลูมิเนียมเป็นหลักกับอะลูมินา (a) 20wt% และ (b) 30wt% บน 6061Al [14]

ตาราง 2.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางโทรโบลิจิของผิวเคลือบอะลูมิเนียม-อะลูมินาคอมโพสิตและซึบสเตรท [14]

Coating features	Al + 20 wt.% alumina	Al + 30 wt.% alumina	6061Al substrate
Coating thickness	180 ± 20 μm	120 ± 20 μm	N/A
Density (theoretical, g cm ⁻³)	2.77	2.88	2.7
Density (water immersion, g cm ⁻³)	2.67	2.70	N/A
Volume percent (reinforcement)	16.5 (black phase)	17.1 (black phase)	N/A
Microhardness (VHN)	233 ± 12	241 ± 15	85 ± 10
Wear (weight loss in 10 min, g)	0.011	0.010	0.015
Coefficient of friction	0.36	0.36	0.50

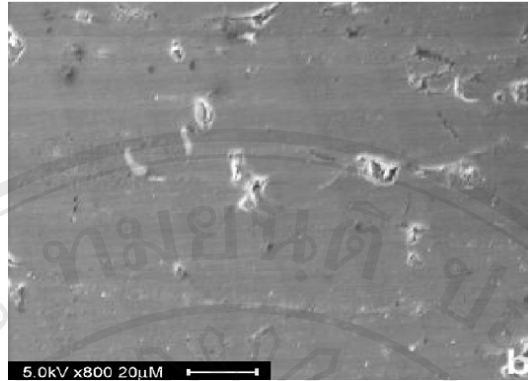
ในปี ค.ศ. 2005 S.J. Hong และคณะ [15] ได้เตรียมผิวเคลือบ $\text{MoSi}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ คอมโพสิต โดยนำ MoSi_2 ขนาด 20 ไมครอน ปริมาณ 50 wt%, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{MoSi}_2$ ขนาด 50–100 นาโนเมตร ปริมาณ 50 wt% และ 4 wt% ของอนุภาคผง SiC ผสมกันโดยการบดย่อยด้วยลูกบอล จากนั้นนำผงไปการพ่นเคลือบแบบพลาสมาในระบบสุญญากาศ (vacuum plasma spraying) ภาพถ่ายภาคตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตมีความหนาและอัดตัวกันแน่น ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของผิวเคลือบ คือ ประมาณ 90% (ดังรูป 2.2) ผิวเคลือบมีความสม่ำเสมอของ Si_3N_4 (สีเทาเม็ด), MoSi_2 (สีเทาสว่าง) และรูพรุน (สีดำ)



รูป 2.2 ภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต $\text{MoSi}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ [15]

ในปี ค.ศ. 2006 X. Qi และคณะ [16] ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบที่มีโครงสร้างนาโนซึ่งมีองค์ประกอบ คือ $(\text{Ti},\text{Mo})(\text{C},\text{N})\text{-}45\text{ vol}\%$ NiCo ซึ่งเตรียมโดยการนำผง $(\text{Ti},\text{Mo})(\text{C},\text{N})$, Ni และ Co ไปบดย่อยด้วยลูกบอลพลังงานสูง แล้วนำไปทำการพ่นเคลือบด้วยพลาสมาในบรรยากาศความดันต่ำ และเตรียมด้วยการพ่นเคลือบแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง พบว่า ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สของผิวเคลือบนาโนเมตรที่เตรียมด้วยการพ่นทั้งสองแบบจะมีค่าสูงกว่าผิวเคลือบไมโครเมตร ในปีเดียวกัน H. Li และคณะ [17] ได้ศึกษาโครงสร้างและศึกษาสมบัติของผิวเคลือบนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (nSD-HA) โดยได้ทำการเตรียมผิวเคลือบนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปทำให้เป็นอนุภาคนาโนโดยการทำให้แห้งแบบละออง (spray drying) จากนั้นนำไปทำการพ่นเคลือบลงบน Ti-6Al-4V ด้วยการพ่นเคลือบแบบแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูงและแบบพลาสมา พบว่า ผิวเคลือบนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ทำการพ่นเคลือบแบบแรกมีค่ามอดุลัสของยังสูงขึ้นเมื่อขนาดของผงพ่นมีขนาดเล็ก ซึ่งค่ามอดุลัสของยังจะสูงขึ้นถึง 60.11 GPa

V. Viswanathan และคณะ [18] ศึกษาทำการเตรียมผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตอะลูมินาที่เสริมแรงด้วยนิกเกิลขนาดนาโน โดยทำการพ่นเคลือบแบบพลาสมาในระบอบอากาศ (air plasma spraying) ภาคตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบมีความแน่นตัว 96-98% และไม่มีรอยแตกและรูพรุน ดังรูป 2.3 ความแข็งของผิวเคลือบที่วัดได้ประมาณ 1025 HV ซึ่งสูงกว่าอะลูมินา (940 ± 20 HV) นอกจากนี้ผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตยังมีค่าความต้านทานต่อการแตกหัก (ประมาณ $5\text{ MPam}^{1/2}$) ดีขึ้นเมื่อเทียบกับผิวเคลือบคอมโพสิต $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ ที่เตรียมด้วยการขึ้นรูปแบบกดอัดร้อน (ประมาณ $3.5\text{ MPam}^{1/2}$)



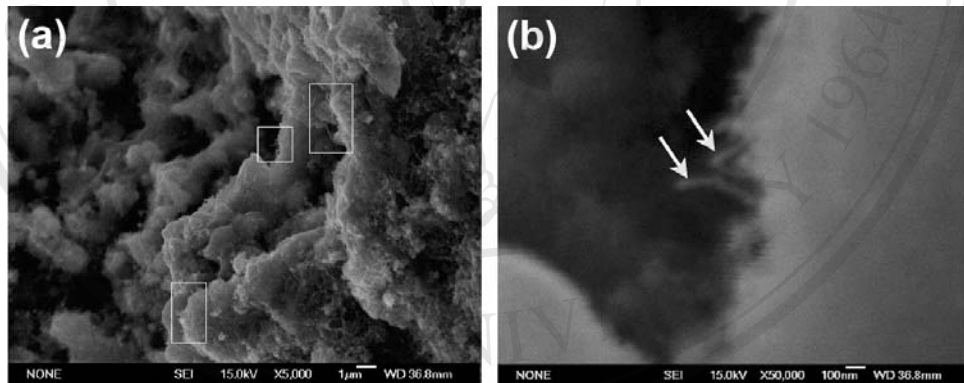
รูป 2.3 ภาพตัดขวางของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ ที่มีโครงสร้างที่แน่นตัว [18]

ปี ค.ศ. 2007 J.H. Kim และคณะ [19] ได้ศึกษาความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) นาโนคอมโพสิตที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง พบว่า ค่าต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูมีค่าเพิ่มมากขึ้นประมาณ 45% และค่าความแข็งจุลภาคเฉลี่ยมีค่าสูงถึงประมาณ 1580 VHN เมื่อเทียบกับผิวเคลือบที่พ่นด้วยผงที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์ และในปีเดียวกันนี้ A. Ibrahim และคณะ [20] ทำการศึกษาความล้าและสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และผิวเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บริสุทธิ์ ซึ่งใช้การพ่นเคลือบด้วยพลาสมาในระบบบรรยากาศปกติ และการพ่นเคลือบแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูงในการพ่นเคลือบลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) พบว่า ผิวเคลือบ TiO_2 มีค่าความต้านทานต่อการล้าสูงกว่าผิวเคลือบ TiO_2 ทั่วไป นอกจากนี้ค่าความต้านทานการขยายตัวของรอยแตกของผิวเคลือบ TiO_2 ที่ทำการเตรียมด้วยการพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูงเท่ากับ $28.4 \pm 1.4 \text{ MPam}^{1/2}$ ค่าความต้านทานการขยายตัวของรอยแตกของเคลือบ TiO_2 ที่ถูกเตรียมด้วยการพ่นแบบเดียวกัน ($17.4 \pm 3.4 \text{ MPam}^{1/2}$) และสูงกว่าผิวเคลือบ TiO_2 ที่เตรียมด้วยการพ่นเคลือบด้วยพลาสมาในบรรยากาศปกติ ($14.8 \pm 1.6 \text{ MPam}^{1/2}$) อีกทั้ง พบว่า ค่าความยืดหยุ่นมอดุลัสของผิวเคลือบ TiO_2 มีค่าสูงกว่าความยืดหยุ่นมอดุลัสของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่ทำการพ่นเคลือบถึง 23%

ตั้งแต่ S. Iijima ได้ค้นพบท่อนาโนคาร์บอน ในปี ค.ศ 1991 [21] ท่อนาโนคาร์บอนได้นำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ตัวกลางเก็บไฮโดรเจนความจุสูง (high-capacity hydrogen storage media) โพรบวัดปลายแหลมสำหรับกล้องจุลทรรศน์ทะลุวง

กวาด (tips for scanning probe microscopy) [22] นอกจากนี้ที่อนุภาคนาโนคาร์บอนยังใช้เป็นตัวเสริมแรงในเซรามิก [23, 24] พอลิเมอร์ [25, 26] และโลหะ เช่น ทองแดง [27]

ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนก็นำเอาอนุภาคนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวช่วยเสริมแรงผิวเคลือบเพื่อปรับปรุงสมบัติของผิวเคลือบให้ดีขึ้น ยกตัวอย่างงานวิจัยที่นำอนุภาคนาโนคาร์บอนมาช่วยเสริมแรงในผิวเคลือบ ได้แก่ T. Laha และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาผิวเคลือบคอมโพสิตอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนคาร์บอน ซึ่งผิวเคลือบถูกเตรียมด้วยการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา โดยการผสมผงอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Al-Si) กับอนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วทำการพ่นเคลือบแบบพลาสมาลงบนแท่งอะลูมิเนียมชนิด 6061 (6061 Al mandrel) จากการทดลอง พบว่า ผิวเคลือบ Al-Si ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนคาร์บอนมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของ Al-Si และมีค่าความแข็งสูงขึ้น (146 ± 10 VHN) กว่าผิวเคลือบที่ไม่เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนคาร์บอน (85 ± 10 VHN) ดังตาราง 2.2

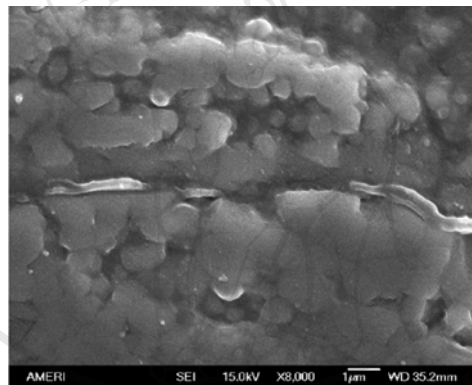


รูป 2.4 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกของผิวเคลือบ Al-Si กับ CNT (a) กำลังขยายต่ำ และ (b) กำลังขยายสูง [11]

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับความแข็งจุลภาคของผิวเคลือบคอมโพสิต Al-10wt%CNT และแท่ง 6061 Al [11]

Different materials	Theoretical density (g/cm^3)	Measured density (g/cm^3)	Microhardness (VHN)
6061 Al (mandrel)	2.69	N/A	85 ± 10
Al-CNT composite	2.37–2.43	2.59	146 ± 10

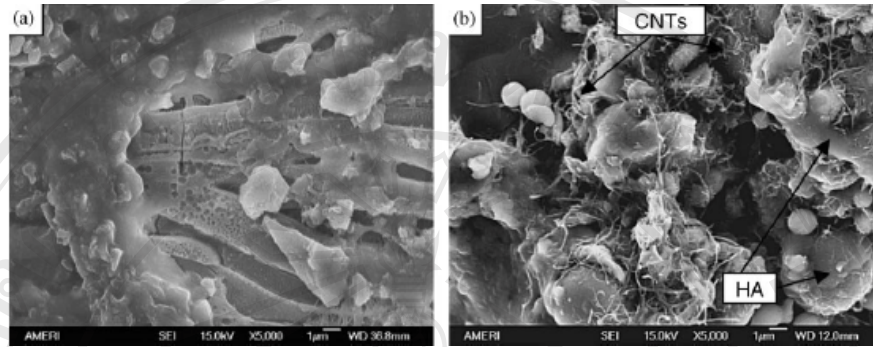
ในปี ค.ศ. 2006 K. Balani และคณะ [28] ทำการเตรียมผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตอะลูมินา-ท่อนาโนคาร์บอน (Al_2O_3 -CNT) โดยการพ่นเคลือบแบบพลาสมาในระบบอากาศ (air plasma spraying) ของผงผสมของ Al_2O_3 ขนาดนาโน (5–60 ไมครอน) และท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWCNT) 4 wt% (ความบริสุทธิ์ 95%, ขนาด 40–70 นาโนเมตร) จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคภาคตัดขวาง ดังรูป 2.5 สามารถยืนยันได้ว่า CNT ยังคงอยู่ในผิวเคลือบซึ่งอยู่ระหว่างอนุภาคแผ่นของ Al_2O_3 ที่เกาะกลุ่มกัน เมื่อศึกษาความแข็งของผิวเคลือบ Al_2O_3 -MWCNT (563.4–575.7 VHN) มีค่าไม่แตกต่างกันมากกับความแข็งของผิวเคลือบ Al_2O_3 (578.2–584.2 VHN) อย่างไรก็ตามผิวเคลือบที่เสริมแรงด้วย CNT (2.62 – $4.73 \text{ MPa m}^{1/2}$) สามารถปรับปรุงค่าความต้านทานการแตกหักของผิวเคลือบได้เมื่อเทียบกับผิวที่ไม่ได้เสริมแรงด้วย CNT (2.53 – $3.29 \text{ MPa m}^{1/2}$)



รูป 2.5 ผิวเคลือบนาโนคอมโพสิต Al_2O_3 -4wt% MWCNT [28]

ในปีต่อมา K. Balani และคณะ [12] ยังได้ศึกษาผิวเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทท์ (HA) ที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนด้วยการพ่นเคลือบแบบพลาสมา ผิวเคลือบที่เตรียมได้มาจากการนำผง HA ที่มีขนาด 10–50 ไมครอน ผสมกับ 4wt% ของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นขนาด 40–70 นาโนเมตร ยาวประมาณ 0.5–0.2 ไมครอน ด้วยการบดย่อย (jar mill) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำไปพ่นเคลือบแบบพลาสมาโดยใช้ Ti-6Al-4V เป็นซับสเตรท จากผลการทดลองพบว่า ทั้งผิวเคลือบ HA และ HA-CNT มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อศึกษาบริเวณพื้นผิวของผิวเคลือบพบ CNT ยังคงอยู่บริเวณพื้นผิวของผิวเคลือบ HA-CNT ดังรูป 2.6 จากการศึกษาผลของ CNT ที่มีต่อความเป็นผลึกของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า ผิวเคลือบ HA มีความเป็นผลึก 53.7% และผิวเคลือบ HA-CNT มีความเป็นผลึกสูงขึ้นถึง 80.4% และจากการศึกษาความต้านทานต่อการแตกหัก พบว่า ผิวเคลือบ HA-CNT มีค่าความต้านทาน

การแตกหักเท่ากับ $0.61 \pm 0.09 \text{ MPa m}^{1/2}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 56% จากผิวเคลือบ HA ($0.39 \pm 0.09 \text{ MPa m}^{1/2}$)



รูป 2.6 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวของผิวเคลือบ (a) HA และ (b) HA-4wt% CNT [12]

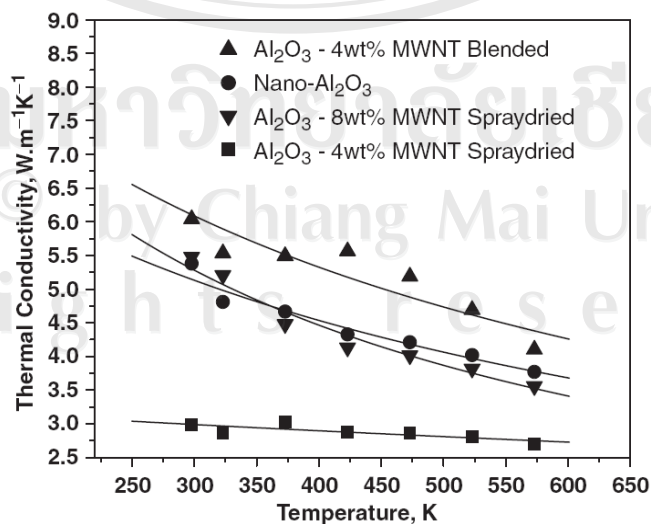
นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมทางโทรโบลยี พบว่า ผิวเคลือบ HA-CNT มีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าผิวเคลือบ HA ด้วย และในปี ค.ศ. K. Balani และคณะ [13] ศึกษาการสึกหรอหลายระดับ (multiscale wear) ของผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตอะลูมินาที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้การพ่นเคลือบแบบพลาสมาในการเตรียมผิวเคลือบ งานวิจัยนี้ศึกษาผิวเคลือบ 4 ชนิด คือ (1) ผิวเคลือบ A-SD (0 wt% CNT) (2) A4C-B (Al_2O_3 -4wt% CNTs เกาะกลุ่มในเมทริกซ์) (3) A4C-SD (Al_2O_3 -4wt% CNTs) (4) A8C-SD (Al_2O_3 -8wt% CNTs กระจายตัวในเมทริกซ์) จากการทดลอง พบว่า ผิวเคลือบมีความหนาแน่นมากกว่า 87% ดังตาราง 2.3 โดยผิวเคลือบ A8C-SD มีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมา คือ A4C-SD (90.2%), A4C-B (87.2%) และ A-SD (87%) ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า เมื่อเติม CNT ผิวเคลือบมีค่าความต้านทานการแตกหัก ($5.04 \text{ MPa m}^{1/2}$) เมื่อศึกษาอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ (ตาราง 2.4) พบว่า สามารถปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอได้มากกว่า 49 เท่า สำหรับผิวเคลือบ A8C-SD สำหรับผิวเคลือบ A4C-B และ A4C-SD มีค่าความต้านทานการสึกหรอเท่ากับ 3.8 และ 5.1 เท่า ตามลำดับ ตาราง 2.3 ลักษณะเฉพาะโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ HA-CNT [12]

Coating	Fully melted (FM) region (%)	Partially melted (PM) region (%)	Porosity (%)	Water immersion density (%)	Hardness, H (GPa)	Fracture toughness, K ($\text{MPa m}^{1/2}$)
A-SD	80.9	15.9	3.2	87.0	7.00 ± 0.15	3.22 ± 0.22
A4C-B	82.1	12.1	5.8	87.2	6.95 ± 0.08	3.86 ± 0.16
A4C-SD	71.4	24.7	3.9	90.2	7.24 ± 0.13	4.60 ± 0.27
A8C-SD	52.6	46.3	1.1	94.0	6.98 ± 0.02	5.04 ± 0.58

ตาราง 2.4 อัตราการสึกหรอระดับมหภาค (ในรูปของการสูญเสียปริมาตร) ของผิวเคลือบแบบพลาสติก [12]

Coatings	A-SD	A4C-B	A4C-SD	A8C-SD
Wear rate (vol. loss $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} \text{rev}^{-1}$)	0.022036	0.005751	0.004344	0.000446
Wear-resistance improvement	1	3.8 times	5.1 times	49.4 times

จากงานวิจัยของ T. Laha และคณะ และงานวิจัยของ K. Balani และคณะ จะเห็นได้ว่า ท่อนาโนคาร์บอนสามารถช่วยปรับปรุงผิวเคลือบให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผิวเคลือบที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนเพื่อทำให้ผิวเคลือบมีสมบัติด้านการนำความร้อนของผิวเคลือบโดย S.R. Bakshi และคณะ [29] ทำการศึกษาผิวเคลือบอะลูมินา-ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Al_2O_3 -MWNT) ที่เตรียมจากการพ่นเคลือบแบบพลาสติก โดยใช้ผง 4 ชนิด ที่นำมาเตรียมผิวเคลือบ คือ (1) ผงนาโนอะลูมินาที่เตรียมด้วยการพ่นให้เป็นละอองฝอย (nano- Al_2O_3) (2) ผงนาโนอะลูมินาที่ทำการเตรียมด้วยการพ่นให้เป็นละอองฝอยผสมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 4wt% (Al_2O_3 -4wt% MWNT blended) (3) ผงนาโนอะลูมินาที่เตรียมด้วยการพ่นให้เป็นละอองฝอยผสมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 4wt% (Al_2O_3 -4wt% MWNT spray dried) และ (4) ผงนาโนอะลูมินาที่เตรียมด้วยการพ่นให้เป็นละอองฝอยผสมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 8wt% (Al_2O_3 -8wt% MWNT spray dried) จากผลการทดสอบสภาพแพร่ทางความร้อน (thermal diffusivity) พบว่า Al_2O_3 -4wt% MWNT blended มีสภาพแพร่ทางความร้อนสูงสุด ในขณะที่ Al_2O_3 -4wt% MWNT spray dried มีสภาพนำความร้อนต่ำที่สุด แสดงดังรูป 2.7



รูป 2.7 กราฟการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนกับอุณหภูมิ [29]

จากงานวิจัยดังกล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของผิวเคลือบให้ดีขึ้นกว่าผิวเคลือบคอมโพสิต ทั้งสมบัติเชิงกล (ความแข็ง ความต้านทานต่อการแตกหัก การสึกหรอ เป็นต้น) และสมบัติเชิงความร้อน ดังนั้นการทำให้ผิวเคลือบเป็นผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของผิวเคลือบได้

2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steels) มักจะถูกเลือกใช้ในงานวิศวกรรม เนื่องจากมีสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในทุกสภาวะ การที่เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีเพราะมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่จำนวนมาก เหล็กกล้าไร้สนิมจะไร้สนิมได้จะต้องมีปริมาณโครเมียมอยู่อย่างน้อย 12 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมเหล่านี้จะเกิดเป็นโลหะออกไซด์ที่ผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะผสมเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ชั้นที่ผิวได้นั้น เหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องถูกวางอยู่ในสภาวะที่มีสารออกซิไดส์ [30] เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (ferritic stainless steel) เป็นโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม ซึ่งประกอบด้วยโครเมียม 12-30 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่าเฟอร์ริติก เพราะโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบเฟอร์ริติก (BCC, α iron) หลังจากที่ผ่านมากรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากโครเมียมจะมีโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ (BCC) เช่นเดียวกับ α ferrite บริเวณเฟสของ α จึงกว้างขึ้นและบริเวณเฟสของ γ จะแคบลง เกิด " γ loop" ขึ้นในเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม และแบ่งเฟสไดอะแกรมออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณโครงสร้างลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (FCC) และบริเวณโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีปริมาณโครเมียมมากกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ไปเป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์แต่จะเกิดสารละลายของแข็งโครเมียมในเฟสของ α ของเหล็ก

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (martensitic stainless steel) เป็นโลหะผสม Fe-Cr ที่มีปริมาณโครเมียมอยู่ 12-17 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณคาร์บอนพอประมาณ (0.15-1.0% C) ที่จะ

ทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคได้หลังจากผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลัน จากบริเวณเฟสของออสเทนนิคเหล็กกล้าชนิดนี้ถูกเรียกว่ามาร์เทนซิติค เพราะสามารถทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคได้หลังจากผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคนี้ถูกปรับปรุงให้มีความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค

การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค โดยกรรมวิธีทางความร้อนจะเหมือนกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนอย่างเดียว (plain-carbon) และชนิดที่มีธาตุอื่นผสมอยู่น้อย (low-alloy) กล่าวคือ โลหะผสมจะถูกอบให้เป็นออสเทนไนต์ (austenitized) และถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนได้โครงสร้างมาร์เทนซิติค ต่อจากนั้นจึงนำไปทำกระบวนการอบคืนตัว (tempering) เพื่อลดแรงเค้นและเพิ่มความแข็งแรง เนื่องจากโลหะผสม Fe-Cr ที่มีโครเมียม 12-17 เปอร์เซ็นต์ จะมีความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) ที่สูง ดังนั้นจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลันด้วยน้ำ เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคและสามารถใช้อัตราการเย็นตัวช้าลงได้

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค (austenitic stainless steel) เป็นโลหะที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ชนิดคือ เหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล โดยจะมีโครเมียมอยู่ 16-25 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิล 7-20 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสมชนิดนี้ถูกเรียกว่า ออสเทนนิค เพราะโครงสร้างภายในประกอบด้วยเฟสของออสเทนนิค (FCC, เหล็ก γ) ในช่วงอุณหภูมิที่ดำเนินการกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากนิกเกิลมีโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ จึงทำให้โครงสร้างทั้งหมดโดยรวมยังคงเป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมพรีซีพิตีชันฮาร์ดเดนนิง

เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีทั้งโครเมียมและนิกเกิลอยู่คล้ายกับกลุ่มออสเทนนิค นอกจากนี้ยังผสมด้วยธาตุอื่น เช่น อะลูมิเนียมและไททาเนียม ฯลฯ เพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กโดยให้เกิดการแยกเฟสโดยกรรมวิธีทางความร้อนได้ สมบัติเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ คือ ถ้าเผาให้อุณหภูมิสูงขึ้น เหล็กจะไม่แข็งแต่เหนียวมาก ทำให้สามารถแปรรูปทางกลได้มากจนได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นก็ทำกรรมวิธีทางความร้อนต่อเพื่อให้เหล็กมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวตามที่ต้องการ [31]

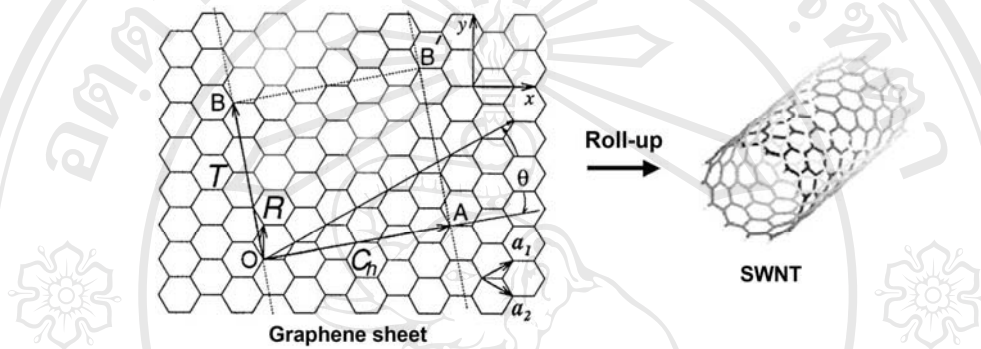
ตาราง 2.5 สมบัติทางกายภาพบางประการของเหล็กกล้าไร้สนิม 431 [32]

ความหนาแน่น	7750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ค่าความต้านทานไฟฟ้า	720 นาโนโอห์มเมตร
สภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส)	20.2 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน
มอดูลัสความยืดหยุ่น	200 จิกะปาสคาล
ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (ที่อุณหภูมิ 0-315 องศาเซลเซียส)	12.1 ไมโครเมตรต่อเมตร องศาเซลเซียส
ค่าความจุความร้อน (ที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส)	460 จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน
ความต้านทานแรงดึง (อบอ่อนที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส)	1295 เมกกะปาสคาล
ความแข็งแรง ณ จุดคราก (อบอ่อนที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส)	1035 เมกกะปาสคาล
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (อบอ่อนที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส)	19% ใน 50 มิลลิเมตร
ความแข็งแบบบริเนล (อบอ่อนที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส)	375 ฮาร์ดเนสบริเนล (HB)

2.3 ท่อนาโนคาร์บอน

2.3.1 ลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอน

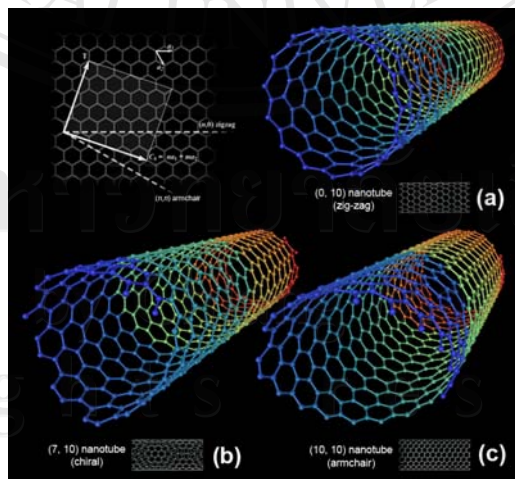
ท่อนาโนคาร์บอนถูกค้นพบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ ชื่อ Sumio Iijima [21] ภายหลังจากค้นพบฟูลเลอร์รีน (Fullerene) 6 ปี โดยท่อนาโนประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างจากอะตอมของคาร์บอน โดยโครงสร้างแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยม คือ มีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม



รูป 2.8 ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน [33]

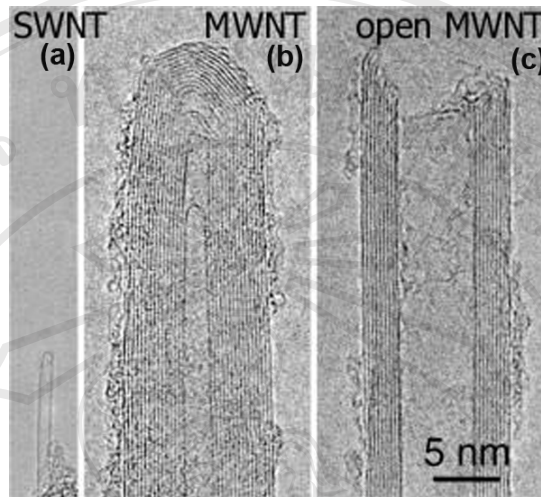
โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (single-walled nanotubes; SWNTs) มี 3 รูปแบบ คือ แบบ Armchair แบบ Zig-zag และแบบ Chiral แสดงดังรูป 2.9



รูป 2.9 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (a) แบบ Armchair, (b) แบบ Zig-zag และ (c) แบบ Chiral [34]

2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multiple-walled nanotubes; MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันอยู่หลายชั้น ดังรูป 2.10



รูป 2.10 ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (a) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (b) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อปลายปิด และ (c) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อปลายเปิด [35]

สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนมีราคาสูงมากเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ไฟฟ้า และความร้อนที่ดีมาก ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวิธีสังเคราะห์ ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน (SWNT และ MWNT) เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะโครงสร้างของท่อนาโน เช่น ลวดลายตามผนังของท่อ เป็นต้น สมบัติโดยทั่วไปของท่อนาโนคาร์บอน มีดังต่อไปนี้

1) สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (SWNTs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 และ 2 นาโนเมตร ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWNTs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในช่วง 10–300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34–0.36 นาโนเมตร ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปอยู่ในช่วงไมโครเมตรทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ในงานบางอย่างได้โดยตรง ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33–1.40 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ

อะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active carbon) ถึง 2 เท่า

2) สมบัติเชิงกล

เนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงกว่าเพชรและแกรไฟต์ กล่าวคือ มีค่าความยืดหยุ่นหรือค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) สูงถึง 1 เทระปาสคาล (TPa) และมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงถึง 200 จิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าอัลลอยที่มีค่าเพียง 2 จิกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ท่อชนิดผนังชั้นเดียวยังสามารถถูกดัดยัดได้ถึง 10–13 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะขาดอีก [36]

3) สมบัติทางไฟฟ้า

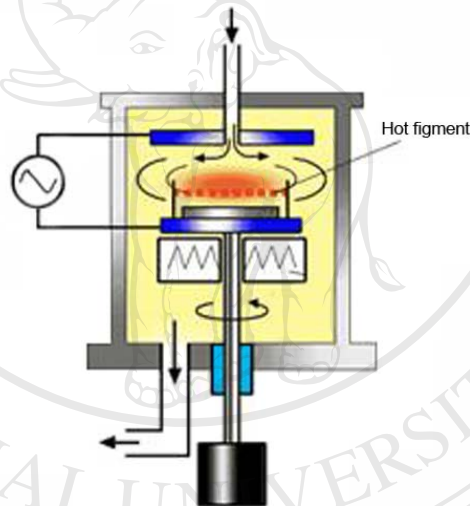
ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำไฟฟ้าทุกชนิดและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดในบางสภาวะได้ด้วย ซึ่งท่อนาโน 1 มัด สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเพียงแค่ 106 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนซิลิกอนได้ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ เช่น การที่ท่อนาโนมีผลวดหลายผนังท่อที่ต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของท่อนาโนต่างกัน โครงสร้างของท่อนาโนแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ขณะที่โครงสร้างแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนแบบ Chiral จะมีอยู่ระหว่างสองแบบแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการจัดเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (helicity or chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ (chiral angle) [36]

2.3.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมี

วิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition; CVD) เป็นวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยการให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้ คือ มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นเทคนิคนี้ต้องอาศัยโลหะตัวกระตุ้น (metal catalyst) เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 650–900 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาว

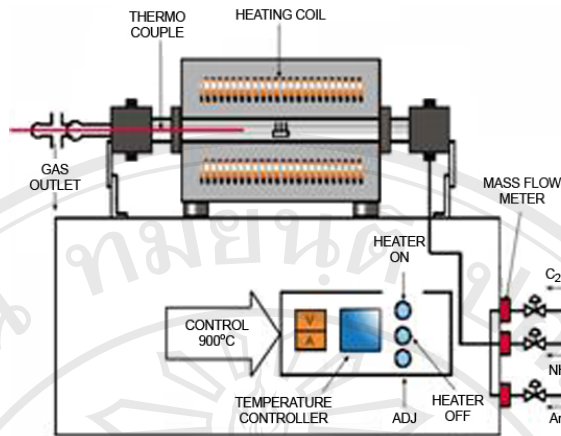
ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของตัวคะตะลิสต์ และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับ ทั้งนี้วิธีการนี้ต้องทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งวิธีการตกสะสมไอเคมีนี้มีหลายเทคนิคด้วยกันคือ

1) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา (plasma enhanced chemical vapor deposition; PCVD) โดยการให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น เกิดการแตกตัวและตกลงบนขั้วสเตรท เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนได ออกไซด์ และแก้ว โดยมีโลหะคะตะลิสต์ (metal catalyst) เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิว ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.11



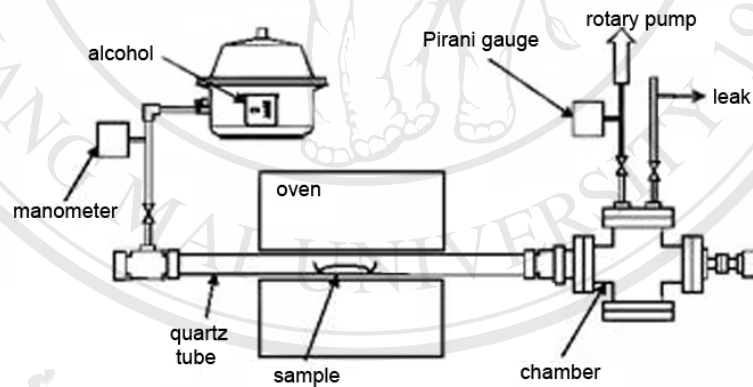
รูป 2.11 แผนภาพวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา [37]

2) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (thermal chemical vapor deposition; TCVD) เป็นเทคนิคที่ใช้เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดนี้เป็นตัวคะตะลิสต์ ให้ตกเคลือบบนขั้วสเตรท หลังจากนั้นนำขั้วสเตรทไปทำการกัดกรดด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือแก๊สแอมโมเนียเพื่อให้เกิดก้อนอะตอมของโลหะที่เรียกว่า “การเกิดใหม่” (nucleation) แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอน โดยนำไปใส่ในห้องเผาซึ่งใช้อุณหภูมิประมาณ 750–1050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน ดังรูป 2.12



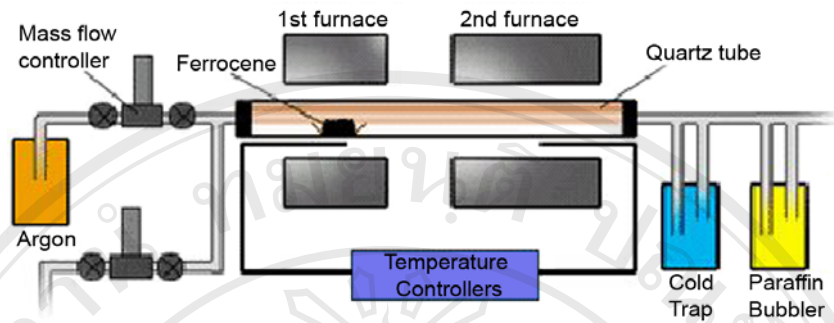
รูป 2.12 แผนภาพวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน [37]

3) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (alcohol catalytic chemical vapor deposition; ACVD) ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับโลหะตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก และ โคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังรูป 2.13



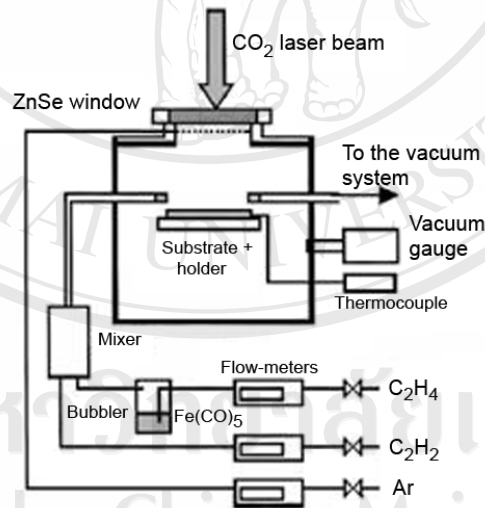
รูป 2.13 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [37]

4) เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก (vapor phase growth) เป็นการสังเคราะห์ที่อนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองเป็นสองส่วน โดยวางภาชนะใส่ผงโลหะคะตะลิสต์ในพื้นที่ส่วนแรกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นที่ส่วนที่สอง เมื่อปล่อยแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้ามาก็พาไอของคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาไปรวมตัวกันในพื้นที่ในส่วนที่สอง และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้นทั้งชนิดผนังชั้นเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 2.14



รูป 2.14 เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก [37]

5) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน (laser-assisted thermal chemical vapor deposition; LCVD) เป็นการใชแสงเลเซอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนและใช้โลหะคะตะลิสต์จากสารละลายเหล็กเพนตะคาร์บอนนิล $\text{Fe}(\text{CO})_5$ โดยไอระเหยของเหล็กจะผสมกับแก๊สไฮโดรคาร์บอนในห้องผสม แล้วถูกทำให้ร้อนด้วยแสงเลเซอร์ เกิดการก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.15

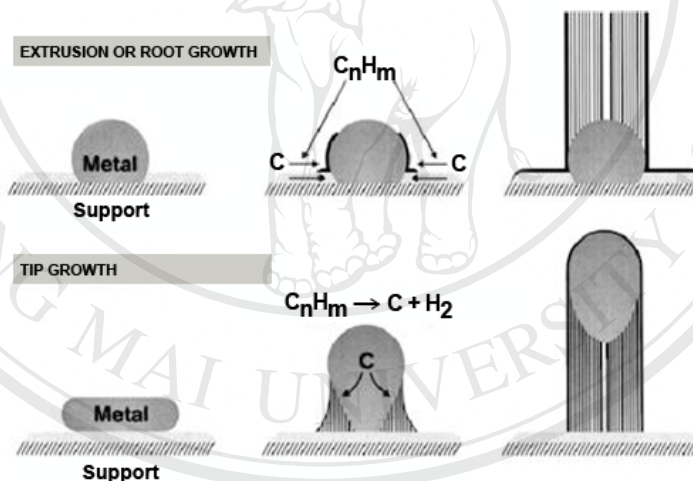


รูป 2.15 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน [37]

2.3.3 กลไกการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน

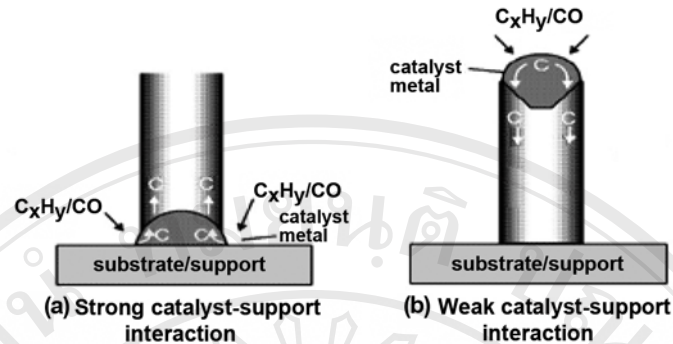
กลไกการสร้างของท่อนาโนคาร์บอนนี้ได้ถูกอธิบายไว้ด้วยหลายทฤษฎี แต่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สรุปอย่างชัดเจนถึงรายละเอียดที่แน่นอน แต่มีทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนได้ ดังรูป 2.16

แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นต้น สลายตัวได้อะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาค โลหะคะตะลิสต์ จากนั้นอะตอมคาร์บอนจะละลายเข้าสู่ผิวโลหะคะตะลิสต์ที่หลอม แล้วทำการแพร่ไปรวมกันและสะสมกันมากขึ้นจนเกิดการตกตะกอนที่ผิวนอกเป็น Fullerene dome และสร้างตัวเป็นท่อในที่สุด โดยรูปแบบการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Root growth และ Tip growth ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา (interaction) ของโลหะคะตะลิสต์กับซับสเตรท



รูป 2.16 ภาพจำลองขั้นตอนการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนแบบ Root growth และแบบ Tip growth [37]

ถ้าอันตรกิริยาของโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองรับแข็งแรง (strong substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ root growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านล่างของท่อแสดงดังรูป 2.17(a) ถ้าอันตรกิริยาของโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองรับอ่อน (weak substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ tip growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ (รูป 2.17(b))



รูป 2.17 ภาพจำลองอันตรกิริยาระหว่างฐานรองรับกับอนุภาคโลหะคะตะลิสต์ [38]

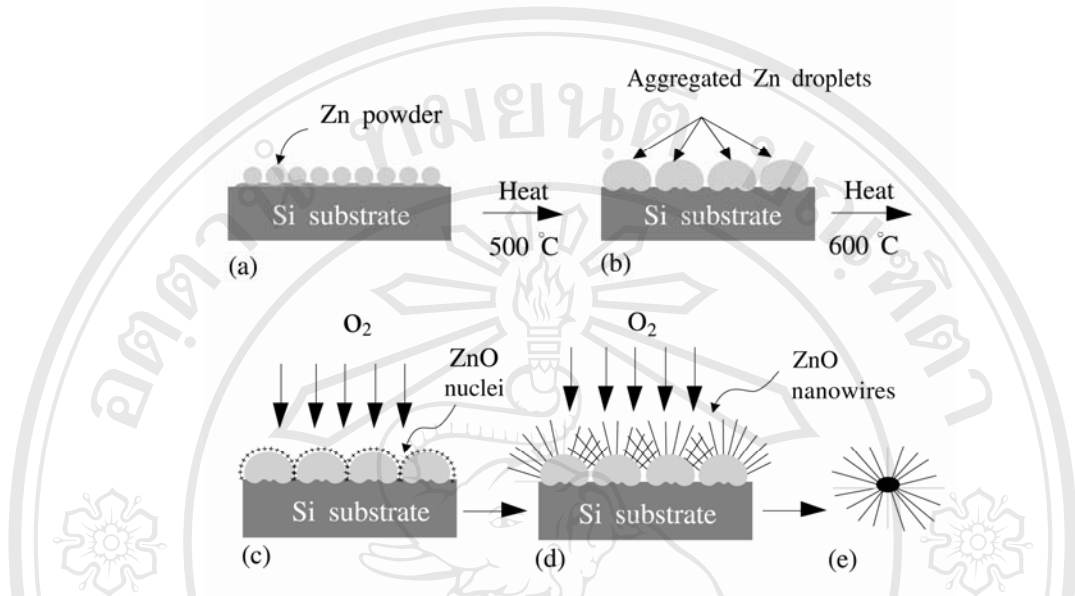
ความสมบูรณ์ผลึกของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของอนุภาคโลหะคะตะลิสต์ คุณสมบัติและองค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์ ดังนั้นการเตรียมอนุภาคคะตะลิสต์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถใช้ควบคุมขนาดของท่อนาโนคาร์บอนได้

2.4 การสังเคราะห์ผงเหล็กกล้าไร้สนิมนาโนวิสเกอร์ด้วยวิธีออกซิเดชัน

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนมีด้วยกันหลายวิธีรวมทั้งเทคนิคออกซิเดชัน ซึ่งถือว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ราคาถูกและง่ายในการเตรียม โดยหลักการอย่างง่าย คือ อาศัยอุณหภูมิสูงเพื่อทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศกลายเป็นสารประกอบออกไซด์

จากรายงานการวิจัยของ Sekar และคณะ [39] ที่ได้ทำการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์จากผงสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชัน และได้เสนอแบบจำลองแสดงกระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์ไว้ ดังรูป 2.18 เมื่อให้ความร้อนกับผงสังกะสีที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับซิลิกอน (Si) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ผงสังกะสีเริ่มหลอมรวมกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนขนาดไมโครเมตรบนพื้นผิวของแผ่นรองรับซิลิกอน หลังจากผ่านออกซิเจนให้เข้าไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับผิวของกระจุกหรือกลุ่มก้อนสังกะสีที่เกิดก่อนหน้า แล้วรวมตัวเป็นนิวคลีไอสังกะสีออกไซด์ (ZnO nuclei) ขนาดนาโนเมตรบนผิวของกระจุกหรือกลุ่มก้อนสังกะสี ซึ่งในกระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ เข้าช่วย และจะไม่เกิดโลหะผสมเหลวขึ้น โดยจะเกิดการรวมตัวกันของกระจุกสังกะสีและกลายเป็นการเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) แทน โดยที่แต่ละนิวคลีไอสังกะสีออกไซด์

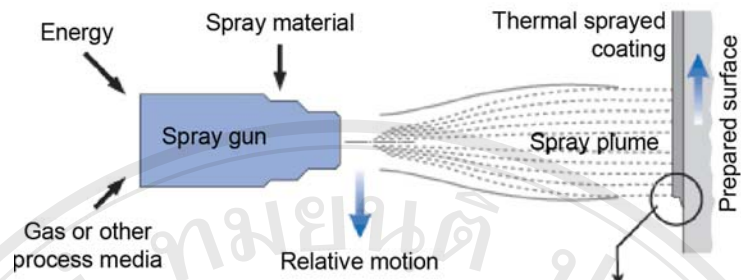
(ZnO nuclei) ที่เกิดขึ้นจะโตหรืองอก (growth) ต่อไปกลายเป็นเส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์ (ZnO nanowires) จนกว่าสังกะสีที่เป็นบ่อเกิดเส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์จะหมดไป



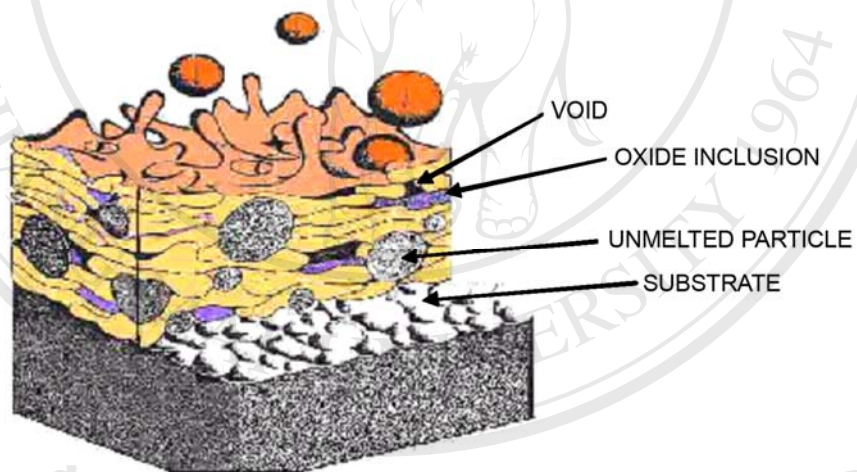
รูป 2.18 แบบจำลองกระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนสังกะสีออกไซด์ [39]

2.5 การพ่นเคลือบด้วยความร้อน

การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (thermal spraying) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ผลิตผิวเคลือบ (coating) โดยหลักการของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน คือ การหลอมวัสดุเคลือบ (coating materials) ให้อยู่ในสภาพหลอมเหลวหรือกึ่งหลอมเหลว แล้วพ่นด้วยแรงดันแก๊สให้ไปตกกระทบบนผิวชิ้นงานแสดงดังรูป 2.19 จากนั้นจึงเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วได้เป็นผิวเคลือบผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบด้วยความร้อน มีลักษณะเป็นแผ่นๆ ซ้อนทับกัน หรือที่เรียกว่า lamellar structure ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่หลอมเหลวหรือกึ่งหลอม เกิดการแผ่อกเมื่อตกกระทบที่ผิว การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคในผิวเคลือบ ส่วนใหญ่เกิดจากการเกาะเกี่ยวระหว่างกัน (interlocking) ของอนุภาคหลังการตกกระทบและเกิดการแข็งตัว ซึ่งจัดเป็นพันธะเชิงกล (mechanical bond) โดยโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบทั่วไปจะประกอบด้วย (ดังรูป 2.20) อนุภาคที่หลอมเหลวหรือกึ่งหลอม อนุภาคที่ไม่หลอม (unmelted particles) ชั้นออกไซด์ (oxide inclusions) และช่องว่าง (pores/voids) หรือที่เรียกว่า ความพรุน [1]



รูป 2.19 ไดอะแกรมการสร้างผิวเคลือบ [40]



รูป 2.20 ไดอะแกรมโครงสร้างของผิวเคลือบที่เกิดจากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน [41]

ข้อดีของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

- 1) สามารถเลือกวัสดุเคลือบได้หลายชนิด โดยที่วัสดุนั้นสามารถหลอมได้โดยไม่เกิดการสลายตัว (decompose) เมื่อได้รับความร้อน
- 2) เทคนิคหรือปืนพ่นสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิดตามสมบัติของผิวเคลือบที่ต้องการ
- 3) ชิ้นงานที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วสามารถนำกลับมาพ่นซ้ำได้อีกเมื่อถูกใช้งานจนมีขนาดหรือสมบัติเปลี่ยนไป

ข้อจำกัดของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

- 1) ชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนไม่สามารถพ่นได้ทั่วถึง เนื่องจากหัวของปืนพ่นเข้าไปไม่ถึงบริเวณซอกมุมหรือจุดอับ
- 2) เครื่องมือบางประการมีราคาแพงและมีต้นทุนของการพ่นค่อนข้างสูงทำให้ต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการใช้งาน

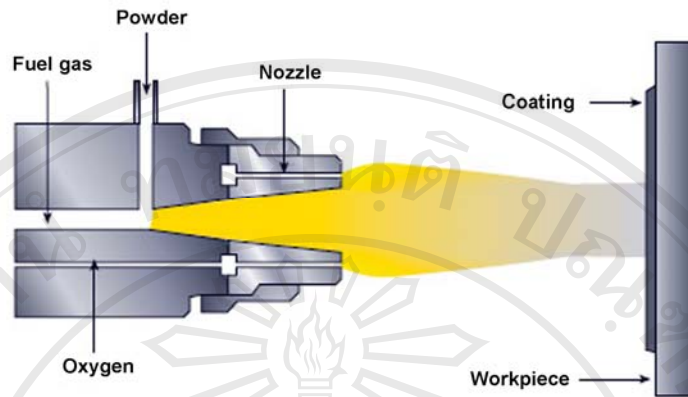
2.6 ประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ได้แก่ การพ่นแบบเปลวไฟ การพ่นแบบอาร์ค การพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง การพ่นแบบปืนจุดระเบิด การพ่นแบบพลาสมา

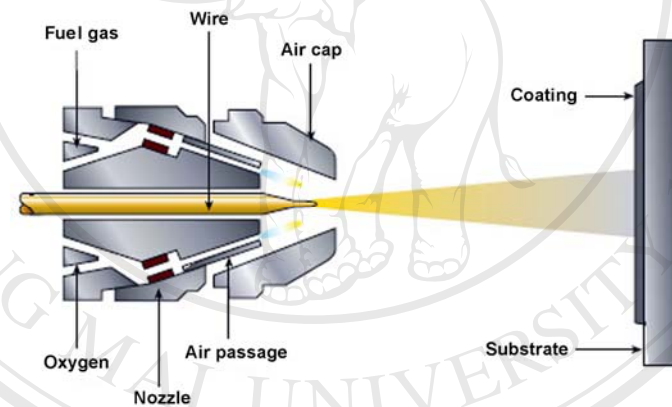
2.6.1 การพ่นแบบเปลวไฟ

การพ่นแบบเปลวไฟ (Flame Spraying; FS) ถือได้ว่าเป็นวิวัฒนาการเริ่มแรกสุดของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน โดยอาศัยแหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ (combustion) ระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงกับออกซิเจน การพ่นแบบเปลวไฟใช้ได้กับวัสดุเคลือบทั้งแบบ ผง แ่ง และแบบลวด แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้มีหลายชนิดตามคุณสมบัติของวัสดุเคลือบ ได้แก่ อะเซทิลีน (acetylene) โพรเพน (propane) เมทิลอะเซทิลีน-โพรพาไดอิน (methyl-acetylene-propadiene) และไฮโดรเจน (hydrogen) รูป 2.21-2.22 แสดงรูปปืนพ่นแบบเปลวไฟ

การพ่นแบบเปลวไฟถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่ให้ความเร็วของอนุภาคต่ำ เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาทีหลัง การพ่นแบบเปลวไฟในปัจจุบันจึงถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การพ่นแบบเชื้อเพลิงออกซิเจนความเร็วต่ำ (low velocity oxy-fuel spraying, LVOF) การพ่นแบบนี้เป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่ายกว่าเทคนิคอื่น ได้อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบสูง ลักษณะของผิวเคลือบที่ได้โดยทั่วไปมีความแข็งแรงพันธะต่ำ ความพรุนสูง เนื่องจากการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟให้อุณหภูมิไม่สูงมากอยู่ในช่วง 2000-3000 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ และไม่สามารถปรับอุณหภูมิของการพ่นได้มาก จึงใช้ได้กับวัสดุประเภทโลหะและอัลลอยที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเป็นส่วนใหญ่ เช่น Al Mo Cu และ Zn โดยใช้มากสำหรับงานด้านทานการกัดกร่อน ตัวอย่างอัลลอย เช่น นิกเกิลอัลลอย (Ni-base alloys) และบรอนส์อัลลอย (bronze alloys) และพอจะใช้ได้สำหรับวัสดุประเภทเซอรัม (cermet) บางกลุ่ม เช่น วัสดุผสมระหว่างคาร์ไบด์กับนิกเกิลอัลลอย สำหรับงานด้านทานการสึกหรอ แม้กระทั่งวัสดุประเภทเซรามิก เช่น Al_2O_3 , Cr_2O_3 ก็มีการใช้กับการพ่นแบบเปลวไฟได้ โดยมีทั้งแบบผงและแบบลวด



รูป 2.21 การพ่นเคลือบแบบเปลวไฟโดยใช้ผงเป็นวัสดุเคลือบ [40]



รูป 2.22 การพ่นเคลือบแบบเปลวไฟโดยใช้ลวดเป็นวัสดุเคลือบ [40]

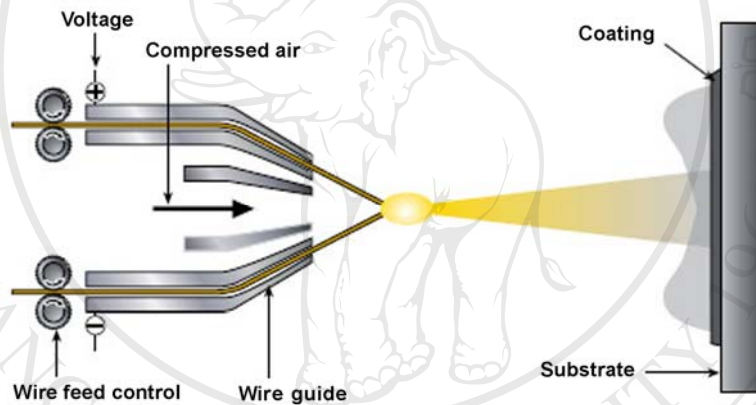
2.6.2 การพ่นแบบอาร์ค

การพ่นแบบอาร์ค (Arc Spraying; AS) เป็นการพ่นโดยใช้แหล่งความร้อนจากการอาร์คด้วยไฟฟ้าระหว่าง 2 ขั้ว โดยวัสดุเคลือบต้องอยู่ในรูปของเส้นลวดที่นำไฟฟ้าได้ ซึ่งอาจจะเป็นโลหะอัลลอยหรือเป็นเซรามิก ที่อยู่ในรูปของแกนลวด (cored-wire) คือ เป็นเส้นลวดที่มีเซรามิกอยู่ด้านใน ลวดที่ห่อหุ้มอาจเป็นโลหะหรืออัลลอย ซึ่งจะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าและเกิดการอาร์คได้

กระบวนการพ่นแบบอาร์คต่างจากเทคนิคอื่นๆ ตรงที่ไม่มีแหล่งความร้อนจากภายนอก เช่น เปลวไฟ หรือ เปลวพลาสมา ความร้อนและการหลอมเกิดขึ้นที่วัสดุเคลือบหรือเส้นลวดเองโดยเกิดขึ้นทันทีที่เส้นลวดสองเส้นซึ่งมีประจุตรงข้ามกันมาสัมผัสกันตรงปลายลวดที่เรียกว่า เกิดการ

อาร์ค อนุภาคที่หลอมตรงปลายลวดจะถูกผลักดันด้วยแก๊สที่มีความดันสูง ทำให้เกิดการแตกเป็นละออง พร้อมกับเคลื่อนที่ไปที่ชิ้นงานแล้วเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวเคลือบบนผิวชิ้นงานดังแผนภาพแสดงดังรูป 2.23

การพ่นแบบอาร์คมีข้อดีว่าการพ่นแบบใช้เปลวไฟหลายประการ เช่น ผิวเคลือบจากการพ่นแบบอาร์คจะมีความแข็งแรงพันธะสูงกว่า โดยทั่วไปมากกว่า 1000 psi ความร้อนสะสมที่ขีดสเตรทน้อยกว่าเพราะไม่มีเปลวไฟพุ่งไปที่ขีดสเตรท และโดยทั่วไปการพ่นแบบอาร์คมีต้นทุนการพ่นต่ำกว่า เนื่องจากไม่ต้องใช้แก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน ที่สำคัญและเหนือกว่าทุกระบบ คือ การพ่นแบบอาร์คให้อัตราการเคลือบ (deposition rate) สูง โดยมีอัตราการเคลือบสูงสุดได้ถึง 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับการพ่นวัสดุในกลุ่มนิกเกิลอัลลอย



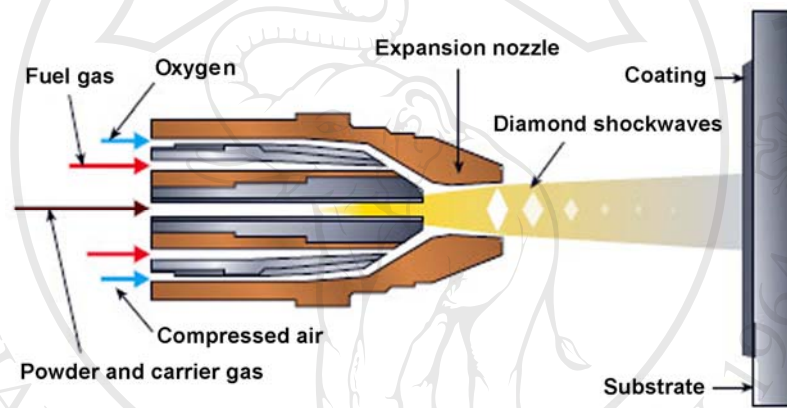
รูป 2.23 การพ่นเคลือบแบบอาร์ค [40]

2.6.3 การพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง

การพ่นแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง (High Velocity Oxy-Fuel Spraying; HVOF) เป็นเทคนิคที่พัฒนามาจากการพ่นแบบเปลวไฟซึ่งอาศัยแหล่งความร้อนจากการสันดาประหว่างแก๊สเชื้อเพลิงกับออกซิเจน สิ่งที่ต่างกันระหว่างการพ่นเคลือบทั้งสองแบบนี้ คือ การพ่นแบบเปลวไฟ (flame spraying) เกิดการเผาไหม้แบบภายนอกป็น หรือที่ปลายปืนในขณะที่การพ่นแบบ HVOF เกิดการเผาไหม้ภายในกระบอกปืน ตรงส่วนที่เรียกว่าห้องเผาไหม้ (combustion chamber) การออกแบบที่สำคัญอีกจุดหนึ่งของ HVOF คือ มีส่วนของหัวพ่น (nozzle) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเล็กและยาวต่อจากห้องเผาไหม้ ดังรูป 2.24 หัวพ่นนี้มีผลต่อความเร็วของอนุภาคมากเนื่องจากเมื่อแก๊สเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ จะเกิดความร้อนและขยายตัวเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในหัวพ่นซึ่งมีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความดันสูงในภาวะนี้จะทำให้แก๊สเคลื่อนที่

ด้วยความเร็วสูงมากที่เรียกว่า เร็วกว่าเสียง (supersonic) สำหรับการพ่นแบบ HVOF ผงอาจถูกป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ก่อนหรือเข้าไปที่หัวพ่นโดยตรงขึ้นกับการออกแบบ การที่หัวพ่นถูกออกแบบมาให้มีลักษณะยาว ผงจึงมีเวลาในการรับความร้อนขึ้นและเนื่องจากความดันที่สูงจึงทำให้อุณหภูมิมีความเร็วสูงถึง 800 เมตรต่อวินาที

แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับ HVOF ได้แก่ โพรเพน (propane) โพรพิลีน (propylene) เมทิลอะเซทิลีน-โพรพาไดอิน (MAPP) และไฮโดรเจน (hydrogen) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงเหลวได้ เช่น เคโรซีน (kerosene) หรือที่เรียกว่า น้ำมันก๊าด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ (oxidizer)



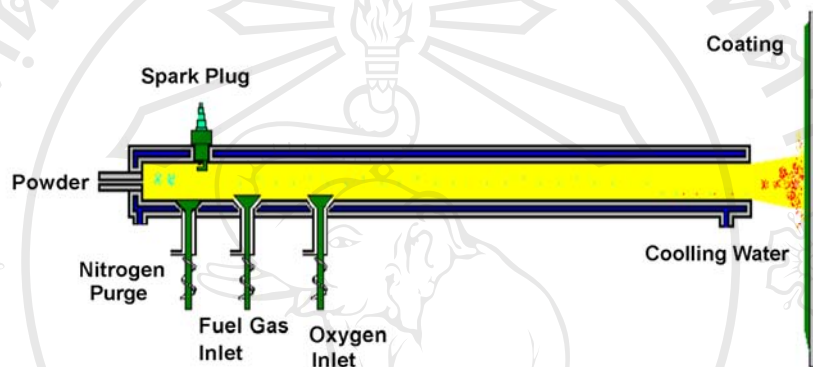
รูป 2.24 การพ่นเคลือบแบบเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง [40]

2.6.4 การพ่นแบบปืนจุดระเบิด

การพ่นแบบปืนจุดระเบิด (Detonation Gun™ Spraying; D-Gun™) เป็นรูปแบบการพ่นที่พัฒนามาจากการพ่นแบบเปลวไฟ โดยทำให้มีความเร็วของอนุภาคสูงขึ้น จากการระเบิดของแก๊สเชื้อเพลิงอะเซทิลีนที่สันดาปกับออกซิเจนด้วยการจุดระเบิดแบบเป็นจังหวะ ความแตกต่างที่ทำให้เกิดแรงดันสูงในปืน คือ การออกแบบให้ลักษณะเป็นกระบอกยาว (barrel) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร ดังรูป 2.25 เกิดการเผาไหม้แบบภายในกระบอก โดยเริ่มจากการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนเข้าไปในกระบอกจนมีความดันสูง มีลิ้นควบคุม (valve) การเปิด-ปิดแก๊สและการปล่อยผงเข้าไปในกระบอกเมื่อมีการจุดระเบิดแก๊สจะลุกไหม้และขยายตัวทำให้เกิดความร้อนและความดันสูงในกระบอก ผงที่ถูกส่งเข้ามาในกระบอกจะถูกทำให้หลอมพร้อมไปกับเคลื่อนที่ไปตามกระบอกด้วยความเร็วสูงถึงประมาณ 800 เมตรต่อวินาที หลังจากการระเบิด

แต่ละครั้งกระบอกจะถูกไล่ชำระ (purge) ด้วยแก๊สไนโตรเจน และกระบวนการจะเริ่มขึ้นใหม่เป็นจังหวะต่อไป โดยมีความถี่ของการระเบิดสูงถึง 10 ครั้งต่อวินาที

วิวัฒนาการขั้นต่อมาของปืนพ่นแบบจุดระเบิด คือ การปรับเปลี่ยนชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง และพารามิเตอร์ของการพ่น (เช่น ใช้ propane-butane) จะทำให้ได้ความเร็วของอนุภาคสูงขึ้นถึง 1000 เมตรต่อวินาที กลายเป็นปืนพ่นที่เรียก Super Detonation Gun หรือ Super D-Gun™ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Praxair Surface Technologies



รูป 2.25 การพ่นเคลือบแบบปืนจุดระเบิด [41]

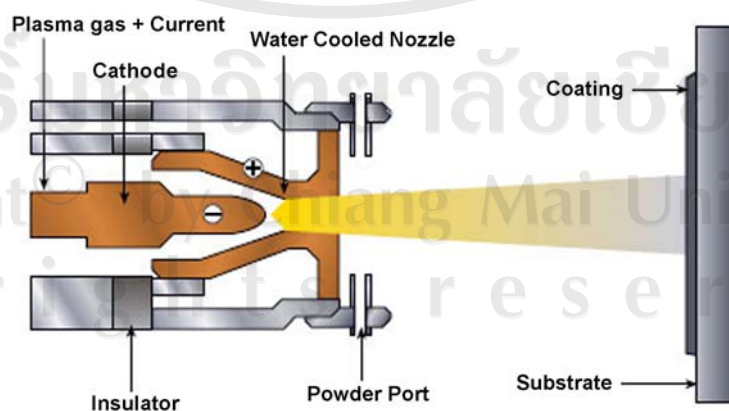
2.6.5 การพ่นแบบพลาสมา

การพ่นแบบพลาสมา (Plasma Spraying; PS) อาศัยความร้อนจากเปลวพลาสมา ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 12000 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสำหรับการพ่นวัสดุประเภทเซรามิก เนื่องจากเซรามิกส่วนใหญ่มีจุดหลอม เหลวสูง ความร้อนที่ได้จากพลาสมาเกิดจากการปล่อยแก๊ส Ar (อาร์กอน) หรือ Ar ผสมกับแก๊สอื่น เช่น $Ar+H_2$, $Ar+He$ และ $Ar+N_2$ ให้ไหลผ่านโปรอบๆ ขั้วคาโทด (ทังสเตน, W) และทะลุผ่านขั้วแอโนด (ทองแดง, Cu) โดยทั้งสองขั้วถูกหล่อเย็นด้วยน้ำ เมื่อการอาร์คไฟฟ้าเริ่มขึ้นที่ขั้วทั้งสอง โดยอาศัยการ discharge แบบความถี่สูงจากไฟกระแสตรง แก๊สจะเกิดการแตกตัว ซึ่งต่อมาจะมีความร้อนเกิดขึ้นทำให้แก๊สเกิดการขยายตัวกลายเป็นพลาสมาที่มีความดันและอุณหภูมิสูง เปลวพลาสมาที่เกิดขึ้นในปืนพ่นจะเคลื่อนที่ไปตามหัวพ่นด้วยความเร็วสูง ผงเคลือบที่ถูกป้อนเข้าไปในเปลวพลาสมาจะถูกหลอม และถูกเร่งไปตกกระทบบนชิ้นสเตรต เกิดเป็นผิวเคลือบ ดังแผนภาพแสดงดังรูป 2.26

แก๊สอาร์กอน (Ar) เป็นแก๊สหลักในการผลิตพลาสมาเนื่องจากเป็นแก๊สที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และ Ar ซึ่งเป็นแก๊สโมเลกุลเดี่ยว (monoatomic molecule) มีความเร็วแก๊สสูงกว่าแก๊ส

โมเลกุลคู่ ทำให้ได้เปลวพลาสมาที่มีความเร็วสูง และพบว่าค่าความร้อนของเปลวจะสูงขึ้น เมื่อเติมแก๊สโมเลกุลคู่ (diatomic molecule) เช่น N_2 หรือโดยเฉพาะ H_2 เข้าไปผสมกับ Ar เนื่องจากแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนสูงกว่า ดังนั้นในทางปฏิบัติจะพบว่า แก๊สที่ใช้ผลิตพลาสมาส่วนใหญ่จึงเป็นแก๊สผสมระหว่าง Ar กับ H_2 หรือ N_2 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการใช้ Ar ผสมกับ He มีค่าการเหนี่ยวนำความร้อนสูงกว่า Ar สำหรับการออกแบบปืนพ่นแบบพลาสมานับว่ามีความซับซ้อนมาก และมีผลสำคัญมากต่อความเร็วและความร้อนที่อนุภาคจะได้รับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของหัวคาโทด และอาโนดจะต้องสัมพันธ์กับชนิดของแก๊สที่ใช้ผลิตพลาสมา นอกจากนี้ระยะพ่นนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากพลาสมามีอุณหภูมิและความเร็วสูง ดังนั้นระยะพ่นต้องมากพอที่จะไม่ทำให้ซับซ้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจากการสัมผัสเปลวพลาสมา แต่ก็ต้องไม่ห่างมากเกินไปจนอนุภาคเกิดการเย็นตัวและสูญเสียความเร็วมากก่อนตกกระทบ

การพ่นแบบพลาสมาส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นการพ่นในบรรยากาศปกติ หรือที่เรียกว่า การพ่นแบบพลาสมาบรรยากาศ (atmospheric plasma spraying, APS) ซึ่งในสภาวะการพ่นดังกล่าวอนุภาคที่หลอมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศได้ง่าย เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของผิวเคลือบ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาให้ปืนพลาสมาบรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศ ซึ่งโดยปกติหลังจากดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศจนเหลือความดันในช่วง 0.001–0.01 Pa แล้วจะมีการเติมแก๊สเฉื่อย (Ar) เข้าไปแทนที่ความดันต่ำ กลายเป็นระบบพ่น ที่เรียกว่า การพ่นแบบพลาสมาสุญญากาศ (vacuum plasma spray, VPS) (ซึ่งปกติจะมีออกซิเจนเหลืออยู่ไม่เกิน 30 ppm) หรือ เรียกอีกอย่างว่าการพ่นแบบพลาสมาความดันต่ำ (low pressure plasma spraying, LPPS) [1]



รูป 2.26 การพ่นเคลือบแบบพลาสมา [40]

ตาราง 2.6 การเปรียบเทียบลักษณะของระบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน [1]

เทคนิคการพ่น	แหล่งให้ความร้อน	แรงขับเคลื่อน	ชนิดของวัสดุที่ใช้	อุณหภูมิของปืนพ่น (°C)	ความเร็วของอนุภาค (m/s)	วัสดุที่ใช้ในการพ่นเคลือบ	ความแข็งแรงพันธะ (MPa)	% ฐพฐน
Arc spraying	อาร์คระหว่างขั้ว 2 ขั้ว	อากาศ	ลวด	6000	240	Ductile materials	46–60	8–15
Plasma spraying	พลาสมา	พลาสมา	ผง	16000	120–600	โลหะ, เซรามิก, พลาสติก& สารประกอบ	30–70	2–5
Low pressure plasma spraying	พลาสมา	พลาสมา	ผง	16000	900	โลหะ, เซรามิก, พลาสติก& สารประกอบ	>70	<5
Flame spraying and Fusing	–	–	ผง	–	–	โลหะที่หลอมได้	>70	<0.5
Flame spraying	ออกซิเจน / อะเซทิลีน / ออกซิเจน ไฮโดรเจน	การจุดระเบิด	ผง	3300	240	โลหะ, เซรามิก	20–28	10–20
Detonation Gun	ออกซิเจน / อะเซทิลีน / แก๊สไฮโดรเจน	การจุดระเบิด	ผง	4500	800	โลหะ, เซรามิก, พลาสติก& สารประกอบ	>70	0.1–1
HVOF	ออกซิเจน ไฮโดรเจน / ออกซิเจนโพโรไฟลีน / ออกซิเจนโพเนน	อากาศ	ผง	2800	1350	โลหะ, เซรามิก	40–96	0.5–2

2.7 ความแข็ง

ความแข็ง (hardness) คือ สมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งปกติจะเป็นการผ่านทะลุหรืออาจกล่าวได้ว่า ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อการงอ (bending) การข่วน (scratching) การถลอก (abrasion) หรือ การตัด (cutting) [41]

การวัดความแข็งเป็นสมบัติทางกลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัสดุที่จะแสดงถึงกำลังของวัสดุ ความยากง่ายเมื่อถูกแปรรูป และความต้านทานต่อการกัดให้เกิดรอยบนผิววัสดุ ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานของวัสดุชนิดต่างๆ เหมาะสมกับสภาพการใช้งานได้ดีที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการวัดความแข็งของผิววัสดุ การทดสอบความแข็งของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ การทดสอบความแข็งมหภาค (macrohardness) และการทดสอบความแข็งจุลภาค (microhardness)

การทดสอบความแข็งมหภาค (macrohardness) เป็นการทดสอบความแข็งบนผิววัสดุ ซึ่งสามารถเห็นรอยกดได้ด้วยตาเปล่า ค่าความแข็งที่วัดได้จะเป็นค่าความแข็งโดยรวมของวัสดุนั้น มีวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ 3 วิธี คือ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (brinell hardness test) การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (rockwell hardness test) และการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบจุลภาค (microhardness) เป็นการวัดค่าความแข็งในบริเวณเล็กๆ ระดับจุลภาคหรือระดับวิญภาค (phase) และใช้น้ำหนักกดในระดับกรัม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบแบบบาง (thin layer) การวัดความแข็งระดับจุลภาคนี้ จะมีด้วยกัน 2 วิธี คือ แบบวิกเกอร์ส (vickers hardness test) และแบบนูป (knoop hardness test)

2.7.1 การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส

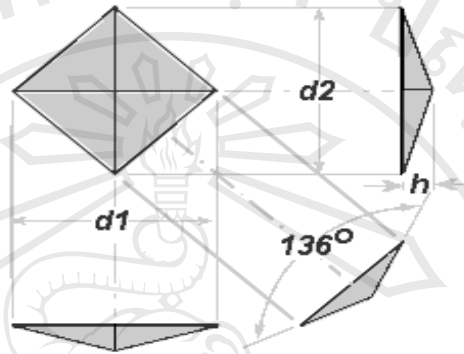
การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (micro vickers hardness test) เป็นการทดสอบความแข็งระดับจุลภาค โดยใช้หัวกดเพชรที่มีรูปทรงพีระมิด หรือรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำมุมระหว่างด้านตรงข้าม 136 องศา ดังรูป 2.27 กดลงบนผิววัสดุจนเกิดเป็นรอย และคำนวณหาค่าความแข็งจากพื้นที่ที่ถูกกดเป็นรอย ตามสมการ 2.1

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (2.1)$$

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

กำหนดให้ F = แรงที่ใช้กด (นิวตัน)

$$d = \text{เส้นทแยงมุมของรอยกด (มม.)} = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

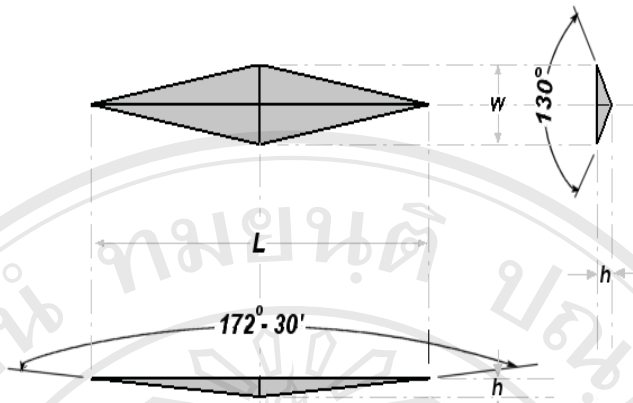


รูป 2.27 ลักษณะหัวกด และรอยกดความแข็งแบบวิกเกอร์ส [41]

รอยกดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบรอยกดขนาดเล็กที่เกิดขึ้น ในบางครั้งการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส รอยกดที่เกิดบนผิววัสดุอาจมีความไม่สมบูรณ์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ รอยกดรูปร่างเว้า (pincushion-shaped impressions) และ รอยกดรูปร่างบวมออก (barrel-shaped impressions) โดยสาเหตุของรอยกดรูปร่างเว้าเกิดจากการยุบตัวของวัสดุรอบพื้นผิวที่ทำการกด ซึ่งเกิดได้บ่อยกับโลหะอ่อนมากและโลหะอบอ่อน (annealed metals) ผลคือค่าความแข็งที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากการวัดเส้นทแยงมุมที่ยาวขึ้น และกรณีรอยกดรูปร่างบวมออก ซึ่งจะพบได้บ่อยในการวัดความแข็งของวัสดุขึ้นรูปเย็น (cold worked materials) ซึ่งจะทำให้การวัดค่าเส้นทแยงมุมผิดพลาดได้ค่าความแข็งที่สูงเกินจริง

2.7.2 การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบนूप

การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบนूप (knoop hardness test) เป็นวิธีการทดสอบหาค่าความแข็งในวัสดุหรือพื้นที่ขนาดเล็ก โดยทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มีมุมยอดด้านกว้าง 130° และมุมยอดด้านยาว $170^\circ 30'$ อัตราเส้นทแยงมุมด้านยาวต่อเส้นทแยงมุมด้านกว้างเท่ากับ 7.11 และเส้นทแยงมุมด้านยาวต่อความลึกเท่ากับ 4



รูป 2.28 ลักษณะหัวกด และรอยกดความแข็งแบบนูน [41]

การหาค่าความแข็งแบบนูน (KHN) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้ในการกด, P (kgf) ต่อ พื้นที่ผิวรอยกด, A (mm^2) ตามสมการ 2.3

$$KHN = \frac{F}{A} = \frac{P}{CL^2} \quad (2.3)$$

ในการทดสอบความแข็งทั้งสองวิธีนี้ รอยกดจะมีขนาดเล็กมากซึ่งอาจไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นการวัดรอยกดจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีสเกลบอกขนาดติดที่เลนส์ ช่วยในการวัด นอกจากนี้การวัดชิ้นงานต้องระวังให้ผิวตั้งฉากกับหัวกดขณะทำการวัด หากไม่ตั้งฉากจะทำให้การวัดเส้นทแยงมุมผิดพลาดและค่าความแข็งที่ได้จะไม่เที่ยงตรง

การเปรียบเทียบการกดแบบนูน และแบบวิกเกอร์ส สำหรับการให้น้ำหนักและการทดสอบวัสดุ

- หัวกดแบบวิกเกอร์ส สามารถกดได้ลึกเป็น 2 เท่าของการกดแบบนูน
- เส้นทแยงมุมของการกดแบบวิกเกอร์ส ยาวประมาณ 1/3 ของเส้นทแยงมุมหลักของการกดแบบนูน
- การทดสอบแบบวิกเกอร์สตอบสนองต่อสภาพพื้นผิวน้อยกว่าการทดสอบแบบนูน
- การทดสอบแบบวิกเกอร์สตอบสนองต่อความผิดพลาดมากกว่าการทดสอบแบบนูน
- การทดสอบแบบวิกเกอร์สเหมาะสำหรับพื้นที่กลมเล็กๆ
- การทดสอบแบบนูนเหมาะสำหรับพื้นที่ยาวเรียวเล็กๆ
- การทดสอบแบบนูนเหมาะสำหรับวัสดุที่มีความเปราะมาก และการตัดที่บางมาก

2.8 ความต้านทานต่อการขูดขีด

เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด โดยการใช้หัวขูดชิ้นงานแล้วควบคุมน้ำหนักที่กดลงบนหัวขูดขนาดต่างๆ กัน [42] การทดลองนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะตอบสนองต่อแรงกดที่ใช้ขูด ซึ่งรอยขูดที่ได้จะสามารถนำมาวิเคราะห์โดย Lawn and Swain [43] ดังรูป ซึ่งรอยที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นร่องซึ่งร่องจะเกิดจากน้ำหนักที่ใช้กดหัวขูดแบบมาตรฐานหรือคเวลล์ ซึ่ง

การทดสอบนี้สามารถคำนวณหาความแข็งแบบขูดของวัสดุ (H_s) ได้ตามสมการ (2.4)

$$H_s = \frac{8P}{\pi(d_s^2)} \quad (2.4)$$

โดยที่ H_s คือ ค่าความแข็งแบบขูด (Pa)

P คือ น้ำหนักที่ให้ (N)

d_s คือ ความกว้างของรอยขูด (μm)

การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สของพื้นผิวสามารถให้ค่าจำกัดความ คือ น้ำหนักที่ให้ต่อพื้นที่บริเวณหัวกดแบบปิระมิด ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ความกว้างของเส้นทแยง การกดของหัวขูด (w) ซึ่งถ้าให้หัวกดมีรูปร่างสมมาตรจะได้ค่าความแข็งตามสมการ

$$H_v = \frac{\text{load}P}{\text{diagonal}} \times 2 \sin 68^\circ = 1.854 \times \frac{P}{w^2} \quad (2.5)$$

โดยที่ H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส

P คือ น้ำหนักที่ให้

w คือ ความกว้างของเส้นทแยงมุมที่เกิดขึ้นจากการกดของหัวขูด (μm)

การทดสอบค่าความแข็งแบบกดด้วยน้ำหนักคงที่สามารถให้ค่าจำกัดความ คือ น้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่ที่เกิดจากรอยกด ซึ่งการทดสอบแบบนี้จะเหมือนกับการทดสอบแบบวิกเกอร์สแต่ต่างกันที่กำลังสองของความยาวของเส้นทแยงมุมหารสอง ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของสมการเหล่านี้ ดังนี้

$$H_v = 0.927 \times H_c \quad (2.6)$$

โดยที่ H_c คือ ความแข็งแบบกดด้วยน้ำหนักคงที่ (Pa)

การทดสอบแบบวิกเกอร์จะคล้ายกับการทดสอบแบบชูด คือ น้ำหนักที่ใช้กดจะเหมือนกันแต่แตกต่างที่การเคลื่อนที่ของหัวกดและหัวชูด จะทำให้รอยกดที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกับรอยชูด ซึ่งถ้าค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเกิดรอยมีค่าเท่ากันจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$H_s = H_c \text{ and both } = \frac{1}{0.927} H_v \quad (2.7)$$

$$H_s = H_c = 1.08 H_v$$

2.9 การสึกหรอ

การสึกหรอ (wear) เป็นการสูญเสียเนื้อวัสดุที่เกิดจากการถูกระทำโดยทางกลจากของแข็งหรือของเหลว โดยการสัมผัสหรือเคลื่อนที่ของวัสดุด้วยกลไกต่างๆ ซึ่งการสูญเสียเนื้อวัสดุจะอยู่ในรูปของน้ำหนักหรือขนาดของวัสดุที่เปลี่ยนไป โดยมีกลไกการสึกหรอต่างกัน โดยทั่วไปแล้วมักพบว่ามียหลายกลไกการสึกหรอหลายชนิดเกิดขึ้นพร้อมกัน กลไกการสึกหรอชนิดที่มีผลต่อการสึกหรอมากที่สุด เรียกว่า กลไกการสึกหรอหลัก และกลไกการสึกหรอที่มีผลต่อการสึกหรอเพียงเล็กน้อยหรือช่วยให้เกิดการสึกหรอหลักดีขึ้น เรียกว่า กลไกการสึกหรอเสริม

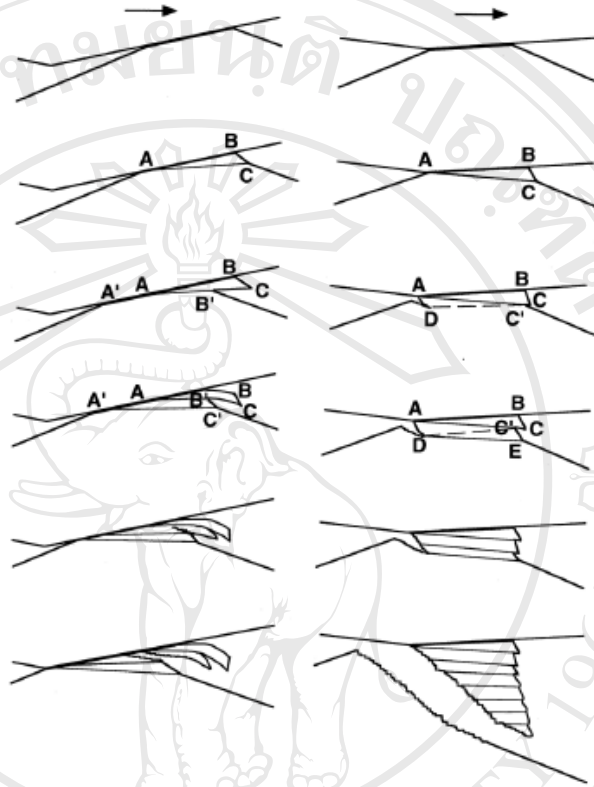
2.9.1 ประเภทของการสึกหรอ

การสึกหรอสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดการสึกหรอได้ 6 ประเภท คือ การสึกหรอแบบขัดถู (abrasive wear) การสึกหรอแบบติดกัน (adhesive wear) การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (corrosion wear) การสึกหรอแบบความล้า (fatigue wear) การสึกหรอแบบการกัดเซาะ (erosive wear) และการสึกหรอแบบการสั่น (fretting wear)

1) การสึกหรอแบบติดกัน

การสึกหรอแบบติดกันเกิดขึ้นเมื่อมีการเลื่อนไถลของวัสดุสองชนิด ขณะที่มีการหล่อลื่น

หรือไม่มีการหล่อลื่น โดยที่จุดสัมผัสจะเกิดการฉีกขาดหรือหลุดออกไปติดกับพื้นผิวอื่นๆ จนกระทั่งมีปริมาณการติดกันมากขึ้นจึงหลุดเป็นเศษ (debris) ออกไป ดังรูป 2.29 ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการฉีกหรือแบบติดกัน ได้แก่ โครงสร้างผลึก พันธะของวัสดุ ขนาดของเกรน และลักษณะขอบเกรน

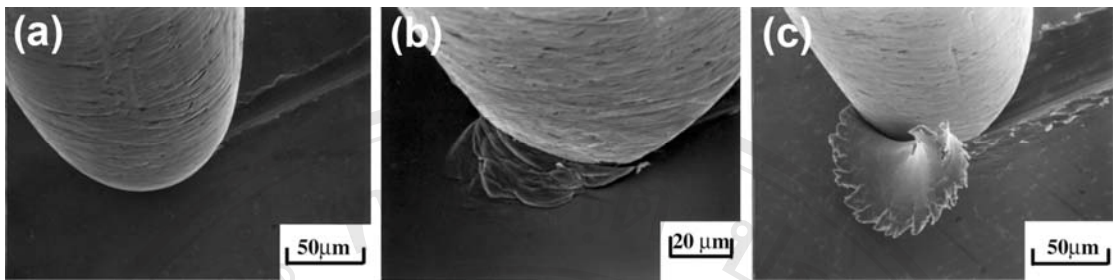


รูป 2.29 กลไกการฉีกหรือแบบติดกันของวัสดุ (A) และ (B) [44]

2) การฉีกหรือแบบขาด

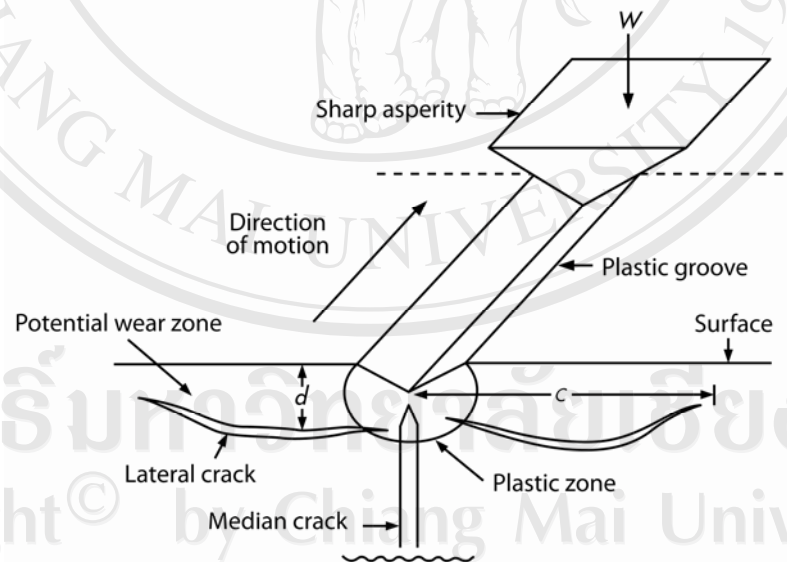
การฉีกหรือแบบขาดเกิดจากพื้นผิวที่แข็งและขรุขระ หรืออนุภาคที่แข็งเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่อ่อนกว่า ทำให้เกิดความเสียหายระหว่างจุดที่สัมผัสทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (plastic deformation) หรือแตกหัก (fracture) โดยทั่วไปการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวที่เกิดการขาดแบ่งได้ 3 แบบ คือ

- 1) Ploughing เป็นการฉีกหรือที่ไม่สูญเสียเนื้อวัสดุ แต่เกิดการผิดรูปบริเวณผิวของวัสดุ
- 2) Wedge เป็นการฉีกหรือที่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุบ้างเล็กน้อย และยังเกิดการผิดรูปบนผิววัสดุ
- 3) Cutting เป็นการฉีกหรือที่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากที่สุด โดยเฉพาะที่หลุดออกมาจะมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (ribbed-shaped)



รูป 2.30 ภาพถ่าย SEM ลักษณะการสึกหรอของทองเหลืองกับลูกบอลเหล็กกล้าแบบ (a) ploughing, (b) wedge และ (c) cutting [44]

สำหรับการแตกหักมักจะมีกับวัสดุประเภทเซรามิก ซึ่งมีความแข็งสูงแต่เปราะ และมีช่วงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรน้อยมาก เมื่อถูกแรงกระทำที่มากพอจะเกิดการแตกหัก กลไกการแตกหักคือ เมื่อให้แรงกระทำบนผิววัสดุแล้วเคลื่อนที่ผ่านไปบนวัสดุ จะทำให้เกิดรอยร้าวภายใน (median crack) ต่อมาจะเกิดรอยร้าวขนานกับผิวของวัสดุ (lateral crack) ซึ่งจะเคลื่อนที่ออกสู่บริเวณผิวของวัสดุทำให้วัสดุนั้นหลุดออกมา ดังรูป 2.31

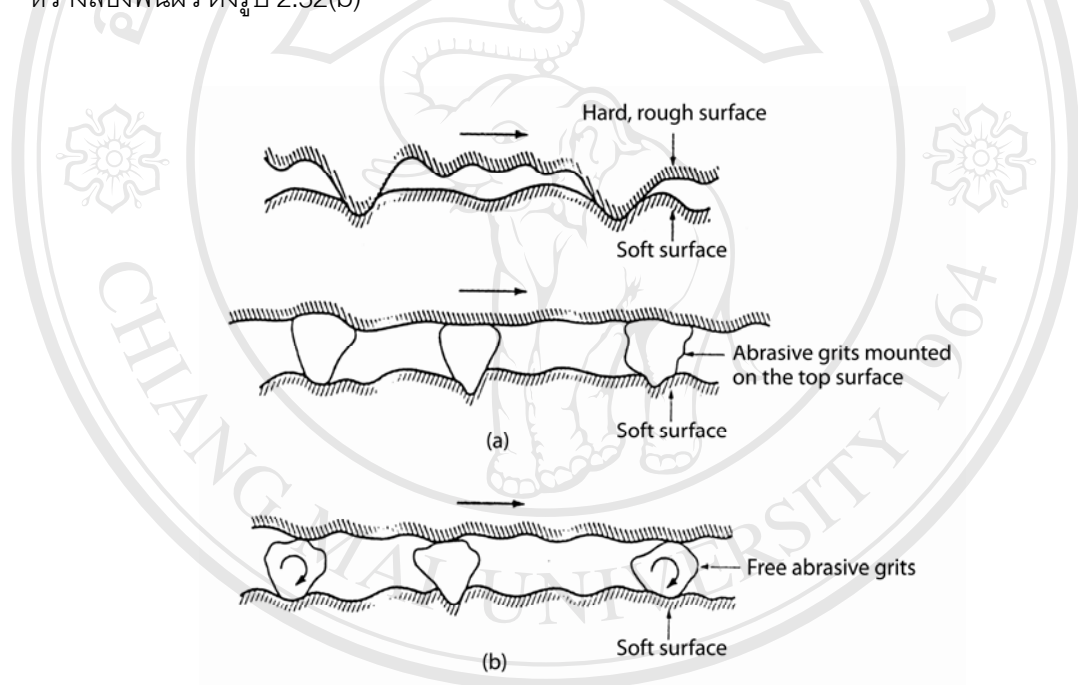


รูป 2.31 ลักษณะการสึกหรอแบบแตกหัก [45]

ชนิดของการสึกหรอแบบขัดถูยังสามารถแบ่งตามตัวกลางการสึกหรอ คือ

1) การสึกหรอแบบขัดถูสองพื้นผิว (two-body abrasive wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจากพื้นผิวที่แข็งกว่าขัดถูลงไปบนพื้นผิวอีกพื้นผิวหนึ่ง ซึ่งมักเกิดกับการใช้งานทางกล เช่น การเจียรระไน การกลึง และการกัด เป็นต้น ดังรูป 2.32(a)

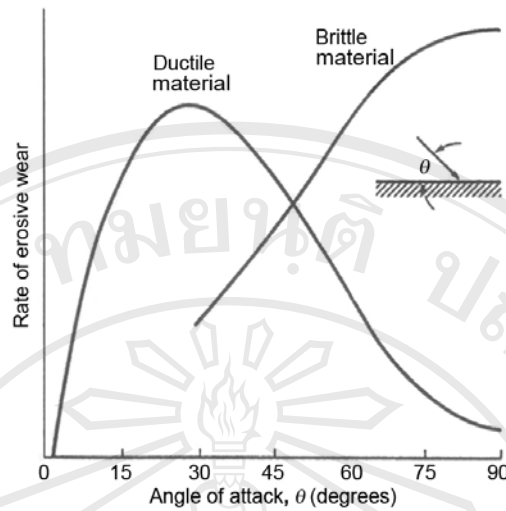
2) การสึกหรอแบบขัดถูที่มีตัวกลางระหว่างสองพื้นผิว (three-body abrasive wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจากอนุภาคเล็กๆ ที่แข็ง (abrasive particle) จะเป็นตัวขัดถูระหว่างพื้นผิวโดยอาจจะขัดให้ผิวด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านเกิดการสึกหรอได้ เช่น การขัดละเอียดของชิ้นงานตัวอย่าง เป็นต้น สำหรับความเสียหายจากการขัดถูแบบสองพื้นผิวนั้นจะมากกว่าการขัดถูแบบที่มีตัวกลางระหว่างสองพื้นผิว ดังรูป 2.32(b)



รูป 2.32 (a) การสึกหรอแบบขัดถูสองพื้นผิว และ (b) การสึกหรอแบบขัดถูที่มีตัวกลางระหว่างสองพื้นผิว [45]

3) การสึกหรอแบบกัดเซาะ

การสึกหรอแบบกัดเซาะเกิดจากการตกกระทบของวัสดุในลักษณะกระแทก ซึ่งมีทั้งแบบที่เป็นอนุภาคของแข็ง หยดของเหลว และการระเบิดของฟองอากาศในของเหลว โดยอัตราการสึกหรอในลักษณะนี้จะมีเรื่องของมุมตกกระทบและชนิดของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังรูป 2.33



รูป 2.33 อัตราการกัดเซาะกับมุมตกกระทบของวัสดุ [45]

1) การสึกกร่อนแบบกัดเซาะโดยอนุภาคของแข็ง (solid particle erosion) เป็นการตกกระทบของอนุภาคของแข็งบนผิววัสดุจนเกิดการสึกกร่อน การสึกกร่อนในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอนุภาค ขนาดอนุภาค และมุมตกกระทบ โดยในส่วนของมุมตกกระทบจะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่กระทบด้วย การตกกระทบแบบนี้สามารถนำมาใช้ทำประโยชน์ได้คือ sand blasting และ erosion drilling

2) การสึกกร่อนแบบกัดเซาะโดยหยดของเหลว (liquid impingement erosion) เป็นการสึกกร่อนเนื่องมาจากหยดของเหลวที่มีความเร็วสูงมาตกกระทบบนผิววัสดุ (ความเร็วอย่างน้อย 300 เมตรต่อวินาที) ซึ่งจะเกิด high pressure จนเกินจุด yield strength ของวัสดุ และเมื่อตกกระทบซ้ำๆ จึงเกิดการสึกกร่อน (บางกรณีเรียก pitting) ในกรณีการสึกกร่อนลักษณะนี้ยังจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อมีการเกิดการกัดกร่อน (corrosion) รวมอยู่ด้วยซึ่งเรียกว่า erosion-corrosion หรือ moisture erosion ตัวอย่างเช่น การเกิดการกระทบของฝนกับเครื่องบิน

3) การสึกกร่อนแบบกัดเซาะโดยการระเบิดของฟองอากาศ (cavitations erosion) เกิดจากการยุบตัว หรือระเบิดของฟองอากาศในของเหลว จนทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ microjet ของของเหลวเคลื่อนเข้ากระทบผิววัสดุทำให้เกิด plastic deformation หรือ elastic deformation โดยทั้ง 2 แบบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดสึกกร่อนขึ้น วัสดุที่นิยมมาทำเป็นตัวป้องกัน cavitations erosion คือ พวกที่มีความแข็งสูงแต่ไม่เปราะและต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่ดีด้วย ตัวอย่างเช่น ไบพัดเร็ว หรือไบพัดในปั๊ม

4) การสึกกร่อนแบบกัดกร่อน

การสึกกร่อนแบบกัดกร่อน (corrosive wear) เป็นการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างการสึกกร่อนทางเคมี (chemical wear) กับกาสึกกร่อนเชิงกล (mechanical wear) โดยมีปัจจัยหลักในการเกิดคือ ออกซิเจนและน้ำ ซึ่งนับได้ว่าการสึกกร่อนในลักษณะนี้เป็นการเกิดแบบเสริมกัน โดยมักจะเกิดการสึกกร่อนทางเคมีขึ้นก่อน และมีการเคลื่อนผ่านหรือขูดผิววัสดุออกจนเกิดกับความเสียหายของผิววัสดุ ตัวอย่างการสึกกร่อนประเภทนี้ เช่น การทำงานในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแร่ กระบวนการทางเคมี หรือวัสดุอุปกรณ์ที่สัมผัสกับน้ำทะเล เป็นต้น

5) การสึกกร่อนแบบความล้า

การสึกกร่อนแบบความล้า (fatigue wear) เป็นการสึกกร่อนในลักษณะที่มีการให้แรงกระทำบนผิววัสดุซ้ำๆ จนเกิดความเค้นสะสมบนผิววัสดุ เมื่อความเค้นมีค่าสูงมากพอจนเกิดจำนวนรอบวิกฤตทำให้เนื้อวัสดุแตก หรือหลุดออกจากผิววัสดุ แต่ถ้าไม่ดำเนินถึงรอบวิกฤตก็并不会เกิดการสึกกร่อนขึ้น สามารถแบ่งการสึกกร่อนประเภทนี้ได้เป็น 2 แบบ คือ ความล้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุน เกิดโดยไม่มีสัมผัสกันของวัสดุ เนื่องจากมีสารหล่อลื่นคั่นกลาง แต่ความเค้นจะสามารถส่งแรงกระทำผ่านฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ทำให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการแตกหัก ส่วนความล้าแบบมีความเค้นสะสมเป็นการสึกกร่อนที่พบในเซรามิก ซึ่งเป็นความล้าชนิดที่ความเค้นขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอน้ำกับความเค้นที่ผิว โดยเฉพาะในส่วนของปลายรอยแตก ซึ่งจะเป็นจุดที่มีความเค้นสูงสุดและอาจทำให้เกิดการเติบโตของรอยแตกและทำให้เกิดการแตกหัก

6) การสึกกร่อนแบบการสั่น

การสึกกร่อนแบบการสั่น (fretting wear) เป็นการสึกกร่อนเนื่องจากการสั่นของวัสดุที่สัมผัสกันทำให้เกิดกลไกการสึกกร่อนแบบติดกันเกิดขึ้นก่อน ต่อมาเกิดการสั่นขึ้นทำให้เกิดการแยกออกจากกันและทำให้แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยชิ้นส่วนเล็กๆ นั้นจะกลายเป็นอนุภาคสำหรับขัดถู ซึ่งการสึกกร่อนลักษณะนี้เป็นแบบไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับกลไกอื่นๆ แต่อาจเกิดร่วมกับการสึกกร่อนอื่นๆ จนทำให้เกิดการสึกกร่อนมากขึ้นได้

2.9.2 อัตราการสึกกร่อน

การหาค่าอัตราการสึกกร่อน (wear rate) สามารถหาได้ตามสมการของ Archard ซึ่งได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนที่แปรผันกับน้ำหนักกดทับที่ให้กับวัสดุ [46] ดังสมการ 2.8

$$Q = kW \quad (2.8)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการสึกหรอ
 k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ
 W คือ น้ำหนักที่ให้แก่วัสดุ

เมื่อพิจารณาจากค่าความแข็ง และปริมาตร หรือน้ำหนักของวัสดุที่หายไปจะได้สมการ 2.9

$$Q = k \frac{V}{H} \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{V}{L} \quad (2.10)$$

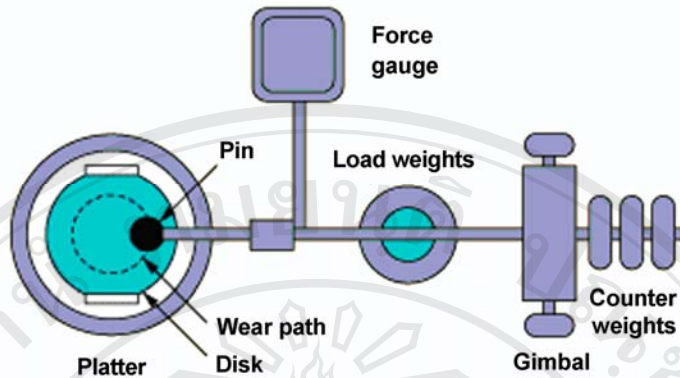
เมื่อ Q คือ อัตราการสึกหรอ
 k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ
 H คือ ความแข็งของวัสดุ
 V คือ ปริมาตรสูญเสีย หรือ มวลสูญเสีย
 L คือ ระยะทดสอบ

2.9.3 วิธีทดสอบการสึกหรอ

วิธีทดสอบการสึกหรอแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1) การสึกหรอแบบไกล

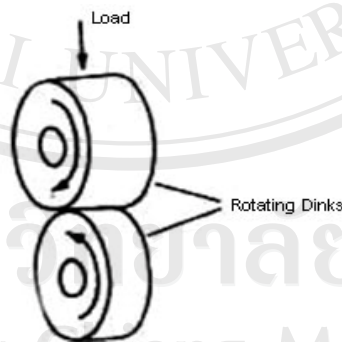
เป็นการทดสอบที่จัดให้ผิวสัมผัสเคลื่อนที่สัมผัสกัน วัสดุชิ้นหนึ่งไถไปบนวัสดุอีกชิ้นหนึ่ง
 วิธีการทดสอบในกลุ่มนี้คือ pin-on-disk (face loading) เครื่องมือทดสอบแบบ pin-on-disk
 แสดงดังรูป 2.34 การทดสอบทำโดยยึด pin ให้อยู่กับที่ ส่วนจานหมุนขัดสีกับ pin ในแนวราบ pin
 ที่ใช้อาจเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นลูกบอลที่ไม่มีการหมุน หรือเป็นวัสดุรูปครึ่งวงกลม หรือเป็น
 ด้านเรียบของวัสดุทรงกระบอก เครื่องทดสอบแบบนี้ใช้ในการสึกหรอแบบไกล และสัมประสิทธิ์
 ความเสียดทาน



รูป 2.34 เครื่องมือทดสอบแบบไถล [47]

2) การสึกหรอแบบขัดถู

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูทั้งที่เป็นการสึกหรอแบบขัดถูชนิดสององค์ประกอบ (two body abrasion test) และการสึกหรอแบบขัดถูชนิดสามองค์ประกอบ (three body abrasion test) คือการทดสอบการสึกหรอแบบล้อยาง (dry-sand abrasion test) เครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบล้อยาง แสดงดังรูป 2.35 ชิ้นงานจะถูกนำหน้าหนักกดเข้าหาด้านข้างของล้อยาง ขณะที่ผงขัดขนาด 50–70 mesh (200–300 ไมครอน) ถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลกเข้าระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับล้อยาง เกิดการขัดถูแบบสามองค์ประกอบ

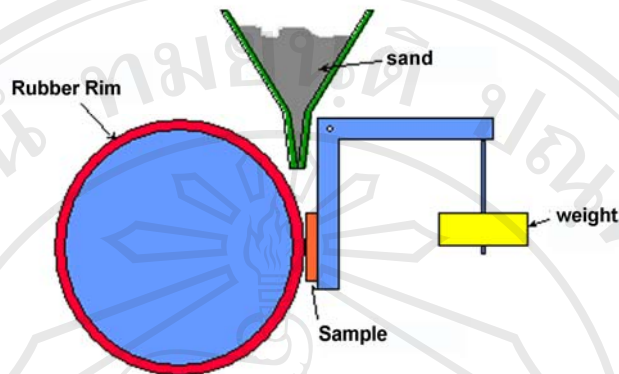


รูป 2.35 เครื่องมือทดสอบแบบ dry-sand abrasion [48]

3) การสึกหรอแบบความล้า

การทดสอบแบบนี้ ใช้ทดสอบการสึกหรอของวัสดุและการทดสอบสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานที่มีการสัมผัสกับวัสดุที่มีการหมุน (rolling contact application) เช่น antifriction bearings และ

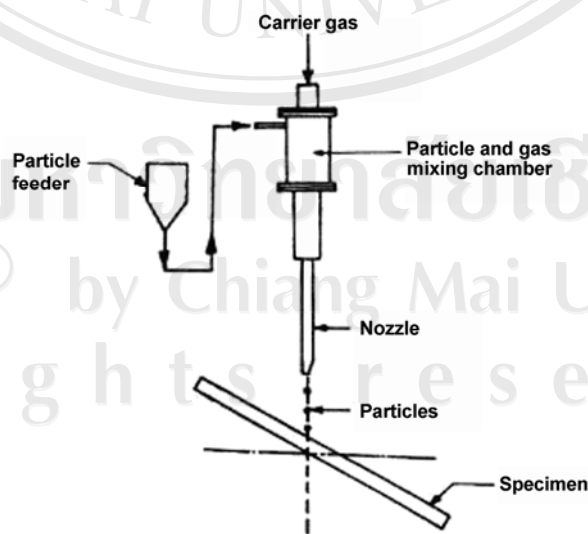
gears ตัวอย่างเครื่องมือในกลุ่มนี้คือ disk-on-disk หรือ Ball-on-Disk (edge loaded) ดังแสดง
 ดังรูป 2.36



รูป 2.36 เครื่องมือทดสอบแบบ disk on disk [49]

4) การสึกหรอแบบกัดเซาะ

การทดสอบการสึกหรอแบบการเซาะโดยใช้อนุภาคของแข็ง เป็นวิธีการและเครื่องมือ
 สำหรับทดสอบการสึกหรอแบบกัดเซาะโดยทั่วไปมักทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทำได้โดยใช้
 เครื่องเป่าอากาศให้อนุภาคผงขับเคลื่อนด้วยลำอากาศพุ่งกระทบชิ้นงานแล้วซึ่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
 ลักษณะของการทดสอบแบบการกัดเซาะโดยใช้อนุภาคของแข็ง แสดงดังรูป 2.37



รูป 2.37 เครื่องมือทดสอบแบบ solid-particle erosion [48]