

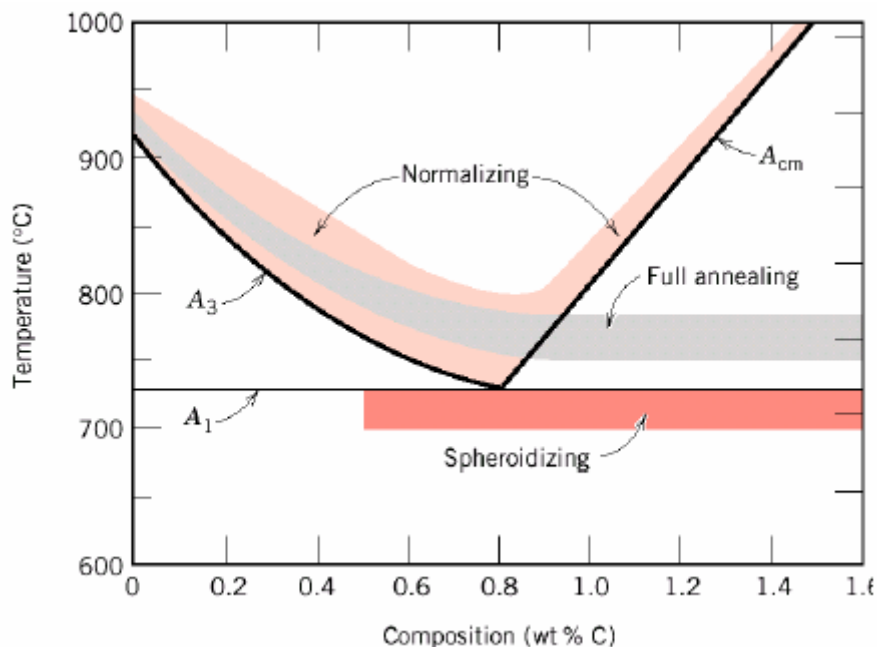
บทที่ 8

กรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า (Heat Treatment of steel)

ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่อง การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าโดยการใช้กรรมวิธีทางความร้อนได้แก่ การอบอ่อน(Annealing) การอบปกติ(Normalizing) การชุบแข็ง(Hardening) การอบคืนตัว(Martempering) และการชุบผิวแข็ง(Surface Hardening)

8.1 กล่าวนำ

กรรมวิธีทางความร้อน หมายถึง “การนำเอาโลหะหรือโลหะผสมที่เป็นของแข็งมาให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอัตราที่แตกต่างกัน เพื่อให้มี Mechanical Properties ตามต้องการ” โดยทั่วไป การทำ Heat Treatment ของ Steels เป็นการทำให้ Steels มี Phase เป็น Austenite และให้ Austenite เปลี่ยนแปลงไปเป็น Phases ต่าง ๆ ตามต้องการ ซึ่งประกอบด้วยขบวนการต่าง ๆ ดังนี้



รูป 8.1 อุณหภูมิที่ใช้สำหรับ Heat Treatment ชนิดต่าง ๆ

8.2 การอบอ่อน (Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตต่าง ๆ มา เช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging, Hot Rolling) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling, Drawing) การเชื่อม หรือ การผ่านการหล่อ (Casting) ซึ่งเหล็กผ่านขั้นตอนการผลิตดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติที่ไม่มีดีหลายประการ เช่น

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จะมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอตามส่วนที่มีมุมแหลม ซึ่งอัตราการเย็นตัวสูงจะมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่น ๆ โครงสร้างของเหล็กบริเวณผิวจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็ก เพราะถูกแรงกระแทก หรืออัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน ทำให้คุณสมบัติไม่สม่ำเสมอถึงภายในเช่นเดียวกัน

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มักจะมีความเครียดที่เกิดจากการถูกแรงอัด หรือบีบเหล็กค้างอยู่ มีส่วนทำให้มีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility)

เหล็กที่ผ่านการเชื่อม เช่นเดียวกัน การเชื่อมเป็นการทำให้เหล็กร้อนเป็นบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน และการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็น ย่อมจะเป็นการยากที่จะทำได้ทั่วถึง มักจะเกิดความเครียดเหลือค้าง และโครงสร้างของเนื้อเหล็กบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมจึงต่างกับเนื้อเหล็กในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ถูกความร้อนจากจุดเชื่อม คุณสมบัติของเหล็กจะขาดความไม่สม่ำเสมอ

เหล็กที่ผ่านการหล่อ ยิ่งมองเห็นได้ง่ายว่าโครงสร้าง และคุณสมบัติของเหล็กจะมีส่วนที่แตกต่างกันมาก เพราะอัตราการเย็นตัวของเหล็กในแบบหล่อ (ซึ่งส่วนมากใช้ทรายเป็นวัสดุในแบบหล่อ) จะแตกต่างกันทั้งส่วนที่หนาและส่วนที่บาง ยิ่งส่วนที่เป็นแง่มุม การเย็นตัวจะยิ่งเร็วกว่าส่วนอื่น จึงมักมีความแข็งแรงสูง

จากที่กล่าวมาแล้วนี้จะเห็นได้ว่า การที่จะนำเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปต่าง ๆ ไปใช้งาน หรือนำไปตัด เจาะ กัด ไส ย่อมจะทำให้เกิดอุปสรรคในลักษณะต่าง ๆ ที่พอจะมองเห็นได้ชัดเจน เช่น การกัดหรือไส ถ้าเหล็กมีความแข็งแรงไม่เท่ากันทุกส่วน การปรับมุมของมีดกัด หรือตั้งอัตราความเร็วในการตัดจะเกิดปัญหามากมาย และผลงานที่ได้รับก็ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปขึ้นมา ก่อนจะนำไปใช้งานหรือฟอร์มรูปร่างในขั้นต่อไป จำเป็นจะต้องผ่านการอบให้อ่อนตัว ซึ่งลักษณะของการทำงานมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์สุดท้าย

8.2.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวสูง โดยเป็นการทำลาย Martensite เพื่อช่วยในการกลึงหรือไสได้ง่าย เพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้า และ แม่เหล็กสม่ำเสมอ

1. Hypo Eutectoid Steels (%C < 0.8) จะเผาไปที่เหนือ Ac_3 ประมาณ 30 – 50°C (รูป 9.1) เช่น การทำ Refinement Pearlite ที่มีขนาดโต ที่มีส่วนผสมของ 0.3% C เมื่อ Heat ไปเหนือ Ac_3 ก็จะเกิดการเปลี่ยน Phases เป็น γ ที่ละเอียด + α หยาบ (เดิม) และ เมื่อให้ Temp สูงกว่า Ac_3 ประมาณ 50°C α ก็จะเปลี่ยนเป็น γ ที่ละเอียด แล้วจากนั้นจึงลด Temp ลงช้า ๆ ประมาณ 150° - 200°C/hr. เมื่อ Temp ลดลงมาที่ Room Temp ก็จะได้ Phase ของ Pearlite ที่ละเอียด + Ferrite ที่ละเอียด

2. Hyper Eutectoid Steels Annealing Temp จะอยู่เหนือ Ac_1 ประมาณ 50°C แล้วลด Temp ลงช้า (รูป 9.1) โครงสร้างที่ได้ คือ Fine γ ถูกล้อมรอบด้วย Coarse Proeutectoid Cementite ซึ่งจะยังคงมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำอยู่ แต่ก็ดีกว่าโครงสร้างที่เป็น Martensite + Cementite เดิม

8.2.2 การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing)

หมายถึง การอบอ่อนที่กระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น Ac_1 หรือบางกรณีอาจจะ สูงกว่าเส้น Ac_1 เล็กน้อย ความมุ่งหมายก็เพื่อทำลายความเครียดที่เหลืออยู่ อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปเย็น หรือเพื่อต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการกลึง หรือไส สำหรับเหล็กบาง ชนิด การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่สำคัญมีอยู่ 2 ลักษณะ

8.2.2.1 การอบอ่อนเพื่อขจัดความเครียดเหลือค้าง (Stress-relief Annealing)

เป็นการอบอ่อนเพื่อมุ่งทำลายความเครียดในแท่งเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เช่น เหล็กที่ผ่านการรีด หรือผ่านการดึง จะทำให้กลุ่มอะตอมของเหล็กอยู่ในสภาพบิดเบี้ยว (Lattice distortion) ทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น และสูญเสียความเหนียว ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่เหมาะสำหรับที่จะทำการขึ้นรูปในขั้นต่อไป จะต้องทำการอบอ่อนขจัดความเครียดภายในเสียก่อน โดยเผาเหล็กไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่า Ac_1 50°C นี้สำคัญมากปกติจะใช้เวลา 1 ชั่วโมงต่อขนาดของชิ้นงาน 1 ลบ.นิ้ว (1 hr/inch³) แต่ถ้า Martensite Break Down เป็น α + Fe_3C (Sorbite) ถ้าต้องการที่จะใช้เวลาในการทำ Stress Relief นาน ก็จะต้องเผาเหล็กไปที่อุณหภูมิไม่เกิน 200°C

8.2.2.2 การอบอ่อนเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidizing (Spheroidize Annealing))

เป็นกรรมวิธีการอบอ่อนที่ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงประมาณ 0.7 – 1.2% C ซึ่งโครงสร้างของเหล็กจะประกอบไปด้วย Pearlite และ Proeutectoid Cementite ตามขอบเกรน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ เหล็กจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และอีกประการหนึ่ง คุณสมบัติทางด้านการกลึงหรือไส (Machinability) จะไม่ดี จะกลึงให้มีผิวเรียบได้ยาก เพราะปลายแหลมของมีดกลึง ในขณะที่ตัดจะผ่านเนื้อเหล็กอ่อน (Ferrite) และผ่านเนื้อเหล็กที่แข็ง (Cementite) ต้องทำให้ Proeutectoids Cementite เกิดลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง และ Eutectoid Cementite (ใน Pearlite) เกิดลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ (Spheroid) ไม่เป็นลักษณะแถบบาง ๆ (Lamellar) ซึ่งจะกระทำได้โดยการนำเหล็กไปเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{c1} เล็กน้อย ($730^{\circ} - 770^{\circ}C$) สำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% หรือถ้าเหล็กมีคาร์บอนอยู่ใกล้ระหว่าง 0.7 – 0.8% จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_{c1} เล็กน้อย แล้วปล่อยให้สูงขึ้นไปกว่า A_{c1} ทำสลับกันไปโดยใช้เวลาประมาณ 10 – 15 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นในอากาศ ในขณะที่เหล็กอยู่เหนืออุณหภูมิ A_{c1} เล็กน้อย Cementite ใน Pearlite จะขาดเสถียรภาพเกิดการขาดเป็นช่วง ๆ และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า A_{c1} Cementite ที่เกิดจากการแตกตัวของ Austenite จะไปรวมตัวกับ Cementite ที่เหลืออยู่ ทำให้ไม่เกิดเป็นแถบบาง ๆ และเหล็กถูกเผาให้อยู่ในช่วงนี้เป็นระยะเวลาานาน Cementite จะค่อย ๆ ปรับตัวในฟอร์มที่มีเสถียรภาพมากที่สุด คือ ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นเม็ดกลม ทำให้เหล็กมีทั้งความอ่อนตัว และความเหนียว การกลึง หรือไส จะได้ผิวเรียบเพราะในขณะที่มีดกลึงตัดผ่านจะไม่มีโอกาสตัดเม็ดกลมเล็ก ๆ ของ Cementite โดยเม็ดเล็ก ๆ ของ Cementite จะหลุดออกหรือไม่ก็เบนหลบไป ทำให้มีดกลึงตัดผ่านเฉพาะเนื้อเหล็ก (Ferrite) อย่างเดียว ไม่เกิดการสั่นที่ปลายมีดกลึง ทำให้ผิวเหล็กเรียบ

8.3 การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalizing)

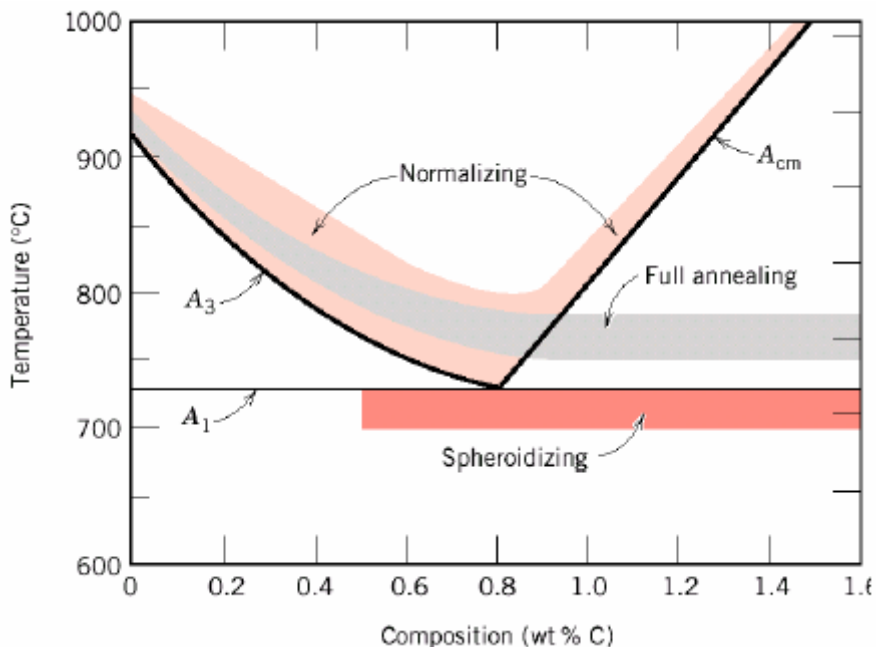
มีวัตถุประสงค์สำคัญหลายประการคล้ายคลึงกับการอบอ่อน คือ

- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น
- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการกลึง การไส หรือตัด
- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียว โดยเฉพาะสำหรับเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็น

- ปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอ และเหมาะสมสำหรับการชุบแข็งในขั้นต่อไป
- เป็นการทำลายความเครียดภายในที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น

จะเห็นได้ว่าการทำ Normalizing เป็นกรรมวิธีที่ใช้ทำกับงานสร้างชิ้นส่วน

เครื่องจักรกลโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน เช่น การรีด (Hot Rolling) หรือ การตีขึ้นรูป (Hot Forging) เหล็กจะถูกเผาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง จะได้เหล็กที่มีเกรนโต คุณสมบัติเชิงกลที่ดีจะเปลี่ยนไป (ทนแรงดึงแรงกระแทกได้น้อยลง) งานที่ผ่านการหล่อมากก็เช่นเดียวกันจะมีขนาดเกรนโต มีลักษณะเป็น Dendrite และไม่สม่ำเสมอ มีข้อเสียที่ควรจะต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เช่น การรีด (Cold Rolling) หรือการตีขึ้นรูป ทำให้โครงสร้างภายในของเหล็กจะเกิดการบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำ ทำให้เกิดความเครียดภายใน สูญเสียความเหนียว และมีความแข็งเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ สิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไป และปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยเฉพาะขนาดของเกรนของเนื้อเหล็กทำให้มีขนาดเล็กละเอียด และสม่ำเสมอได้ด้วยการทำ Normalizing ซึ่งจะเน้นในเรื่องของการปรับปรุงโครงสร้างมากที่สุด (Grain refinement)



ภาพที่ 8.2 อุณหภูมิของการอบปกติ

การทำ Normalizing ใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง Austenite ทั้งเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% หรือสูงกว่า 0.8% จะเผาอุณหภูมิเหนือเส้น A_{c3} สำหรับเหล็ก Hypo Eutectoid และที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} สำหรับเหล็ก Hyper Eutectoid ประมาณ 30°

– 50°C ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30 – 60 นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 มม. เช่นเดียวกับการอบอ่อน จากนั้นจะนำเหล็กออกจากเตาปล่อยให้เย็นในอากาศนิ่ง อัตราการเย็นตัวประมาณ 1 ° - 5 °C ต่อวินาที ถ้าเป็นการเป่าอากาศ อัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10 °C ต่อวินาที (การอบอ่อน อัตราการเย็นตัวประมาณ 5 ° - 10 °C ต่อวินาที)

อัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นจะมีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้น กล่าวคือ อัตราการเย็นตัวยิ่งเร็ว การเปลี่ยนแปลงจาก Austenite จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำลง จุด Eutectoid ของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงมาทางด้านคาร์บอนต่ำลงสำหรับ Hypo Eutectoid และจะย้ายไปทางด้านที่มีคาร์บอนมากขึ้นสำหรับเหล็ก Hyper Eutectoid ทำให้ปริมาณของ Pearlite เพิ่มขึ้น และความละเอียดของ Pearlite จะยิ่งดีขึ้น (เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ) ความละเอียดของ Pearlite หมายถึง แถบบาง ๆ ระหว่าง Ferrite และ Cementite จะแคบลง นอกจากนี้ Proeutectoid Ferrite ในเหล็ก Hypo Eutectoid จะมีปริมาณน้อยลง และเช่นเดียวกัน Proeutectoid Cementite ในเหล็ก Hyper Eutectoid จะน้อยลง และลักษณะการต่อเนื่องตามขอบเกรนจะลดน้อยลง คุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วย Pearlite มีความละเอียดเช่นนี้จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน จากที่กล่าวมาแล้วว่า การทำ Normalizing เป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอ เพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งในภายหลังนั้น ทั้งนี้เพื่อให้เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งมีคุณสมบัติที่ดี หลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้น ปกติเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการชุบแข็งมาก เพราะเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการชุบแข็งเหล็กจะมีความแข็งไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกัน และบางที่อาจจะเกิดการบิดหรือแตกร้าวได้ ยิ่งเป็นเหล็กที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ และปริมาณของธาตุที่ผสมขาดความสม่ำเสมอ การชุบแข็งอาจจะไม่ประสบผลดีตามที่ต้องการ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการคุณภาพของเหล็กจากการชุบแข็งสูง จึงสมควรทำการ Normalizing เสียขั้นหนึ่งก่อนแล้วจึงนำไปทำการชุบแข็ง

8.4 การชุบแข็ง (Hardening)

คือ การอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังจากการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีจะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็น Martensite หรือ Bainite ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

จาก Austenite ไปเป็น Martensite หรือ Bainite ซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการคือ

1. ปริมาณคาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ Austenite จะเปลี่ยนไปเป็น Martensite ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำ เหล็กควรจะมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่น ๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัม จะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของ Martensite จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน ดังตัวอย่างเช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 H_{RC} ตรงกันข้ามกับเหล็ก 0.02%C, 10%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 H_{RC}

2. อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็น Austenite ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็น Austenite หหมด เราจะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือ น้ำค้าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะ Martensite ที่ได้จะต้องมาจาก Austenite เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียส ไม่เหมือนอย่างเช่น Ferrite หรือ Cementite

3. อัตราการเย็นตัว เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ Austenite จะเปลี่ยนไปเป็น Martensite หรือ Bainite จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏคำว่า “อัตราการเย็นตัววิกฤติ (Critical cooling rate)” หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ Austenite เปลี่ยนไปเป็น Martensite หรือ Bainite ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ Austenite จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็น Martensite หรือ Bainite แต่จะได้ Pearlite หรือ Sorbite แทน

8.4.1 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

Hardening Temperature แบ่งออกตามส่วนผสมของคาร์บอนดังนี้

1. Hypo Eutectoid Steels Hardening Temp จะอยู่ที่เหนือ Ac₃ ประมาณ 50°C ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างที่เป็น Austenite ทั้งหมด ถ้าพิจารณาในกรณี que อุณหภูมิต่ำกว่านี้ และอยู่ในช่วง Ac₁ – Ac₃ จะปรากฏมี Ferrite เหลืออยู่บางส่วน ถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ Austenite จะเปลี่ยนเป็น Martensite แต่ Ferrite จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยังคงสภาพอยู่เช่นเดิม เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งแล้วจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควร และบริเวณโครงสร้างที่เป็น Ferrite จะเป็นบริเวณที่อ่อน (Soft spots) ขาดคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียดสี

ในกรณีถ้าเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac₃ ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างของ Austenite ที่มีเกรนโต ภายหลังการชุบน้ำจะได้ Martensite ที่หยาบ (Coarse

martensite) ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่ง ชีงงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวดังง่าย

2. Hyper Eutectoid Steels

จะใช้อุณหภูมิเหนือดเส้น A_{c1} ประมาณ $30 - 50^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น จะเห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของ Proeutectoid Cementite เหลืออยู่บางส่วนเท่านั้น ที่กลายเป็น Austenite และ Cementite เหลืออยู่จะกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของ Austenite เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของ Martensite โดยมี Proeutectoid Cementite แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผลดีในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งแรงสูง และทนการเสียดสีในขณะใช้งานได้ดี ทั้งนี้เพราะ Proeutectoid Cementite มีความแข็งประมาณ $700 - 800\text{ H}_B$ ซึ่งแข็งกว่า Martensite ($650 - 700\text{ H}_B$) ประเด็นที่สำคัญคือ จะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิด Proeutectoid Cementite ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

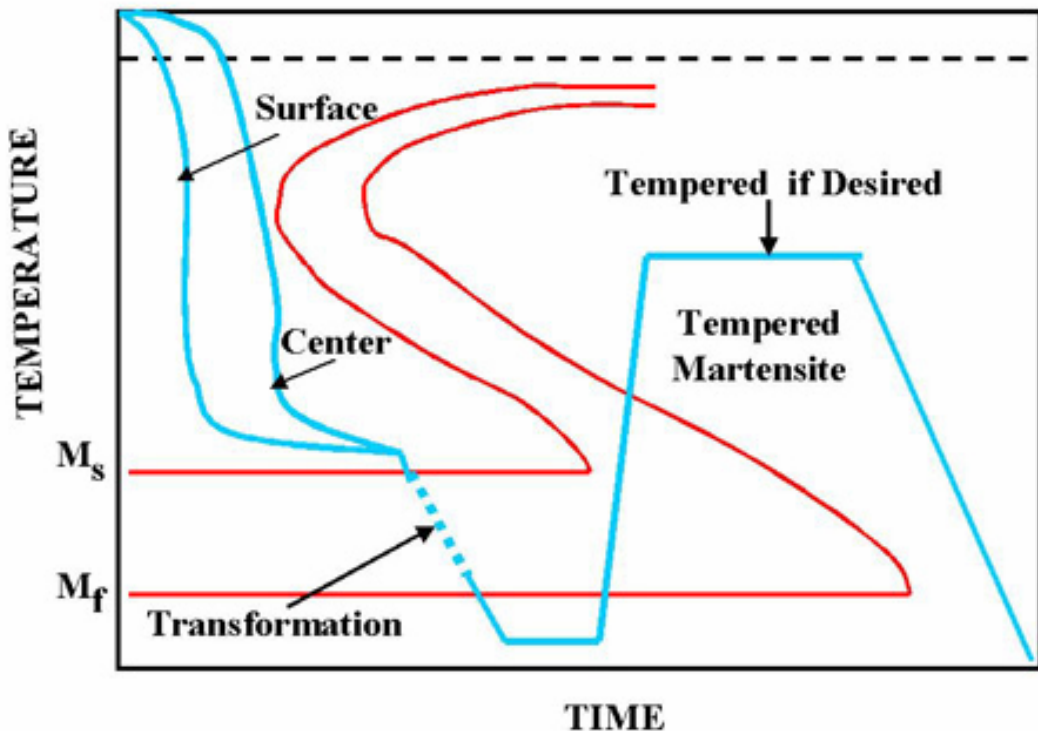
ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือดเส้น A_{c_m} จะไม่เกิดผลดี นอกจากต้องใช้เวลาชุบมากชิ้นแล้ว Austenite จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมาก จะทำให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดี เพราะจะได้ Martensite เกรนหยาบ ทนแรงกระแทกได้ไม่ดี และยังคงเกิดการบิดงอและแตกร้าวดังง่าย

8.5 การชุบแข็งมาร์เทมเปอริง (Martempering)

เป็นการชุบแข็งลักษณะหนึ่งที่มีงานชุบที่มีรูปร่างซับซ้อนมีความหนาบางแตกต่างกันมาก ซึ่งถ้าเป็นการชุบด้วยกรรมวิธีปกติ เหล็กอาจเกิดการบิดงอ หรือเกิดความเครียดอันเนื่องมาจากการเย็นตัวเร็ว ทำให้แตกร้าวดังง่าย การชุบแข็งแบบ Martempering จะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็น Martensite เช่นเดียวกับการชุบแข็งด้วยวิธีปกติ อุปกรณ์ที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากกรรมวิธีชุบแข็งทั่วไปแล้ว จะต้องใช้อ่างเกลือหลอมละลาย (Salt bath) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 400°C ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เกลือโซเดียมไนเตรด กับโปแตสเซียมไนเตรด ($40 - 50\%$) เกลือผสมนี้จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 145°C มีช่วงการใช้งานอยู่ระหว่าง $160 - 650^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ยังต้องอาศัยแผนภูมิ T.T.T. ของเหล็กที่ต้องการชุบแข็ง มาประกอบกับการชุบแข็งด้วย เพราะแผนภูมิ T.T.T. จะเป็นเสมือนแผนที่นำทางให้การชุบแข็งประสบผลตามความมุ่งหมาย

การชุบแข็งจะเริ่มโดยการเผาเหล็กจนร้อนถึงอุณหภูมิในช่วง Austenite คือ เหนือเส้น Ac_1 หรือ Ac_3 ประมาณ 50°C ภายหลังจากที่ทิ้งไว้จนอุณหภูมิของแท่งเหล็กเท่ากันทั้งภายนอกและภายในแล้ว จะนำออกมาจากเตา แล้วชุบในอ่างเกลือที่อุณหภูมิเหนือเส้น M ที่ปรากฏในแผนภูมิ T.T.T. จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้เพื่อให้มีการปรับอุณหภูมิระหว่างผิว กับภายในให้เท่ากัน ระยะเวลาหนึ่ง โดยที่เวลาจะไม่ยาวจนถึงจุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็น Bainite จะต้องนำเอาชิ้นเหล็กขึ้นมาจากอ่างเกลือก่อนถึงจุดนั้นนำไปชุบในอ่างน้ำทันทีเพื่อให้โครงสร้าง Austenite เปลี่ยนไปเป็น Martensite จากนั้นจะต้องนำไปอบคืนตัวในขั้นต่อไปเพื่อลดความเครียด ลักษณะการทำงานจะเป็นไปดังภาพที่ 8.3

MARTEMPERING



ภาพที่ 8.3 Cooling Curve for Martempering

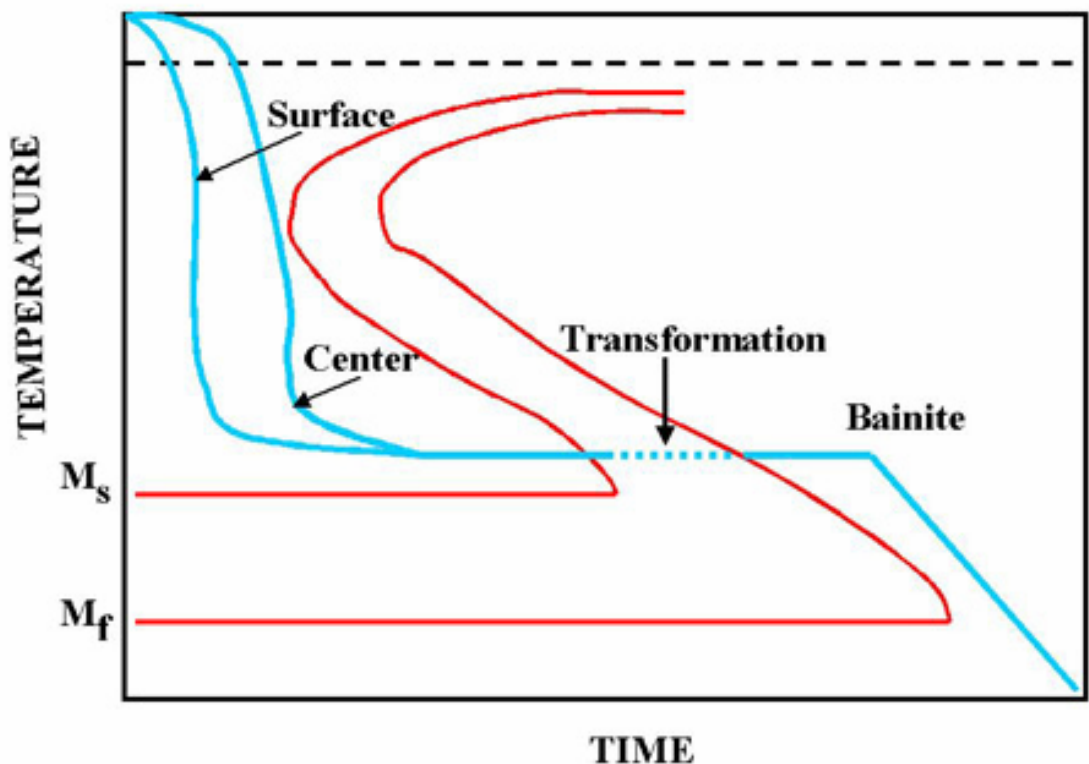
8.6 การชุบแข็งออสเทมเปอริง (Austempering)

การชุบแข็งมีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธี Martempering ส่วนแตกต่างจะอยู่ที่โครงสร้างสุดท้ายที่ต้องการ คือ โครงสร้างแบบ Bainite อาจจะเป็น Bainite แบบขนนก หรือแบบอซิคูล่า

ซึ่งอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิที่จะปล่อยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง อุณหภูมิที่ใช้คงมีลักษณะเหมือนกัน

ขั้นตอนของการชุบแข็ง Austempering จะเริ่มตั้งแต่การเผาเหล็กจนเปลี่ยนเป็น Austenite หมด จากนั้นนำออกจากเตาเผา ชุบขึ้นเหล็กในอ่างเกลือหลอมละลาย ถ้าต้องการ Bainite ชนิดบน (Upper Bainite) อุณหภูมิอ่างเกลือหลอมละลายจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 500 - 600 °C ถ้าต้องการ Bainite ชนิดล่าง (Lower Bainite) จะควบคุมอุณหภูมิของอ่างเกลือให้อยู่ในช่วง 400 - 500 °C เมื่อชุบแท่งเหล็กลงในอ่างเกลือ แล้วจะทิ้งไว้ระยะเวลาที่ยาวจนแน่ใจว่าระยะเวลาหนพอที่การเปลี่ยนแปลงของ Austenite ไปเป็น Bainite จะสิ้นสุดอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถกำหนดระยะเวลาได้จากแผนภูมิ T.T.T เมื่อเวลาผ่านไปตามกำหนด แล้วจึงนำชิ้นเหล็กออกจากอ่างเกลือ ปล่อยให้เย็นในอากาศ ไม่จำเป็นต้องทำการชุบน้ำอีก เพราะในช่วงที่ชิ้นเหล็กถูกนำขึ้นมาจากอ่างเกลือแล้ว จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแต่อย่างใด ขั้นตอนการทำงานจะปรากฏดังภาพที่ 8.4

AUSTEMPERING



ภาพที่ 8.4 Cooling Curve for austempering

8.7 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย Martensite และ Austenite เหลือค้าง (Residual austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูง จะมี Proeutectoid Cementite กระจัดกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง คุณสมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งแรงสูง แต่จะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impact strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะใช้งานได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไป หรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้ Martensite แยกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุลย์ (Tempered Martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อคุณสมบัติของเหล็ก ดังเช่น ความแข็งแรงจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้

การอบคืนตัว เป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังจากเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นช้า ๆ ภายในเตา การเปลี่ยนแปลงของ Martensite และ Austenite เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลย์จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก (80 - 200 °C) โครงสร้าง Martensite จะแยกตัวให้โครงสร้าง Ferrite ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% การคาร์ไบด์ชนิดเอพซีลอน (ϵ carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์ และ Ferrite (0.25%C) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง (200 ° - 280 °C) โครงสร้าง Austenite ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น Martensite ได้ทันในขณะชุบแข็ง (Retained austenite) จะแยกตัวให้โครงสร้าง Ferrite (0.025%C) และ Cementite (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจัดกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับ Bainite ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม (300 ° - 500 °C) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดย Ferrite (Pseudo cubic) จะแยกตัวให้ Ferrite (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และ Cementite ส่วน ϵ -carbide

จะเปลี่ยนเป็น Cementite (Fe_3C) โครงสร้างที่จะได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียด และกระจายมีลักษณะคล้าย Sorbite

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500°C ขึ้นไปจนถึง A_1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้ากับสภาพสมดุลย์ และมีการขยายตัวของ Ferrite และ Cementite โตขึ้น ความแข็งจะลดลงมาก โดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรต์ไดซ์ซิง (Incomplete annealing)

จากการทดลองอบคืนตัวเหล็ก Eutectoid (0.8% C) ที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ปรากฏได้ว่า ความแข็งลดลงจากความแข็งภายหลังการชุบแข็ง ($64 R_c$) อบคืนตัวอุณหภูมิช่วงแรก 1 ชั่วโมง ได้ความแข็ง $60 - 64 R_c$ ช่วงที่สองได้ความแข็ง $40 - 60 R_c$ ช่วงที่สามความแข็ง $20 - 40 R_c$ และช่วงที่สี่เหลือความแข็ง $5 - 10 R_c$

ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิดำเนินการอบคืนตัวออกเป็น 3 ช่วงคือ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ ($150^\circ - 250^\circ\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายใน และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามรักษาระดับความแข็งไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็ง เวลาที่ใช้ประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง ($350^\circ - 450^\circ\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงและมีคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูง ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำแหวนสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับ Bainite หรือ Troostite

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง ($500^\circ - 650^\circ\text{C}$) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูง โดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย โครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็น Pearlite ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้าง Sorbite

8.8 การชุบแข็งเฉพาะผิว (Surface Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิว เป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อเหล็กภายในได้ผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิมซึ่งมีความเหนียวสูง ความมุ่งหมายก็เพื่อต้องการให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะใช้งาน ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก นับเป็นกรรมวิธีชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนดีกว่าการชุบแข็งตามที่ได้กล่าว

มาแล้ว เพราะการชุบแข็งโดยวิธีที่กล่าวมาแล้วแม้จะได้ความแข็งที่ผิวสูงก็ตาม แต่จะสูญเสียความเหนียวของเหล็ก การทำ Tempering จะช่วยเพิ่มความเหนียวได้บ้าง แต่กลับจะต้องสูญเสียความแข็งไปบ้าง ยกเว้นเหล็กผสมสูงบางชนิดที่ทำให้ได้คุณภาพทั้งความแข็งและความเหนียว แต่เหล็กผสมสูงส่วนมากราคาจะแพง ดังนั้นจะเห็นว่าการชุบแข็งพื้นผิว จึงนับว่าเป็นกรรมวิธีชุบแข็งที่น่าสนใจมากในด้านความประหยัด และได้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ดีมีคุณภาพพร้อมทั้งความแข็งผิวและความเหนียว ตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมทำการชุบแข็งผิว ได้แก่ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาขารวลิ้น เฟืองเกียร์ และอื่น ๆ การชุบแข็งพื้นผิวกระทำได้หลาย ๆ วิธีดังต่อไปนี้

8.8.1 การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Carburizing หรือ Case Hardening

เหล็กที่ชุบแข็งพื้นผิวด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 0.1 – 0.2% และอาจจะมีธาตุบางตัว เช่น นิเกิล โครเมียม วานาเดียม ผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็ก ปกติเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดา เพราะมีคาร์บอนน้อย จะไม่มีโอกาสได้โครงสร้าง Martensite แต่เหล็กชนิดนี้จะมีความเหนียวสูง ทนได้ดีต่อแรงบิดและแรงกระแทก หลักในการชุบด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณ 0.8% ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีคุณสมบัติชุบแข็งดีที่สุด หลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบ เพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวต่อไป

วิธีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กมี 3 ลักษณะด้วยกันคือ

8.8.1.1 การเพิ่มโดยใช้สารเพิ่มคาร์บอนในสภาพของแข็ง (Solid Carburizing)

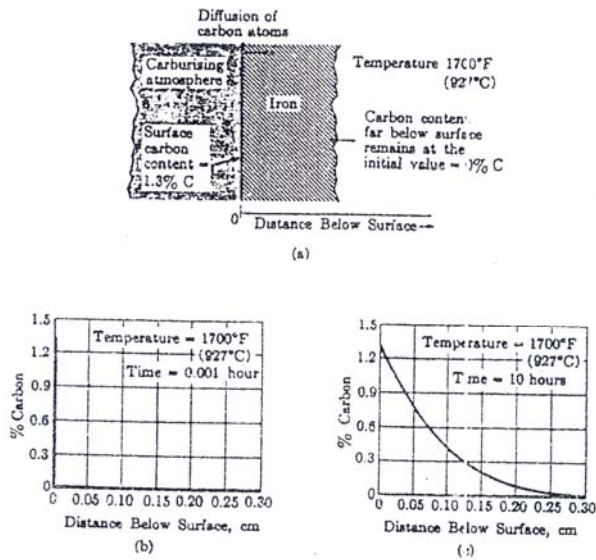
สารเพิ่มคาร์บอนที่ใช้ ได้แก่ ผงถ่านไม้ (Charcoal) ประมาณ 70 – 80% โดยน้ำหนัก ผสมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Energizer) ได้แก่ ผงแบเรียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมคาร์บอเนต รวมกันอีกประมาณ 20 – 30% ดังตัวอย่างเช่น

ถ่านไม้	74 – 78%
BaCO ₃	12 – 15%
Na ₂ CO ₃	1 – 1.5%
CaCO ₃	3 – 5%

น้ำมันหรือน้ำเหลือน้ำตาล (Molasses) 4.5 – 55% (เพื่อช่วยให้ยึดตัวได้แน่น) นำเอาแท่งเหล็กที่จะชุบผิวแข็งมาบรรจุในหีบเหล็ก หรือภาชนะเคลือบที่ทนความร้อนโดยอัดผงสาร

เพิ่มคาร์บอนให้รอบแท่งเหล็ก และอัดให้แน่นถ้ามีแท่งเหล็กหลาย ๆ ชิ้นบรรจุในหีบใบเดียวกัน จะต้องวางให้ห่างกันประมาณ 20 – 25 มม. หรือจะมากกว่านี้ก็ไม่มีผลเสีย เมื่อบรรจุและอัด ผงสารเพิ่มคาร์บอนจนแน่นดีแล้วจะต้องมีฝาปิดอย่างมิดชิด โดยใช้ดินทนไฟยาตามรอยให้สนิทเพื่อป้องกันมิให้อากาศแทรกเข้าไปทำการเผาไหม้กับคาร์บอนได้

จากนั้นนำเอาหีบเหล็กไปเผาในเตาช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิระหว่าง 900° - 950° C เวลาที่ใช้ในการเพิ่มปริมาณคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเหล็กที่จะชุบแข็งผิว และที่สำคัญก็คือ ความหนาของผิวแข็งที่ต้องการ ตามปกติถือหลักปฏิบัติง่าย ๆ คือ จะเผานาน 1 ชั่วโมงต่อ ความหนาของผิวแข็ง 0.1 มม. แต่ปริมาณคาร์บอนที่ผิวและใต้ผิวจนถึงใจกลางจะลดลงโดยลำดับ ดังภาพที่ 8.5



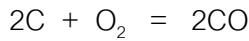
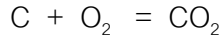
The diffusion of carbon in iron during carburizing. (a) Schematic representation of the procedure used in carburizing an iron plate. (b) Carbon penetration curve near the beginning of the carburizing process, and (c) after 10 hours.

ภาพที่ 8.5 แสดงลักษณะการแพร่ซึมของคาร์บอนเข้าสู่ผิวของแท่งเหล็ก ระหว่างการทำ Carburizing

ความหนาผิวแข็ง (Case depth) คือ ความหนา หรือความลึกของผิวแข็ง ที่มีความแข็งสูงกว่า 500 H_v หรือประมาณ 500 H_B การวัดความหนาผิวนี้อาจวัดจากแท่งเหล็กตัวอย่าง หลังจากทำการชุบแข็งผิวแล้วจะตัดหรือตีหัก แล้วขัดให้เรียบเพื่อสะดวกต่อการวัดความแข็ง จากผิวลึกเข้ามาภายใน จากนั้นนำไปเขียนกราฟระหว่างความแข็งกับระยะที่ห่างจากผิว ระยะจากผิวลึกเข้ามาจนถึงระดับความแข็ง 550 H_v คือ ค่าความหนาผิวแข็ง ซึ่งค่าความหนาผิวแข็งนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำ Carburizing ดังรูปที่ 8.6 และ 8.7

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะทำ Carburizing

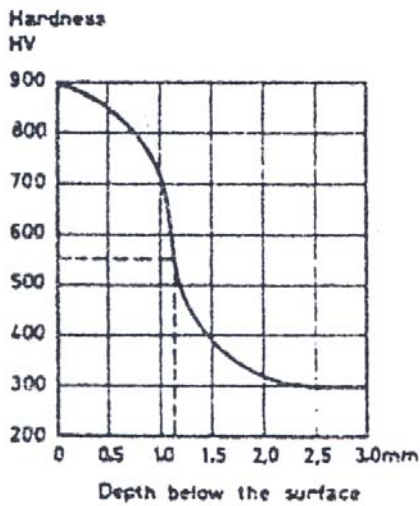
ในขณะที่ที่หีบบรรจุผงสารเพิ่มคาร์บอนกับแท่งเหล็กถูกเผาที่อุณหภูมิสูง อากาศหรือออกซิเจนที่แทรกอยู่ระหว่างผงสารเพิ่มคาร์บอนจะรวมตัวกับผงถ่านทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังปฏิกิริยา



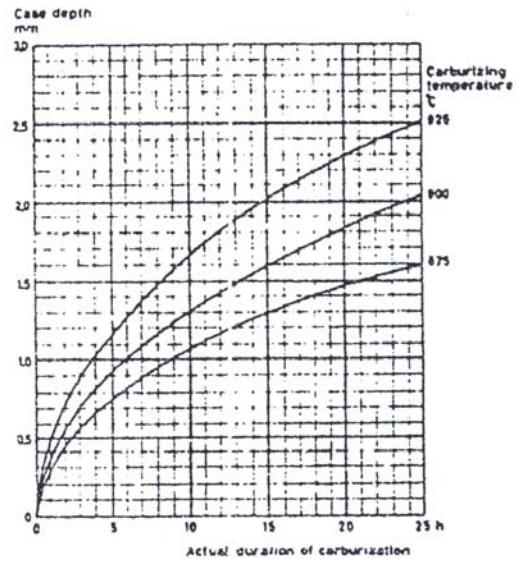
และก๊าซ CO₂ เมื่อสัมผัสกับผงถ่านก็จะให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังปฏิกิริยา



เมื่อก๊าซ CO สัมผัสกับผิวของเหล็กจะทำให้เกิดอะตอมของคาร์บอนแรกเกิด (2CO = CO₂ + C_{at}) ซึ่งจะแพร่ซึม (Diffuse) เข้าสู่ผิวเหล็กโดยปฏิกิริยา 3Fe(γ) + C_{at} = Fe₃C

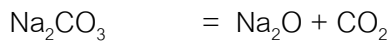
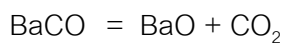


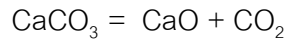
ภาพที่ 8.6 แผนภูมิแสดงระดับความแข็งจากผิวถึงภายใน และการหาค่าความหนาของผิวแข็ง



ภาพที่ 8.7 ความหนาของผิวแข็งสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ

สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ BaCO₃, Na₂CO₃ หรือ CaCO₃ เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะแตกตัวให้ก๊าซ CO₂ ดังปฏิกิริยา





ซึ่งก๊าซ CO_2 จะรวมกับผงถ่านกลายเป็นก๊าซ CO และเมื่อสัมผัสกับผิวเหล็กก็จะแตกตัวให้อะตอมของคาร์บอนแรกเกิดกับก๊าซ CO_2 และก๊าซ CO_2 ก็จะรวมตัวกับคาร์บอนให้ก๊าซ CO วนเวียนไปดังนี้จนกว่าจะได้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงตามที่ต้องการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา ดังที่กล่าวมาแล้ว

จะเห็นได้ว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยา จะเป็นตัวเพิ่มปริมาณก๊าซ CO_2 ให้เกิดขึ้นภายในหีบที่ปิดสนิท ซึ่งจะช่วยให้เกิดก๊าซ CO และแตกตัวให้อะตอมของคาร์บอนแรกเกิดเพิ่มมากขึ้น อันเป็นการช่วยทำให้เวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวสั้นลง แต่จากผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สารเร่งปฏิกิริยามากเกินกว่า 10% ความหนาของผิวแข็งที่ได้จะไม่เพิ่มขึ้นมากและมีแนวโน้มให้ค่าความหนาผิวแข็งคงที่

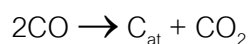
8.8.1.2 การชุบแข็งผิวโดยใช้ก๊าซ (Gas Carburizing)

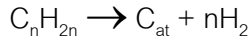
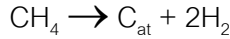
การชุบแข็งผิวโดยการเพิ่มคาร์บอน ด้วยวิธีใช้ก๊าซมีข้อที่ดีกว่าการใช้ของแข็งอยู่หลายประการ เช่น เวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวจะสั้นกว่า เพราะไม่ต้องเสียเวลาไปเผาหีบ (case) และสารตัวเพิ่มคาร์บอนที่เป็นของแข็งซึ่งเป็นฉนวนความร้อน สามารถใช้เตาที่มีเนื้อที่เล็กกว่า การควบคุมปริมาณคาร์บอน และความหนาของผิวแข็งทำได้แน่นอนกว่า ประการสุดท้ายก็คือ ลดแรงงานในการบรรจุเหล็กลงหีบ และรื้อออกเมื่อสำเร็จ

ก๊าซที่ใช้เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนจะใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ที่สำคัญได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ (ก๊าซมีเทน CH_4) ซึ่งก๊าซชนิดนี้จะต้องมีความบริสุทธิ์มาก เพราะถ้ามีน้ำมันติดเข้ามาจะทำให้เกิดเขม่าของน้ำมันที่เผาไหม้และไปจับตามบริเวณผิวของแท่งเหล็ก อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่สามารถแพร่ซึมผ่านผิวเหล็กได้ การชุบแข็งผิวจะได้ผลไม่ดี

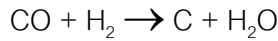
หลักในการชุบแข็งผิวแบบก๊าซนี้ จะใช้เตาที่ปิดมิดชิด อาจจะเป็นชนิดบรรจุเหล็กทีละครั้ง หรือแบบต่อเนื่อง โดยสายพานเหล็กทนความร้อน เป็นตัวพาแท่งเหล็กให้เคลื่อนผ่านเตาในอัตราช้า ๆ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ $900^\circ - 950^\circ\text{C}$ ภายในเตาจะปล่อยให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนให้ไหลผ่านในอัตราที่พอเหมาะเพื่อให้ได้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวเหล็กตามที่กำหนด คือ ควรจะได้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวประมาณ 0.8%

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้คือ



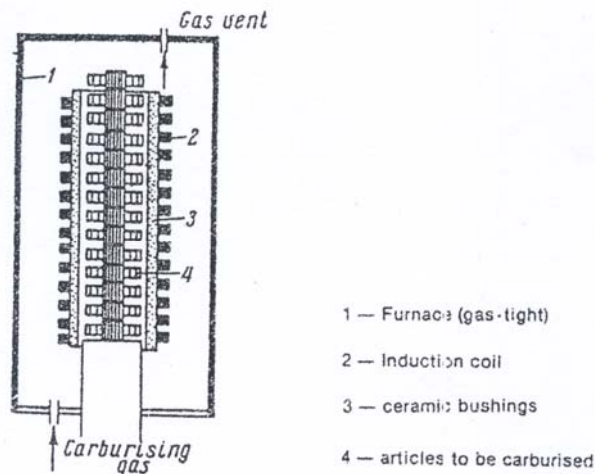


นอกจากปฏิกิริยาที่เกิดดังกล่าวแล้ว จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวระหว่าง CO กับ H₂ ให้ไอน้ำและคาร์บอนอะตอม



เมื่อเราทราบปริมาณของคาร์บอนที่ผิวของแท่งเหล็ก ทราบอุณหภูมิของการชุบแข็งผิว เราสามารถควบคุมปริมาณของ CO และ H₂ ของก๊าซที่เป็นตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้โดยทางปฏิบัติ ในตอนแรกจะผสมก๊าซตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนในปริมาณที่สูง และจะค่อย ๆ ลดลง จนถึงช่วงสุดท้ายจะไม่มาผสมก๊าซตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนเลย ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิด Cementite ตามบริเวณขอบเกรน (Proeutectoid Cementite) จะทำให้เหล็กแตกง่ายในขณะชุบแข็ง ปกติเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวด้วยก๊าซนี้จะสั้นกว่าการใช้ของแข็งเล็กน้อย ทำให้เหล็กที่ได้มีเกรนเล็ก

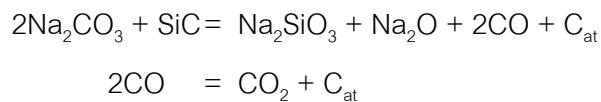
มีวิธีที่พัฒนาขึ้นมาในระยะเวลาไม่นาน โดยการเผาเหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ (Induction) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 °C ให้ร้อนแต่บริเวณผิว ทั้งเหล็กและขดลวดทองแดงเหนี่ยวนำจะอยู่ในเตาปิดมิดชิด โดยมีท่อปล่อยให้ก๊าซเพิ่มคาร์บอนผ่านเข้าด้านหนึ่ง และผ่านออกอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้สามารถทำการชุบแข็งผิว ได้ความหนาของผิวแข็ง 0.8 – 1 มม. ใช้เวลาเพียง 30 – 40 นาที



ภาพที่ 8.8 แสดงอุปกรณ์และวิธีการชุบแข็งผิวด้วยก๊าซโดยใช้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

8.8.1.3 การชุบแข็งผิว โดยใช้สารเพิ่มคาร์บอนที่เป็นของเหลว (Liquid Carburizing)

การชุบแข็งผิวดังวิธีนี้ สารเพิ่มคาร์บอนจะเป็นเกลือระหว่าง NaCl 10 – 15% ผสมกับ Na_2CO_3 75 – 85% หลอมในเบ้าหลอมให้ละลายที่อุณหภูมิ 850 - 900 °C ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ประมาณ 6 – 10% ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเบ้าหลอมจะเป็นดังนี้



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่า NaCl ไม่มีบทบาทอะไร เพียงแต่เป็นตัวช่วยให้โซเดียมคาร์บอเนตหลอมละลายได้ง่าย NaCl ทำหน้าที่เป็น Flux ส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จะลอยขึ้นที่ผิวกลายเป็นสแลก (Slag)

สำหรับก๊าซ CO ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวให้อะตอมของคาร์บอนแรกเกิดกับก๊าซ CO_2 จะเห็นได้ว่าจากปฏิกิริยามีอะตอมคาร์บอนแรกเกิด ทั้งจากปฏิกิริยาโดยตรงและจาก CO ทำให้การชุบแข็งผิวดังวิธีนี้ใช้เวลาสั้นกว่าใช้ก๊าซในแบบธรรมดา แต่จะต้องเคยเติมเกลือโซเดียมคาร์บอเนต และซิลิกอนคาร์ไบด์ลงไปอย่างเกลือเป็นระยะ ๆ

วิธีการชุบแข็งด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก เพียงแต่จุ่มแท่งเหล็กลงในอ่างเกลือหลอมละลายในเวลาที่เหมาะสม แล้วนำเอาแท่งเหล็กไปชุบน้ำได้ทันที จะเห็นว่าการชุบแข็งผิวดังวิธีนี้มีผลดีตรงที่แท่งเหล็กจะร้อนสม่ำเสมอ การบิดตัวของแท่งเหล็กมีน้อย และสามารถชุบแข็งได้ทันทีจากอ่างเกลือ ส่วนเวลาที่ใช้นั้นเร็วกว่าใช้ก๊าซ ดังตัวเลขที่แสดง

ความหนาของผิวแข็ง (มม.)	0.2	0.25	0.35	0.4	0.5
เวลาที่ใช้ (ช.ม.)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0

8.9 การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Cyaniding

การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Cyaniding เป็นกรรมวิธีเพิ่มทั้งปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนตามบริเวณผิวเหล็กโดยการใช้อ่างเกลือหลอมเหลว (Salt bath) ของโซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) หรือโปแตสเซียมไซยาไนด์ (KCN) หรือบางทีก็อาจจะใช้แคลเซียมไซยาไนด์ [$\text{Ca}(\text{CN})_2$] ขึ้นอยู่กับลักษณะของกรรมวิธี

การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Cyaniding ใช้วิธีการหลอมเกลือไซยาไนด์ผสมกับเกลือที่เป็นกลาง (Neutral salt) ได้แก่ NaCl และ Na_2CO_3 ตามสัดส่วนต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้

เมื่อหลอมเกลือละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามต้องการแล้ว จะนำเหล็กที่ต้องการชุบแข็งผิวมาเผาจนร้อนที่อุณหภูมิ $100^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$ ก่อน แล้วจึงจุ่มลงไปในอ่างเกลือเพื่อให้อะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนแพร่ซึมเข้าไปจนได้ทั้งปริมาณและความหนาพอกับความต้องการ (ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิของอ่างเกลือ) จากนั้นจึงเอาชิ้นเหล็กขึ้นจากอ่างเกลือ แล้วนำไปชุบน้ำ ต่อจากนี้อาจจะต้องนำชิ้นเหล็กที่มีผิวแข็งไปทำการอบคืนตัว (Temper) อีกครั้งหนึ่ง

การชุบแข็งผิวโดยวิธี Cyaniding แบ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของการทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature Cyaniding)

ใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งอยู่ระหว่าง $550^{\circ} - 600^{\circ}\text{C}$ เกลือที่ใช้มีส่วนผสม 30 – 40% NaCN, 20 – 45% Na_2CO_3 และ 10 – 20% NaCl เนื่องจากเป็นการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 0.2 – 0.04 มม. เวลาที่ใช้ประมาณ 5 – 30 นาที ความมุ่งหมายในการทำที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อต้องการให้อะตอมไนโตรเจนแพร่ซึมเข้าสู่ผิวเหล็กได้มากกว่าคาร์บอน เพราะต้องการความแข็งที่ผิวสูงและมีประสิทธิภาพความผิวดำ เหมาะสำหรับการชุบแข็งผิวเหล็กที่ใช้ทำเครื่องมือตัด ดังเช่น เหล็ก Hi-Speed

2. การชุบแข็งที่อุณหภูมิปานกลาง (Medium temperature Cyaniding)

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง $750^{\circ} - 850^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ส่วนผสมเกลือ 20 – 50% NaCN ผสมกับเกลือที่เป็นกลาง NaCl และ Na_2CO_3 ความหนาของผิวแข็งจะได้ประมาณ 0.075 – 0.25 มม. โดยใช้เวลาประมาณ 5 – 9 นาที ปริมาณของคาร์บอนและไนโตรเจนที่บริเวณผิวจะอยู่ระหว่าง 0.6 – 0.8% C และ 0.4 – 0.5% N ภายหลังจากการชุบแข็งผิวแล้วจะได้รับความแข็งของผิวเหล็กประมาณ 55 – 60 H_{RC} เหมาะสำหรับการชุบผิวแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่ว ๆ ไป ที่ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และคาร์บอนปานกลาง เช่น พวกเฟืองเกียร์ สกรูนอต และอื่น ๆ

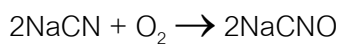
3. การชุบแข็งผิวที่อุณหภูมิสูง (High temperature Cyaniding)

มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงประมาณ 0.5 – 1.5 มม. โดยใช้เวลานั้น เมื่อเทียบกับการทำ Carburizing อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ $900^{\circ} - 950^{\circ}\text{C}$ อ่างเกลือประกอบด้วย 6 – 10% NaCN, 80 – 84% BaCl_2 และประมาณ 10% NaCl บางที่อาจจะใช้ $\text{Ca}(\text{CN})_2$ แทนก็ได้ เพราะราคาถูกกว่า เวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวประมาณ 5 ชั่วโมง (ถ้าเป็นการทำ Carburizing จะใช้เวลา 10 ชั่วโมง) ปริมาณของคาร์บอนและไนโตรเจนที่ผิวจะได้ประมาณ 1.0 – 1.2% C และ 0.2 – 0.3% N ภายหลังจากการชุบแข็งผิวแล้วจะต้องทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200°C เนื่องจากที่ผิวมี

ปริมาณคาร์บอนสูง อาจจะได้ Retained Austenite อยู่บ้างภายหลังการชุบน้ำทำให้ความแข็งที่ได้ต่ำกว่าผิวที่อยู่ลึกลงไปเล็กน้อย

ปฏิกิริยาของเกลือขณะทำ Cyaniding

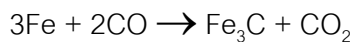
ขั้นแรก เกลือไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากบรรยากาศให้ไซยาเนตของโซเดียมหรือโปแตสเซียม ปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณผิวของเกลือที่สัมผัสกับอากาศ ดังปฏิกิริยา



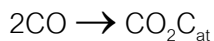
และไซยาเนตของโซเดียมจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะให้อะตอมของไนโตรเจนแรกเกิดกับก๊าซ CO และโซเดียมคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยา



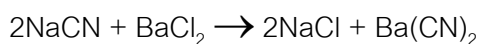
เมื่อก๊าซ CO สัมผัสกับผิวเหล็กที่อยู่ในอ่างเกลือ แสงเหล็กจะดึงอะตอมของคาร์บอนเข้าไปรวมตัวตามบริเวณผิวให้ Cementite ดังปฏิกิริยา



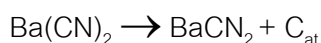
บางทฤษฎีจะกล่าวถึงก๊าซ CO แยกตัวให้อะตอมคาร์บอนแรกเกิดก่อน แล้วจึงแพร่ซึมเข้าสู่ผิวเหล็ก ดังปฏิกิริยา



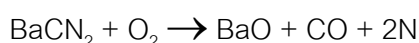
การทำ Cyaniding ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดจะแตกต่างออกไปจากที่กล่าวมาแล้ว ตามปกติมักจะเกิด Na_2CO_3 ถ้าทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ $900^\circ - 950^\circ\text{C}$ ปริมาณของ Na_2CO_3 ที่เกิดจะรวมตัวกันมีปริมาณมาก ซึ่ง Na_2CO_3 จะมีผลในการกันไม่ให้อะตอมของคาร์บอนแพร่ซึมเข้าสู่ผิวเหล็ก จึงต้องผสม BaCl_2 ลงไปในอ่างเกลือเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Na_2CO_3 และ BaCl_2 จะมีส่วนช่วยให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยจะให้อะตอมคาร์บอนปริมาณสูงกว่าไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยา



ซึ่งแบเรียมไซยาไนด์ไม่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง จะแตกตัวให้อะตอมคาร์บอนแรกเกิดกับแบเรียมไซยาไนด์



สำหรับ BaCN_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาจะรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศให้อะตอมไนโตรเจนแรกเกิดกับก๊าซ CO และแบเรียมออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



ซึ่งก๊าซ CO จะแตกตัวให้อะตอมคาร์บอนแรกเกิดเป็นขั้นสุดท้าย หรือก๊าซ CO อาจจะทำปฏิกิริยากับเหล็ก ให้ Cementite ดังที่กล่าวมาแล้ว

8.10 การชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธี Carbonitriding

Carbonitriding คือ วิธีการชุบแข็งพื้นผิวโดยการเพิ่มปริมาณทั้งคาร์บอนและไนโตรเจน บริเวณผิวเหล็กพร้อม ๆ กัน คล้ายคลึงกับการทำ Cyaniding ผิดแต่การทำ Carbonitriding สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจน จะเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซ Carburizing (ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม) ประมาณ 70 – 80% โดยปริมาตร กับก๊าซแอมโมเนียประมาณ 20 – 30% หรืออาจกล่าวได้ว่า การทำ Carbonitriding เป็นการทำให้ Carburizing ด้วยก๊าซพร้อม ๆ กับการทำ Nitriding

การทำ Carbonitriding แบ่งช่วงอุณหภูมิในการทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. Carbonitriding ที่อุณหภูมิต่ำ ($540^{\circ} - 560^{\circ}\text{C}$) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งที่ผิวสูงประมาณ $950 - 1100 \text{ H}_v$ แต่ความหนาของผิวแข็งน้อยซึ่งอยู่ระหว่าง $0.02 - 0.04$ มม. และใช้เวลาในการทำงานประมาณ 30 นาที ถึง 3 ชั่วโมง เหมาะสำหรับชุบแข็งผิวอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการตัด (Cutting tool) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูง เช่น มีดตัดโลหะชนิดหมุน (Milling cutter) ดอกสว่าน (Twist drills) และอุปกรณ์สำหรับทำเกลียว เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการความแข็งที่ผิวสูง และสัมประสิทธิ์ความเค้นต่ำ การทำ Carbonitriding ที่อุณหภูมิต่ำไม่ต้องทำการชุบน้ำ เพราะความแข็งที่ได้จะเป็นผลจากไนโตรเจน ส่วนคาร์บอนมีปริมาณน้อย

2. Carbonitriding ที่อุณหภูมิปานกลาง ($840^{\circ} - 860^{\circ}\text{C}$) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูง โดยจะต้องใช้เวลาประมาณไม่เกิน 10 ชั่วโมง จะได้ความหนาของผิวแข็งสูงประมาณ 1 มม. จะใช้ก๊าซแอมโมเนียผสมประมาณ 30% ชิ้นงานที่ได้ในการชุบแข็งผิวในช่วงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเป็นพวกชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไป แม้จะเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน (Complex shape) สามารถทำการชุบแข็งผิวได้ ภายหลังจากการชุบน้ำแล้ว จะต้องนำมาทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เพื่อคลายความเครียดอันเนื่องมาจากการชุบน้ำ

3. Carbonitriding ที่อุณหภูมิสูง ($900^{\circ} - 950^{\circ}\text{C}$) เป็นวิธีการชุบแข็งผิวที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงและใช้เวลานานเมื่อเทียบกับการทำ Carburizing ด้วยก๊าซเพียงอย่าง

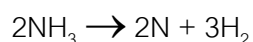
เดียว จะได้ความหนาของผิวแข็งในอัตราที่ช้ากว่า (ประมาณ 0.1 มม.ต่อชั่วโมง) แต่เมื่อเพิ่ม ก๊าซแอมโมเนียประมาณ 15 – 25% ความหนาของผิวแข็งที่ได้จะเป็นประมาณ 0.2 มม.ต่อ ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม ความหนาของผิวแข็งที่ได้จะน้อยกว่าการทำ Cyaniding เมื่อใช้เวลา เท่ากัน ภายหลังจากชุบแข็งแล้วจะต้องทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C เช่นเดียวกัน

การชุบแข็งด้วยวิธี Carbonitriding มีข้อดีเมื่อเทียบกับการทำ Gas Carburizing ก็คือ ใช้เวลาในการชุบแข็งผิวสั้นกว่า และได้ความแข็งที่ผิวสูงกว่า และที่สำคัญก็คือ สามารถที่จะ ใช้อุณหภูมิต่ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำ Cyaniding แล้ว ข้อที่ดีกว่ามีเพียงไม่มีสารพิษเข้ามาเกี่ยวข้องกับเท่านั้น

8.11 การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Nitriding

การชุบพื้นผิวโดยวิธี Nitriding เป็นการเพิ่มอะตอมของไนโตรเจนในลักษณะที่ทำให้ อิ่มตัว (Saturating) ตามบริเวณผิวของแท่งเหล็ก มีลักษณะคล้ายกับการทำ Carburizing หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำ Carburizing เป็นการเพิ่มธาตุคาร์บอนให้กับเหล็กในสภาพ Austenite (austenitic thermochemical treatment) แต่การทำ Nitriding เป็นการเพิ่มธาตุ ไนโตรเจนให้กับเหล็กในสภาพ Ferrite เพราะจะกระทำที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 500 ° - 590 °C ซึ่งอุณหภูมิต่ำนี้ เหล็กยังคงสภาพเป็น Ferrite และอุณหภูมิต่ำนี้เป็นช่วงที่เหล็ก Ferrite จะ ยอมให้อะตอมของไนโตรเจนละลายได้สูงที่สุดประมาณ 0.1% และที่อุณหภูมิต่ำนี้จะ เกิดปฏิกิริยา Eutectoid ของ Austenite (2.35%N) แยกตัวให้ Ferrite (0.1%N) กับไนตราย ของเหล็ก (Fe_4N หรือ γ') ที่มีไนโตรเจน 5.5 – 5.9%

การทำ Nitriding จะใช้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยถ้าอยู่ในสภาพสมดุล (N_2) ดังนั้น จะต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนในสภาพอะตอมหรือสภาพแรกเกิด จึงจะสามารถแพร่ซึมเข้าสู่ ผิวเหล็ก และรวมกับอะตอมของเหล็กให้เหล็กไนตราย (Fe_4N และ Fe_2N) ก๊าซที่จะให้ ไนโตรเจนในสภาพอะตอมได้ก็คือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิต่ำ 500 ° - 600 °C จะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน กับก๊าซไนโตรเจน ดังปฏิกิริยา



ในการทำ Nitriding ไม่มีข้อจำกัดชนิดของเหล็กที่จะนำมาใช้ในการทำ Nitriding สิ่งที่สำคัญก็คือ ต้องหาทางทำให้เนื้อเหล็กภายในมีความแข็งแรง และความเหนียวสูงเท่านั้น

แม้แต่เหล็กที่มีคาร์บอนสูงก็สามารถทำ Nitriding ได้ ถ้าสามารถทำการชุบให้เหล็กมีความเหนียวก่อนการทำ Nitriding ได้ สำหรับความแข็งที่ผิวนั้นสามารถเพิ่มให้สูงได้มาก ถ้าสามารถเลือกเหล็กที่มีธาตุบางธาตุที่สามารถรวมตัวกับไนโตรเจน และให้ในทรายที่มีความแข็งสูง เช่น อลูมิเนียม โครเมียม และโมลิบดีนัม เป็นต้น ดังนั้นเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการทำ Nitriding เพื่อให้ความแข็งสูง ควรมีธาตุเหล่านี้ผสมด้วย ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 : แสดงส่วนผสมของเหล็ก Nitriding ตามมาตรฐาน ISO/R 683/X-1970

C%	Si%	Mn%	P% Max	S% Max	Al%	Cr%	Mo%	V%
0.28-	0.15-	0.4-0.7	0.03	0.035	-	2.3 – 3.3	0.3 – 0.5	-
0.35	0.40	0.4-0.7	0.03	0.035	-	3.0 – 3.5	0.8 – 1.1	0.15-
0.35-	0.15-	0.5-0.8	0.03	0.035	0.8-1.2	1.0 – 1.3	0.15-	0.25
0.42	0.40	0.5-0.8	0.03	0.035	0.8 – 1.2	1.5 – 1.8	0.25	-
0.30-	0.20-						0.25-0.4	-
0.37	0.50							
0.38-	0.20-							
0.45	0.50							

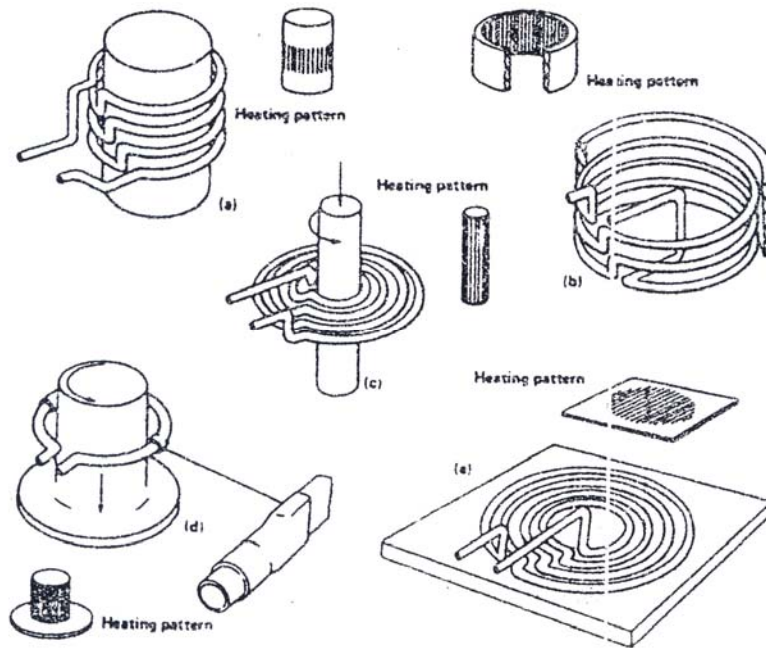
8.12 การชุบแข็งพื้นผิวด้วยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิวด้วยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำความถี่สูง ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง (0.4 – 0.5% C) หรือเหล็กผสม (Alloy Steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง ซึ่งเหล็กประเภทนี้สามารถชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาได้ และจะได้ความแข็งประมาณ 50 – 60 H_{RC} บางกรณีอาจชุบแข็งผิวด้วยวิธีนี้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูง (0.8 – 1.2% C) ได้ แต่ต้องควบคุมการให้ความร้อนที่ดี และควรจะเป็นงานขนาดใหญ่ เช่น ลูกรีดเหล็ก

หลักการทำงานของการชุบพื้นผิววิธีนี้ อาศัยหลักการให้ความร้อนแก่แท่งเหล็กด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Induction current) ความถี่สูง ซึ่งจะทำให้เหล็กร้อนจัดเฉพาะบริเวณผิวจนถึงจุดที่จะเปลี่ยนจากโครงสร้างเดิม (Pearlite, Ferrite) เป็น Austenite ส่วนเนื้อเหล็กในส่วนที่อยู่ลึกลงไปไม่ถึงใจกลางจะไม่ร้อน หรือจะร้อนบ้างก็ยังไม่ถึงจุดที่จะกลายเป็น Austenite เมื่อนำเหล็กที่เป็น Austenite เฉพาะผิวไปชุบน้ำหรือทำให้เย็นโดยเร็ว Austenite ตามบริเวณผิวจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Martensite ส่วนเนื้อเหล็กตรงกลางจะไม่มี การ

เปลี่ยนแปลงคงสภาพโครงสร้างเดิม ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเฉพาะบริเวณผิว ซึ่งจะทนต่อการเสียดสี และทนต่อความล้า (Fatigue) ได้ดี ในขณะที่คุณสมบัติความเหนียวยังคงอยู่ในเกณฑ์สูง

หลักการทำงานของการชุบแข็งผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำ อาศัยหลักการของกระแสไฟฟ้าสลับเมื่อไหลผ่านขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic) ขึ้นรอบ ๆ ขดลวด และสนามแม่เหล็กนี้จะกลับขั้วตามจำนวนความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ ถ้าเรานำเอาแท่งเหล็กไปใส่ไว้ในขดลวด สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะตัดผ่านเนื้อเหล็กในลักษณะกลับขั้วไปมา จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเนื้อเหล็กที่เรียกว่า กระแสเหนี่ยวนำไหลวน (Induce eddy หรือ Foucault current) แต่การเกิดกระแสไหลวนในเนื้อเหล็กนี้จะไม่เกิดสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ตัดขวางของแท่งเหล็กจะเกิดมากตามบริเวณผิว ยิ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าสูง กระแสที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นมากตามบริเวณผิวซึ่งเรียกว่า skin effect



ภาพที่ 8.9 แสดงชนิดของขดลวดไฟฟ้าความถี่สูง

เมื่อเกิดกระแสไหลวนตามบริเวณผิว และเหล็กมีความต้านทาน พลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงที่สั้นมากเป็นวินาที ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวไปสู่ใจกลางเป็นไปได้ยาก ขณะที่บริเวณผิวร้อนแดงแล้ว ภายในบริเวณใจกลางอาจจะยังอยู่ที่อุณหภูมิปกติ

8.13 การชุบแข็งพื้นผิวโดยเปลวไฟให้ความร้อน (Flame Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิวด้วยวิธีโดยเปลวไฟให้ความร้อนนี้ เป็นวิธีที่คล้ายคลึงในหลักการ เช่นเดียวกับการชุบแข็งพื้นผิวโดยกระแสเหนี่ยวนำความถี่สูง ผลที่ได้รับใกล้เคียงกัน เหล็กที่จะชุบแข็งพื้นผิวได้จะต้องมีส่วนผสมโดยเฉพาะคาร์บอนอยู่ในช่วงเดียวกัน (0.4 – 0.8% C) และอาจจะมีโครเมียมหรือนิกเกิลผสมในเหล็ก ผลที่ได้ก็จะยิ่งดีขึ้น ที่ว่าหลักการคล้ายคลึงกันก็คือ ใช้วิธีทำให้ผิวเหล็กร้อนที่อุณหภูมิสูงจนโครงสร้างเดิมเปลี่ยนเป็น Austenite ภายในระยะเวลานั้นเพื่อเนื้อเหล็กที่อยู่ลึกลงไปใต้ผิวไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นจะทำให้เหล็กเย็นลงอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ น้ำมัน หรือใช้อากาศเย็นเป่า จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Austenite ไปเป็น Martensite หรือ Bainite ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว เมื่อหลักการเป็นเช่นนี้ เปลวไฟที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของก๊าซออกซิเจน กับอะเซทิลีน หรือก๊าซออกซิเจนกับก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เช่น บิวเทน หรือโพรเพน

เมื่อพิจารณาข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการชุบแข็งพื้นผิวโดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเห็นว่าข้อดีอยู่บ้าง เช่น การลงทุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ จะต่ำกว่า วิธีการทำงานง่ายกว่ามาก ยิ่งชิ้นงานมีขนาดโตมาก ๆ สามารถทำการชุบแข็งได้ภายนอกโรงงาน เพียงแต่มีถึงก๊าซและท่อฉีดน้ำ ส่วนข้อเสียคือ การควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอกระทำได้ยาก ยิ่งพื้นที่ที่จะชุบแข็งผิวกว้างมาก การทำงานจะมีความยุ่งยากมาก จะต้องออกแบบหัวเผา ให้การเผามีความแน่นอน ข้อเสียประการที่สำคัญก็คือ อุณหภูมิของเหล็กบริเวณผิวนอกสุดมักจะสูงมาก อาจได้ถึง 1000°C ซึ่งจะทำให้ Austenite มีเกรนโตภายหลัง เมื่อนำเหล็กไปชุบน้ำจะได้ Martensite ที่มีลักษณะหยาบ มักจะเปราะแตกง่าย

8.14 การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธี Electrolytic

การชุบแข็งด้วยวิธี Electrolytic อาศัยหลักการจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า Cathode effect โดยมีทฤษฎีที่ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าตรง ความต่างศักย์ปานกลาง (200 – 220 โวลต์) และมีความเข้มข้นของกระแสต่อพื้นที่สูงประมาณ 3 – 6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ไหลผ่านอ่างน้ำยา Electrolyte ที่เป็นไฮเดียมคาร์บอเนต หรือโปแตสเซียมคาร์บอเนต (5 – 10%) โดยมีแท่งคาโทด และแอโนด จะปรากฏว่าที่แท่งคาโทดจะมีฟองก๊าซไฮโดรเจนปกคลุมอยู่ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าที่ผ่านจากคาโทด

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1  ผ่านทางอินเทอร์เน็ต	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2  ผ่านทางอินเทอร์เน็ต	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป  ผ่านทางอินเทอร์เน็ต	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

