

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการกัดเหล็กเครื่องมือ(AISI P20)ที่ผ่านการชุบแข็งผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีต่าง ๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

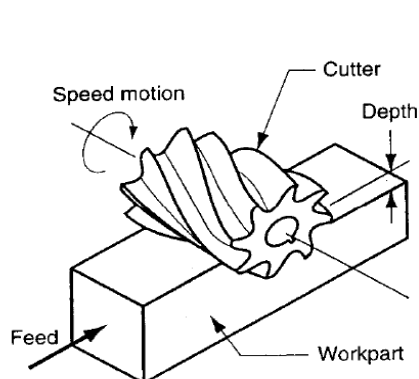
- 2.1 เครื่องกัด
- 2.2 วัสดุที่ใช้ผลิตเครื่องมือตัด
- 2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือ
- 2.4 ความหยาบละเอียดของผิวงาน
- 2.5 การชุบแข็งและการชุบผิวแข็ง
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องกัด

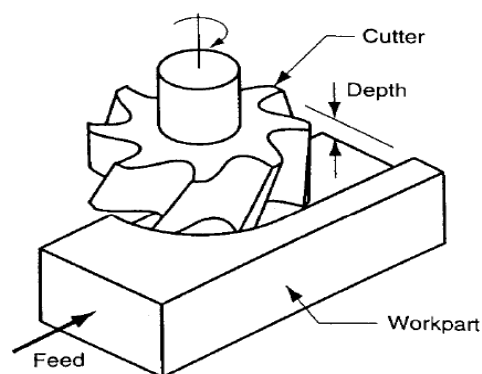
เครื่องกัด (Milling Machines) ที่ใช้สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ มีให้เลือกใช้หลายแบบหลายขนาด โดยเครื่องที่นิยมใช้กับงานทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่แกนหมุนของมีดอยู่ในแนวราบ หรือเครื่องกัดแนวนอน (Plain Milling Machine) ส่วนอีกแบบหนึ่งแกนหมุนของมีดจะอยู่ในแนวตั้ง เรียกว่าเครื่องกัดเพลาตั้ง (Vertical Milling Machine) เครื่องกัดมีให้เลือกใช้หลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ [5]

2.1.1 งานกัด

งานกัด (Milling) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ งานกัดในแนวนอน และงานกัดงานในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.1 [5]



(ก) งานกัดในแนวนอน



(ข) งานกัดในแนวตั้ง

รูปที่ 2.1 ลักษณะของงานกัด

2.1.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี [1]

เครื่องกัดซีเอ็นซี ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้ค่อนข้างหลากหลาย เช่น งานกัด งานเจาะ งานคว้าน งานทำเกลียว เป็นต้น ทำให้เครื่องกัดซีเอ็นซีถูกออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 3 แนวแกนขึ้นไป โดยมีแนวแกนหลัก 3 แกน ได้แก่ แกน X แกน Y แกน Z เครื่องกัดซีเอ็นซีโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกัดซีเอ็นซีเพลาตั้ง ดังรูปที่ 2.2 เครื่องกัดซีเอ็นซีเพลาอน ดังรูปที่ 2.3 โดยขึ้นอยู่กับการวางตำแหน่งของเพลาคutting head



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องกัดซีเอ็นซีเพลาตั้ง

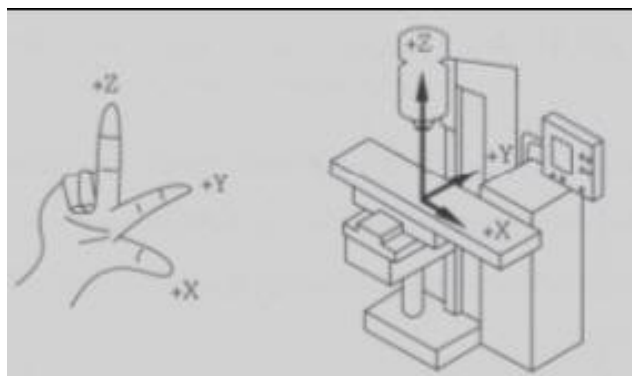


รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องกัดซีเอ็นซีเพลาอน

2.1.3 การจำแนกประเภทของ CNC machining center [2]

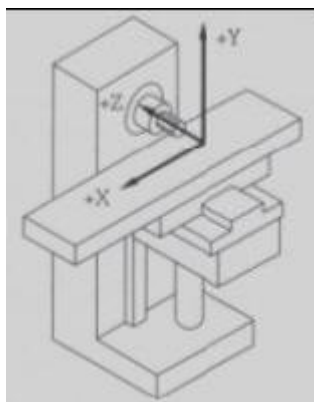
สามารถแบ่งได้ตามแบบทิศทาง การติดตั้งสปินเดิล ดังนี้

2.1.3.1 แนวตั้ง (Vertical Machining Center, VMC)



รูปที่ 2.4 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดตั้ง

2.1.3.2 แนวนอน (Horizontal Machining Center, HMC)



รูปที่ 2.5 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดนอน

เครื่องกัดแบบแนวตั้งนั้นมีจำนวนการใช้งานมากกว่าเครื่องแบบแนวนอนมากกว่าโดยเฉพาะในการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กและกลาง รวมถึงขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน โดยที่ข้อดีของแบบแนวนอนคือ ไม่สะสมความร้อนที่ชิ้นงาน เศษโลหะจะตกลงพื้นไม่สะสมบนผิวของชิ้นงาน ที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานได้

CNC Machining Center ที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวสปินเดิลให้อยู่ได้ทั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง โดยใช้คำสั่ง CNC ในการเปลี่ยนตำแหน่งนั้น มีชื่อเรียกเครื่องประเภทนี้ว่า “Universal Machining Center” ฉะนั้นเครื่องจักรประเภทนี้จึงสามารถทำงานหลายขั้นตอนให้เสร็จได้ภายในเครื่องเดียวโดยไม่ต้องติดตั้งชิ้นงานใหม่ ซึ่งกัดได้ถึง 5-6 ด้านในครั้งเดียว

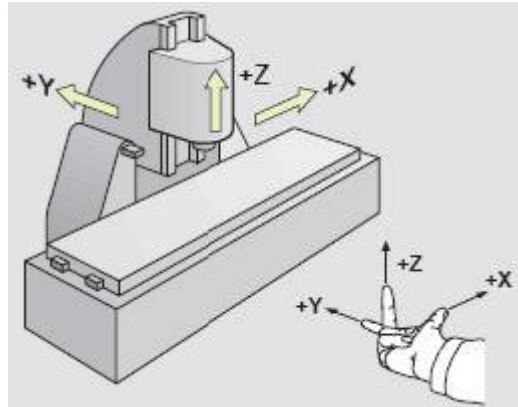
2.1.4 การแบ่งตามจำนวนของแกนการเคลื่อนที่ของทูลเมื่อเทียบกับชิ้นงาน ได้ดังนี้

2.1.4.1 แบบ 2 แกนครึ่ง (2½ Axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกน แต่เคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันคราวละ 2 แกน เช่น X-Y, X-Z, Y-Z เป็นต้น เครื่องประเภทนี้เหมาะสำหรับการเจาะ (Drilling)

2.1.4.2 แบบ 3 แกน (3 axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันได้ทั้ง 3 แกน



รูปที่ 2.6 แบบ 3 แกน

2.1.4.3 แบบ 3 แกนครึ่ง (3½ axes)

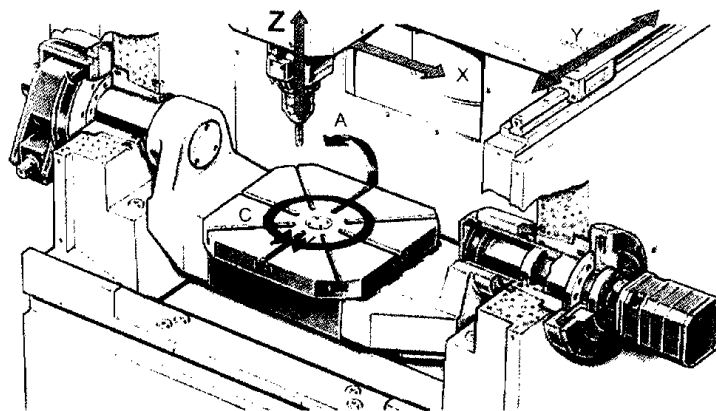
พบมากในเครื่อง HMC โดยเป็นการหมุนของ Indexing table ในแกน B แล้วจึงเคลื่อนที่ไปแกน X,Y และ Z ถ้าเป็นเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก

2.1.4.4 แบบ 4 แกน (4axes)

พบมากในเครื่อง HMC โดยแกนที่ 4 เป็นแกนหมุนของโต๊ะหมุน(Rotary Table) ในแกน B ไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่ที่เชิงเส้น (แกน X,Y และ Z) จึงเป็นการเคลื่อนที่ 4 แกนพร้อม ๆ กัน ถ้าเป็นแกนเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก

2.1.4.5 แบบ 5 แกน (5 axes)

มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) 3 แกน (X Y Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) หรือการหมุน 2 แกน เครื่อง 5 แกนสามารถเคลื่อนที่ใดพร้อม ๆ กันทั้ง 5 แกน



รูปที่ 2.7 เครื่อง Machining Center 5 แกน

นอกจากนี้แล้วเครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีบางชนิดก็จะมีแนวแกนป้อนและแนวแกนหมุนรวมกันอยู่หลายแนวแกน ซึ่งในการกำหนดแนวแกนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีตามมาตรฐาน EIA-267-B (Electronic Industries Association) ได้กำหนดแนวแกนมาตรฐานไว้ทั้งหมด 14 แนวแกน ประกอบไปด้วยแนวแกนที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง 9 แนวแกน แนวหมุนอีก 5 แนวแกน

2.1.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Machining Center

สามารถแบ่งได้ 4 ส่วนหลัก ได้แก่

- ชุดควบคุมการทำงาน (Controller)
- ระบบกลไกในการเคลื่อนที่ (Drive mechanisms)
- ตัวเครื่องจักร (Machine Body)
- อุปกรณ์เปลี่ยนหัวอัตโนมัติ (Automatic Tool Changer)

2.1.5.1 ชุดควบคุมการทำงาน (Controller)

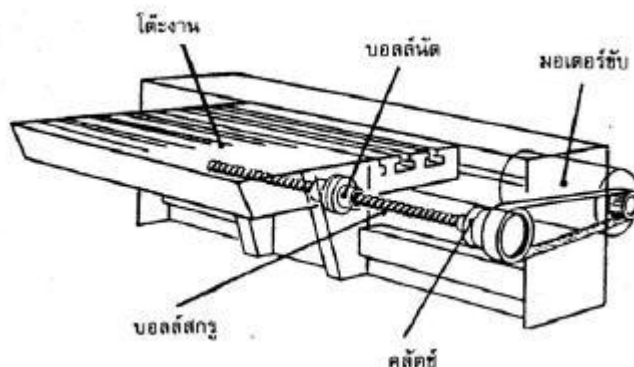
ชุดควบคุมของ Machining Center เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บโปรแกรม แก้ไขตัดแปลงได้ คอมพิวเตอร์เข้าใจโปรแกรมที่ป้อนและทำงานตามคำสั่งในโปรแกรมชุดควบคุมประกอบไปด้วยแผงควบคุม (control panel) จอภาพ (monitor) แป้นพิมพ์ (keyboard หรือ keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed) และความเร็วยก (Spindle) เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ชุดควบคุมการทำงานต่าง ๆ

2.1.5.2 ระบบกลไกในการเคลื่อนที่ (Drive mechanisms)

ฟีดมอเตอร์ (feed Motor) ซึ่งเป็นโซโวมอเตอร์ (servo motor) ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ได้โดยใช้ บอลสกรู (ball screw) แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุม (angular motion) เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น (linear motion) โดยมีตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่และความเร็วถูกควบคุมโดยรับสัญญาณจากคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้จะมีรางนำทาง (guide way) รองรับการเคลื่อนที่ที่แกนต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของโต๊ะงาน

สำหรับเครื่องที่ต้องการความแม่นยำสูงจะมี ลิเนียร์สเกล (linear scale) เป็นอุปกรณ์ตรวจ-รู้หรือ เซนเซอร์ (sensor) บอกตำแหน่งในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน

2.1.5.3 ตัวเครื่องจักร (Machine Body)

โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลัก เช่น

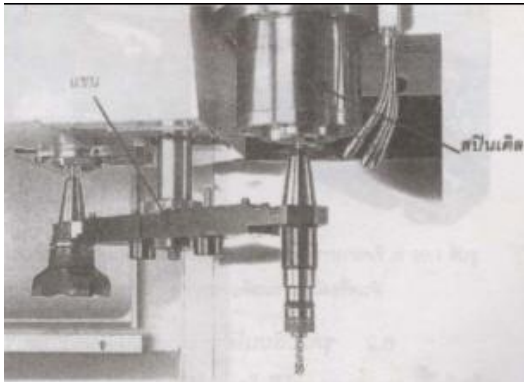
- แท่นเครื่อง (machine bed) เป็นโครงสร้างหลักของตัวเครื่องจักร สำหรับรองรับอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร
- หมอนรอง หรือ saddle เคลื่อนที่ได้ 1 แกน บนแท่นเครื่อง เช่น แกน X หรือแกน Y
- โต๊ะ (table) สำหรับวางชิ้นงาน โดยทั่วไปโต๊ะเคลื่อนที่อยู่บนหมอนรอง มีร่องรูปตัวที (T-slot) สำหรับใช้ในการจับยึดชิ้นงานให้แนบติดกับโต๊ะ มีระนาบโต๊ะตั้งติดกับเสา
- เสา (column) เป็นโครงสร้างสำหรับติดตั้งสปินเดิล เครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์แนวตั้งรุ่นใหม่นิยมสร้างเป็นแบบเสาคู่ (double Column) เพราะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า
- สปินเดิล (spindle) สำหรับติดตั้งชุดจับทูล แบบเทเปอร์แชงก์ (tapered shank) หรือแบบไฮสปีด (high speed) โดยมีมอเตอร์สปินเดิล (spindle motor) ขับเคลื่อนสปินเดิลผ่านเกียร์หรือสายพานหรือต่อตรงรวมเป็นชุดเดียวกัน

2.1.5.4 อุปกรณ์เปลี่ยนทูลอัตโนมัติ (Automatic Tool Changer, ATC)

ติดตั้งในเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ทั้งแบบแนวตั้ง (Vertical Machining Center หรือ VMC) และแบบแนวนอน (horizontal machining center) สามารถเปลี่ยนทูลจากที่เก็บทูล (Tool Storage) หรือทูลแมกกาซีน (Tool Magazine) ประเภทของATC สามารถแยกได้ดังนี้

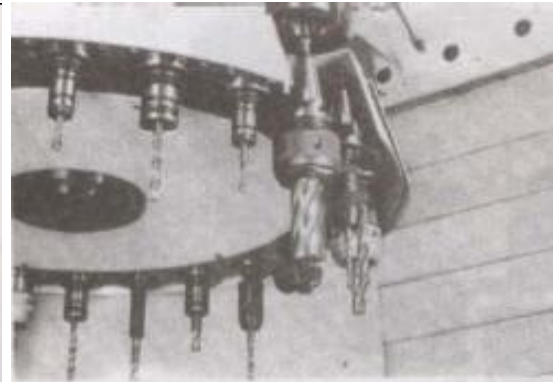
- เป็นแบบโซ่ (Chain-Type)
- แบบจานหมุน (Carousel-Type)

โดยแบบโซ่สามารถเก็บทูลได้จำนวนมากกว่าแบบจานหมุน ทั้งสองแบบจะมีแขนจับเปลี่ยนทูล (Tool Changing Arm) ระหว่างที่เก็บทูลและสปินเดิล บางรุ่นอาจจะไม่ต้องใช้แขนหรือเป็นแบบไร้แขน (Armless)



รูปที่ 2.10 ชุดเปลี่ยนทูลอัตโนมัติ

แบบ Arm type tool changer



รูปที่ 2.11 ชุดเปลี่ยนทูลอัตโนมัติ

แบบ Armless type tool changer

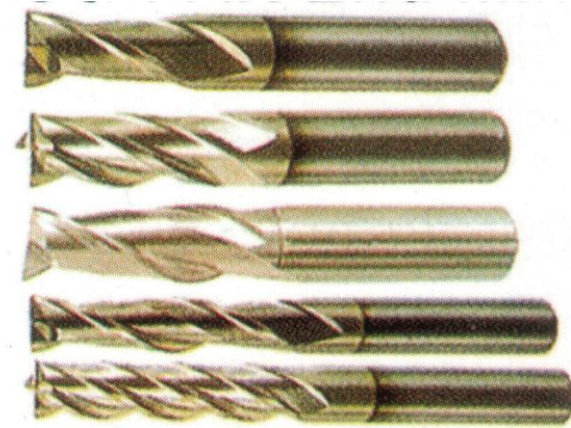
2.2 เครื่องมือตัดสำหรับงานกัด [3]

เครื่องมือตัดสำหรับงานกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี หรือ เครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ มีดังนี้

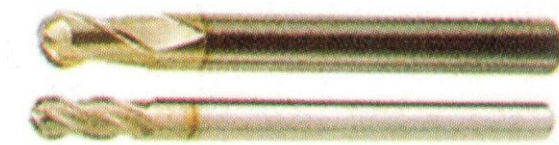
2.2.1 เอนด์มิลล์ (End mill)

เอนด์มิลล์เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับเครื่องกัดเพลตตั้ง วัสดุที่ใช้ทำ เอนด์มิลล์นั้นมีทั้งทำจาก เหล็กกล้ารอบสูง (HSS) และ คาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งในกระบวนการตัดเฉือนผิวชิ้นงานด้วย เอนด์มิลล์ นั้น อาศัยคมตัดตรงปลายและคมตัดด้านข้าง ในการขึ้นรูปชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ หลายลักษณะ เช่นการกัดส่วนที่เป็นบ้ำหรือส่วนที่เป็นคอรั่นก็ได้ ดอกกัดเอนด์มิลล์มีหลาย ลักษณะ เช่น เอนด์

มิลล์ปลายแบบหน้าตัดตรง แบบปลายครึ่งวงกลม และแต่ละชนิดยังแบ่งดอกกัดออกได้เป็นดอกกัดหยาบและดอกกัดละเอียด



รูปที่ 2.12 เอ็นด์มิลล์แบบปลายหน้าตัดตรง



รูปที่ 2.13 เอ็นด์มิลล์แบบปลายครึ่งวงกลม

2.2.2 เฟซมิลล์ (Face mill)

เป็นเครื่องมือตัดที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานปาดผิวของชิ้นงาน เฟซมิลล์ที่ใช้สำหรับ เครื่องกัดซีเอ็นซี นั้น ส่วนมากจะเป็นแบบอินเสิร์ต ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนอินเสิร์ตได้ เฟซมิลล์ยังมี รูปร่างลักษณะและ รูปทรงที่แตกต่าง ดังนั้นการเลือกใช้งานจึงควรพิจารณาถึงรูปร่างและวัสดุของ ชิ้นงานด้วย ส่วน รายละเอียดของเฟซมิลล์เราสามารถดูได้จากคู่มือการเลือกใช้งานของบริษัทผู้ผลิต

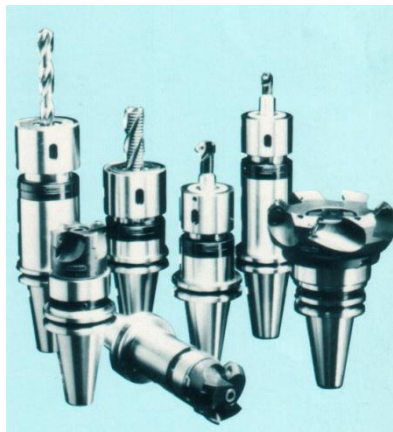


รูปที่ 2.14 เฟซมิลล์สำหรับปาดผิวชิ้นงาน

2.2.3 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี

ระบบการเปลี่ยนเครื่องมืออัตโนมัติจะเป็นระบบที่ให้ความสะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติงานของช่างควบคุมเครื่องก็จริง แต่ก็จำเป็นที่จะต้องอาศัยอุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools holder) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือจะต้องเลือกให้ถูกต้องและมีความเหมาะสมกับเครื่องมือตัดแต่ละชนิดด้วย

ในปัจจุบันระบบรูเพลลาของเครื่องกัดซีเอ็นซี (Spindle) และอุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ นั้นจะมี ขนาดที่เป็นมาตรฐานซึ่งสามารถเลือกใช้โดยดูจากกลุ่มของรหัสของผู้ผลิต แต่สิ่งสำคัญจะลืมไม่ได้ คือ จะต้องเลือกให้มีขนาดและมาตรฐานเดียวกันกับรูเพลลาของเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่เท่านั้น นอกเหนือจากนี้แล้ว ในการจับยึดเครื่องมือตัดบางชนิด อาจมีความจำเป็นที่จะต้องมียึด (Collet) มาช่วย เช่น เอ็นด์มิลล์ ดอกตัดป เป็นต้น โดยที่ลักษณะของยึดจะมีหลายขนาดให้เลือกใช้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องมือตัดที่จะนำมาใช้



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 ปลอกจับ (collet) เครื่องมือตัดขนาดต่างๆ

2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) [4]

ในชีวิตประจำวัน เรามักเคยใช้เครื่องมือเหล็ก เช่น ค้อน ตะไบ สว่าน ใบเลื่อย เหล็กกล้าที่ใช้ทำเครื่องมือเหล่านี้มีคุณสมบัติบางอย่างที่ต่างจากเหล็กกล้าที่เราใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น การทนต่อการเสียดสีที่เหนือกว่า การทนต่อแรงกระแทกที่เหนือกว่า การทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่เหนือกว่า เป็นต้น

2.3.1 ความหมายของเหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือ คือ เหล็กกล้าที่ใช้สำหรับทำเครื่องมือขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น แบบหล่อโลหะในขบวนการอัดฉีดโลหะร้อน (Die casting) แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูป หรือตัดวัสดุต่างๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และพลาสติก เหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอ

2.3.2 คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ

ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) คือ คุณสมบัติที่เหล็กกล้าที่บ่งถึงความยาก-ง่ายในการชุบแข็งและความลึกของเหล็กที่แข็งขึ้นจากการชุบแข็ง (Quenching) คุณสมบัตินี้จะขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีและขนาดของเกรนของเหล็กกล้า โดยเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูง จะสามารถทำการชุบแข็งได้ง่ายด้วยลม แต่ถ้าเหล็กกล้ามีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ การชุบแข็งด้วยลมจะไม่สามารถทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ จึงอาจต้องทำการชุบแข็งด้วยน้ำหรือของเหลวอื่นซึ่งจะมีผลต่อการบิดตัวของชิ้นงานที่ทำการชุบ คุณสมบัตินี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุผสม ดังนั้น การทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงตลอดชิ้น หรือสามารถชุบแข็งได้ลึก จึงควรเลือกใช้เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูง โดยโคบอลต์เป็นเพียงธาตุเดียวที่ลดคุณสมบัตินี้

ความทนต่อการเสียดสี (Wear resistance) คือ ความสามารถทนต่อการถูกขัดสี ความเหนียว (Toughness) คือความสามารถในการรับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เหล็กกล้าเครื่องมือที่ถือว่ามีคุณสมบัติด้านความเหนียวที่ดี คือ กลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ หรือปานกลาง คุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับการใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงกระแทก ซึ่งรวมถึงการเสียดสีของคมตัดด้วย คุณสมบัตินี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งของเหล็ก และปริมาณคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวเมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง) โดยหากเหล็กกล้าเครื่องมือมีความแข็งสูงก็จะทนการเสียดสีได้ดี หรือหากมีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (แม้อุณหภูมิสูง) ก็จะทำให้ทนการเสียดสีได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากคาร์ไบด์จะมีความแข็งสูง การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Red-hardness) เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ต้องได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 480 °C โดยธาตุผสมที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่เสถียรจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัตินี้ ซึ่งจะทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือไม่อ่อนลง (ความแข็งลดลง) อันเนื่องมาจากผลของความร้อนในขณะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือในขณะที่ทำการอบคืนตัว (tempering) ความสามารถในการกลึงไส (Machinability) คือความสามารถของโลหะที่จะกลึงไส ตกแต่งได้ง่าย และมีผิวที่เรียบภายหลังการกลึงไส

ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน (Resistance to decarburization) การสูญเสียคาร์บอนซึ่งจะเกิดเมื่ออบเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่า 704 °C (1300°F) เป็นผลให้ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำลง เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัตินี้ต่ำจะต้องมีวิธีป้องกัน/ควบคุมบรรยากาศในการอบชุบความร้อนเพื่อไม่ให้ชิ้นงานสูญเสียคาร์บอนโดยเฉพาะที่ผิว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักจะสามารถต้านทานการสูญเสียคาร์บอนได้ดี การไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด (Non deformation properties) คุณสมบัตินี้สัมพันธ์กับความสามารถในการชุบแข็ง โดยทั่วไปเหล็กกล้าที่สามารถชุบแข็งได้ด้วยลมจะมีการบิดตัวน้อยที่สุด เหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำมันทำให้เกิดการบิดตัวปานกลาง และเหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำทำให้เกิดการบิดตัวสูงที่สุด ดังนั้นในการออกแบบเลือกเหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านนี้ด้วย

2.3.3 อิทธิพลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ

คาร์บอน (C) เป็นธาตุผสมสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ จะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลหลายประการ โดยช่วยเพิ่มความแข็ง ความเค้นแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะลดคุณสมบัติความเหนียว และการยึดตัวของเหล็ก นอกจากนี้คาร์บอนจะรวมตัวกับธาตุผสมตัวอื่น เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน และฟอสฟอรัสเป็นคาร์ไบด์ด้วย ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น ความสามารถในการชุบแข็ง ความทนต่อการเสียดสี การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

ซิลิกอน (Si) โดยปกติจะพบในเหล็กกล้าเครื่องมือประมาณ 0.2-0.3% เพราะในการหลอมเหล็กกล้าจะใช้ซิลิกอนเพื่อไล่แก๊สออกซิเจน สำหรับซิลิกอนที่เป็นธาตุผสมจะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวเป็นกราไฟต์ ดังนั้นในเหล็กกล้าเครื่องมือบางประเภทที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและผสมซิลิกอนประมาณ 1% จะมีโครงสร้างหลังการชุบแข็งที่ประกอบด้วยกราไฟต์กระจาย ซึ่งช่วยให้เกิดความลื่นเมื่อใช้ทำแม่พิมพ์ ลดปัญหาการติดของโลหะในขณะทำการขึ้นรูป ธาตุนี้จะไม่ใช้ตามลำพัง แต่จะผสมร่วมกับโมลิบดีนัม หรือวานาเดียม โดยให้ผลดีทั้งด้านการลดการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้ชุบแข็งง่ายขึ้น และช่วยให้คงความแข็งแรงไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (tempering) แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในเหล็กกล้า เนื่องจากในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจะได้แมงกานีสเป็นตัวกำจัดแก๊ส และรวมตัวกับกำมะถัน (S) การจัดว่าแมงกานีสเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้าก็ต่อเมื่อมีปริมาณสูงกว่า 0.6% ขึ้นไป แมงกานีสมีบทบาทในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ สำหรับเหล็กที่ผสมแมงกานีสเพียงลำพังจะมีข้อเสียคือ จะเปราะหลังจากอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C จึงมักผสมแมงกานีสจะผสมร่วมกับโครเมียม (Cr) และโมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้มากขึ้น กว่าที่การผสมแมงกานีสเพียงธาตุเดียว

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุผสมที่ใส่ลงไปเพื่อคุณสมบัติหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เพิ่มคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี เพิ่มความเหนียว เป็นต้น โครเมียมสามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้หลายรูปแบบ ซึ่งหากมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและคาร์ไบด์เหล่านี้ละลายหมดเกรนจะขยายตัวมาก ดังนั้นการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผสมโครเมียมตามลำพัง ต้องเลี่ยงการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทิ้งแช่ไว้ระยะเวลานาน หรืออาจแก้ไขได้โดยผสมวานาเดียมเพื่อชะลอการขยายตัวของเกรน

โมลิบดีนัม (Mo) ส่วนใหญ่เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน และเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจะผสมโมลิบดีนัมเพื่อผลในการชุบแข็ง นอกจากนี้ยังทำให้สามารถคงความแข็งแรงของมาร์เทนไซต์ได้จนถึงอุณหภูมิ 500 °C แต่ข้อเสียของโมลิบดีนัม คือ เหล็กจะเป็นออกไซด์มากที่อุณหภูมิ 1000-1100 °C และมีแนวโน้มทำให้สูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย จึงมักเติมซิลิกอนเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องนี้

ทังสเตน (W) ที่ผสมลงไปในเหล็กกล้าเครื่องมือทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง สลายตัวได้ช้าที่อุณหภูมิสูง จึงมีบทบาทด้านทนต่อการสึกหรอสำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี และทนความร้อน โดยเฉพาะหากผสมทังสเตนสูงถึง 18% จะช่วยคงความแข็งแรงไว้ที่อุณหภูมิสูง และรักษาคมตัดได้ดี

โคบอลต์ (Co) เป็นธาตุเดียวที่ลดความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะมีบทบาทอย่างมากที่จะช่วยให้เหล็กมีความคม ตัดโลหะได้ดี (High cutting ability) และสามารถรักษาความแข็งได้จนถึงอุณหภูมิสูง จึงพบว่าเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (high speed tool steel) จะผสมโคบอลต์อยู่ด้วย

วานาเดียม (V) มีผลอย่างมากที่ทำให้ได้คาร์ไบด์ที่แข็ง เสถียร ขนาดละเอียด และกระจายตัว ซึ่งมีส่วนทำให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนละเอียด สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวให้กับชิ้นงานได้

2.3.4 การแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือเป็นเหล็กที่มีความหลากหลายในการใช้งาน การเลือกใช้ไม่จำกัดที่จะต้องเลือกเกรดใดเกรดหนึ่ง สามารถใช้งานแทนกันได้ อย่างไรก็ตาม หากแบ่งเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะการใช้งานจะสามารถแบ่งได้ 6 ประเภทดังนี้

2.3.4.1 เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (plain carbon) ที่ผสมคาร์บอนตั้งแต่ 0.60-1.40% ดังนั้นคุณสมบัติด้านการชุบแข็ง หรือความลึกของผิวชุบแข็งจึงต่ำ และจำเป็นต้องชุบแข็งด้วยน้ำ ในบางเกรดอาจมีการผสมโครเมียมหรือวานาเดียมลงไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และทนต่อการเสียดสี

เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น และมีจุดเด่น คือ สามารถกลึงไสเพื่อตกแต่งชิ้นงานได้ง่าย สูญเสียคาร์บอนที่ผิวยาก จุดด้อยของเหล็กกลุ่มนี้ คือ การชุบแข็งด้วยน้ำอาจมีผลทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวได้ง่าย และไม่สามารถทนต่อความร้อนได้ จึงไม่สามารถใช้สำหรับงานตัดที่รุนแรงหรือใช้งานซ้ำๆ กันจนเกิดความร้อนได้ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงไม่นิยมใช้งานกัน อาจมีการใช้งานบ้างสำหรับทำเครื่องมือตัดที่ใช้ความเร็วต่ำและตัดด้วยแรงเบาๆ เช่น ไม้ อะลูมิเนียม แม่พิมพ์สำหรับทอบหัวขึ้นรูปเย็น (cold heading) เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น W1 W2 และ W5

2.3.4.2 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold work tool steels) เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้ในงานแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่นโลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษ เพืองกัดไม้ กัดเตอร์ เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสดี เปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง (เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ) ด้านทานการสึกหรอสูง และมีความเหนียวทนแรงอัดกระแทกได้ดี เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ได้แก่

2.3.4.2.1 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยน้ำมัน เป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอสูง และมีความแข็งแรงสูง ซึ่งเป็นผลมาจากมีปริมาณคาร์บอนสูง และคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่มีอยู่อย่างกระจัดกระจาย วัสดุผสมเพียงเล็กน้อยของโครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตน ทำให้สามารถชุบแข็งได้ด้วยน้ำมัน ซึ่งมีข้อดีกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เนื่องจากการชุบแข็งด้วยน้ำมันจะทำให้ชิ้นงานบิดตัว และมีโอกาสแตกน้อยกว่าการชุบแข็งด้วยน้ำอย่างมาก ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้ากลุ่มนี้ ได้แก่ เครื่องทำเกลียว (taps) เครื่องคว้าน (reamers) ใบตัด (circular cutters) เครื่องคว้านรู (broaches) สว่าน (drills) แม่พิมพ์เจาะรู (blanking dies) หัวกด (punches) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (forming dies) แม่พิมพ์สำหรับงานตัดขอบเย็น (cold-trimming dies) ใบมีดตัดขนาดเล็ก (small shear blades) แม่พิมพ์งานลากขึ้นรูป (drawing dies) รวมถึงแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกหรือยาง เป็นต้น

โดยทั่วไปเกรดที่มีการใช้งานกันมาก ได้แก่ O1 เนื่องจากมีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเกรนขยายตัวช้าที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีความเหนียวเหนื่อกว่าเกรดอื่นๆ เล็กน้อย สำหรับเกรด O6 จะมีความสมบัติกลึงไสที่ดีในสภาพการอบอุ่น เนื่องจากการฟอร์มตัวของเกล็ดกราไฟต์ แต่คุณสมบัติการรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงยังต่ำพอๆกับเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำสำหรับการใช้งานที่ต้องการอายุการใช้งานที่นานขึ้นอาจใช้เกรด O7 ซึ่งมีความสมบัติด้านทานการสึกหรอสูงที่สุด

2.3.4.2.2 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยลม เป็นกลุ่มที่มีวัสดุผสมมากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยน้ำมัน โดยมีปริมาณคาร์บอนสูงและธาตุผสมสูงปานกลาง ซึ่งจากปริมาณธาตุผสมที่สูงทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง ซึ่งเพียงพอที่จะชุบแข็งให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ด้วยลม การเย็นตัวในอัตราที่ต่ำจะทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวน้อย ลดโอกาสที่ชิ้นงานจะแตกได้ และมีความสมบัติการไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดได้เยี่ยมมากในระหว่างการอบชุบความร้อน นอกจากนี้ปริมาณคาร์ไบด์จำนวนมากทำให้มีความสมบัติทนต่อการเสียดสีที่ดี อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีวัสดุผสมที่สูง แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีความสามารถในการรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้สูงพอที่จะใช้กับงานร้อน หรืองานตัดความเร็วสูง ดังนั้นส่วนใหญ่เหล็กกล้ากลุ่มนี้จึงเหมาะกับงานเย็นเท่านั้น

การใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้สามารถใช้งานได้ประเภทเดียวกับกลุ่มที่ชุบด้วยน้ำมัน แต่คุณสมบัติที่เหนือกว่า คือ ความสามารถในการชุบแข็ง ซึ่งจะมีข้อได้เปรียบด้านการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่น้อยกว่า และเพิ่มความปลอดภัยในระหว่างการชุบแข็ง เกรดที่นิยมใช้งานกันมาก ได้แก่ A2 สำหรับเกรดอื่นที่มีการใช้งานอยู่บ้าง ได้แก่ A6 A8 และ A10 (มีกราไฟต์อิสระในโครงสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถในการกลึงไส)

2.3.4.2.3 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัสดุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูง และโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนตัว (tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมาก และมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นในกลุ่มอื่น

การใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้สามารถใช้กับงานเย็นได้ทุกประเภท เช่น แม่พิมพ์เจาะรู (blanking dies) ใบมีดตัด (slitting cutters) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (forming dies) แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (deep-drawing dies) แม่พิมพ์ดึงลวด (wire-drawing dies) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (cold-extrusion dies) ลูกรีดสำหรับดัดโค้งและขึ้นรูป (bending and forming rolls) ใบมีด (shear blades) ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ทนต่อการสึกหรอ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้งานสำหรับงานแม่พิมพ์ และหัวกดของงานขึ้นรูปเย็น งานเจาะรู (blanking) เหล็กเกรด D2 จะหาซื้อได้ง่ายและมีการใช้งานมาก สำหรับการใช้งานที่ต้องการอายุยาวนานขึ้นอาจเลือกใช้กลุ่มที่มีคาร์บอนสูงกว่า ได้แก่ D3 D4 และ D7 ซึ่งจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่า D2 แต่จะมีข้อจำกัด คือ การกลึงไสทำได้ยากขึ้น

2.3.4.3 เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock resisting tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น สิว (chisel) หัวกด (punch) และแม่พิมพ์ (die) เป็นต้น โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลาง และทำให้ภายหลังการอบความร้อนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์และมีคาร์ไบด์ละเอียดที่กระจายอยู่ นอกจากนี้อาจเติมธาตุ แมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเฟอไรต์ และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัวด้วย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้เป็นผลจากปริมาณซิลิกอน ซึ่งจะเร่งให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อความล้าต่ำลง ดังนั้นในการอบชุบความร้อนจะต้องระวังเรื่องนี้ให้มาก เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น S1 S2 S5 และ S7 โดย S1 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานมาก เพราะจะมีส่วนผสมของทั้งสแตนดีย์ ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ เพิ่มความเหนียว และเพิ่มความสามารถในการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงให้ดีกว่าเกรด S อื่นๆ จึงสามารถใช้ในงานที่ต้องทนต่อความร้อนได้ การใช้งาน เช่น สิว ใบมีดตัด (shear blades) แม่พิมพ์ขึ้นรูป เครื่องเจาะหิน เป็นต้น

2.3.4.4 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steels) ในงานบางประเภทที่ต้องใช้อาศัยอุณหภูมิสูงในการแปรรูป เช่น งานทุบขึ้นรูปร้อน (hot forging) งานหล่อแบบฉีด (die casting) งานอัดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion) งานตัดร้อน (hot shear blade) งานอัดร้อน (hot press) สิ่งสำคัญ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องรักษาคุณสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี (red hardness) ด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (thermal shock) ด้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง และมีความเหนียวที่ดี ธาตุผสมที่จะทำให้ได้คุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเทน ซึ่งผลรวมของธาตุเหล่านี้จะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 5% เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีการใช้งาน ได้แก่

2.3.4.4.1 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก จะมีโครเมียมตั้งแต่ 3.25% ขึ้นไป และธาตุผสมอื่นอีกเล็กน้อย เช่น วานาเดียม ทังสเทน โมลิบดีนัม ปริมาณคาร์บอนปานกลางจะช่วยส่งเสริมให้มีคุณสมบัติความเหนียวที่ดี คาร์ไบด์ของโครเมียมและธาตุผสมอื่นที่กระจายละเอียดและขยายตัวช้าในขณะใช้งาน ทำให้ได้คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ซึ่งคุณสมบัติที่ดีเหล่านี้ทำให้เหมาะสำหรับใช้งานทุบขึ้นรูปร้อน และ งานหล่อแบบฉีด (die casting) นอกจากนี้ยังสามารถชุบแข็งได้ด้วยลมแม้ชิ้นงานจะมีขนาดใหญ่ก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่นิยมใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนเกรดที่มีการใช้งานกันมากคือ H10 H11 H12 H13 และ H14

2.3.4.4.2 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีทังสเทนเป็นส่วนผสมหลัก เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้จะมีด้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่ากลุ่มที่มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก การใช้งาน เช่น แมนเดรลสำหรับแม่พิมพ์งานอัดขึ้นรูปทองเหลือง โลหะนิกเกิลผสม และเหล็กกล้า สำหรับเกรดที่มีการใช้งาน คือ H21 อย่างไรก็ตาม เกรดนี้มีความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำกว่ากลุ่มที่มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก และจะมีราคาแพงเนื่องจากทังสเทนที่เป็นส่วนผสมมีราคาสูง การใช้งานจึงไม่นิยมใช้ โดยจะสามารถเลือกใช้เป็นกลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมแทน ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

2.3.4.4.3 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมหลัก เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับกลุ่มที่มีทังสเทนเป็นส่วนผสมหลัก จึงทำให้กลุ่มมีข้อได้เปรียบมากกว่าทั้งในด้านราคาที่ถูกลง และความต้านทานต่อการแตกร้าว (heat cracking) ในขณะใช้งานลักษณะร้อนเย็นสลับกัน แต่ข้อควรระวัง คือ ในการอบชุบจะสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย จึงต้องใช้เตาที่ควบคุมบรรยากาศ เกรดที่มีการใช้งาน เช่น H42

2.3.4.5 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (saws), ใบตัด (milling cutters) เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะรักษาความแข็งไว้ไม่ได้ เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.3.4.5.1 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลัก ปริมาณทั้งสแตนที่สูงมาก (12-20%) จะเพิ่มคุณสมบัติ ความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ปริมาณคาร์บอนกับธาตุผสมที่สูงมีผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูง และมีปริมาณคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง (ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งจะมีผลทำให้ด้านทานการสึกหรอดีเยี่ยม นอกจากนี้ส่วนผสมของวานาเดียมซึ่งฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง และกระจายตัว จะช่วยป้องกันการขยายตัวของเกรนได้ในช่วงที่อุณหภูมิสูง และทำให้เกรนมีความละเอียดซึ่งส่งผลถึงความเหนียวของเหล็กด้วย เกรดที่นิยมใช้งาน คือ T1

2.3.4.5.2 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมหลัก เป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากโมลิบดีนัมส่งผลให้คุณสมบัติคล้ายคลึงกับการผสมทั้งสแตน โดยพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง การทนต่อการเสียดสี หรือความเหนียวจะใกล้เคียงกัน โดยโมลิบดีนัม 1% จะแทนทั้งสแตนประมาณ 1.6-2.0% สำหรับข้อแตกต่างมีเพียงเล็กน้อย คือ กลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมจะต้องระวังการสูญเสียคาร์บอนในการอบชุบ เนื่องจากทั้งสแตนมีราคาสูงกว่าโมลิบดีนัมมาก ปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่จึงนิยมกลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัม เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น M2 M4 และ M42

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเติมธาตุโคบอลต์มากกว่า 10% เพื่อให้ได้คุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า 2 กลุ่มแรก ทำให้ได้เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงประเภทซูเปอร์ (Superhigh-speed tool steels) แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ การสูญเสียคาร์บอนในระหว่างการอบชุบ และการสั่นและกระแทกแรงๆ เนื่องจากเป็นเกรดที่เปราะมาก

2.3.4.6 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 175-200°C ภายใต้ความดันสูง มีการกัดกร่อนจากสารเคมี และต้องรับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกด้วย ดังนั้นคุณสมบัติสำคัญจะต่างไปจากเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น

โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาถึง ได้แก่ ความสามารถในการกลึงไส ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว ซึ่งจากคุณสมบัติข้างต้นหากนำเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ไปทำงานเย็นหรือทำงานร้อนมาใช้ก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่ากับการใช้งานเหล็กกล้าที่ใช้งานเฉพาะสำหรับกลุ่มนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถใช้ผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดสำหรับโลหะผสมที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี และตะกั่วได้เช่นกัน เหล็กกล้าแม่พิมพ์ที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.3.4.6.1 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติกกลุ่ม Pre-hardened steels เป็นกลุ่มที่มีคาร์บอนระดับ 0.20-0.30% มีโครเมียม นิกเกิล และ โมลิบดีนัมผสมในระดับปานกลาง เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติการกลึงไส (machinability) ดีมาก แต่ไม่สามารถทำการผลิตด้วยวิธีกัด (hubbing / hobbing) ได้ โดยในการผลิตแม่พิมพ์จะนำเหล็กมาชุบแข็งก่อนการเจาะหรือตัดให้เป็นช่องว่าง และภายหลังทำเป็นแม่พิมพ์แล้วก็ไม่จำเป็นต้องชุบแข็งอีกสามารถใช้งานได้เลย หรืออาจทำการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการรูบรูซึ่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการต้านทานต่อการสึกหรอ เกรดที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ P20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีธาตุผสมต่ำ ทำให้การใช้งานมีข้อจำกัดสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ P20 ยังเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีด (die casting) โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี ตะกั่ว และดีบุก อีกเกรดที่นิยม ได้แก่ P21 ซึ่งผสมนิกเกิล และอะลูมิเนียม ทำให้ในระหว่างการอบชุบความร้อนจะเกิดการตกตะกอนของสารประกอบนิกเกิล-อะลูมิเนียมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างชิ้นงานได้ ดังนั้นเกรดนี้จึงมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และมีความเหนียวมากกว่า P20 ที่ความแข็งแรงเดียวกัน สำหรับการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าเกรดนี้จะไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการรูบรูซึ่ง แต่จะใช้วิธีในทรายดังแทน

2.3.4.6.2 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติกกลุ่ม Case hardening steels เป็นกลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำระดับ 0.07-0.10% ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการกัด (Hobbing / Hubbing) โดยการผลิตจะนำเหล็กกล้ามาทำการอบอ่อนก่อนการกัด แล้วจึงนำไปชุบผิวแข็ง ซึ่งอาจทำได้ด้วยกระบวนการคาร์บูไรซิง หรือไนตรายดิง (เนื่องจากเหล็กกลุ่มนี้ไม่สามารถทำการชุบแข็งได้) สุดท้ายจึงนำไปขัดผิวให้เรียบหรืออาจนำไปเคลือบผิวด้วยโครเมียมแข็งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน เกรดที่นิยมใช้ ได้แก่ P4 และ P6

2.3.4.6.3 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติกที่ทนการกัดกร่อนสูง ในการใช้งานแม่พิมพ์ที่ต้องการคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนสูงสามารถทำได้โดยการชุบผิวด้วยโครเมียม แต่ก็จะมีปัญหาที่เกิดจากการแตกร่อนของชั้นเคลือบเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทน

ซิติค เช่น เกรด 420 440C เป็นต้น โดยจะใช้ในสภาวะที่ต้องการคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนสูง เช่น การฉีดพลาสติกในกลุ่มพีวีซี อะซิเตท (ซึ่งอาจทำให้เกิด HCl ในระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก) หรือการงานที่มีความชื้นสูง หรือต้องการผิวงานที่สวยงาม โดยเหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีความสามารถในการชุบแข็งสูง ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม ด้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง และมีคุณสมบัติคงรูปจากการอบชุบความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังมีการใช้งานสำหรับทำแม่พิมพ์ฉีดแก้วด้วย เช่น แผ่นกระจกบนทีวี และคอมพิวเตอร์ ซึ่งในกระบวนการผลิตแก้วจะต้องการแม่พิมพ์ที่ด้านทานต่อการสึกหรอสูง ด้านทานต่อการเกิดสเกลที่อุณหภูมิสูง ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และความสามารถในการขัดผิวให้เรียบได้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก

เกรด	ด้านทานการเสียดสีคาร์บอน	ความลึกในการชุบแข็ง	การบิดเบี้ยว	ด้านทานต่อการแตก	ความแข็งโดยทั่วไป (HRC)	การกลึงไส*	ความเหนียว*	ความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูง*	ความด้านทานต่อการสึกหรอ*
P4	สูง	สูง	ต่ำมาก	สูง	58-64 (ชุบแข็งผิว)	5	9	4	1
P6	สูง		อากาศ : ต่ำมาก	สูง	58-61	6	9	3	1
			น้ำ : ต่ำ		(ชุบแข็งผิว)				
P20	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	28-37	8	8	2	1
P21	สูง	ลึก	ต่ำมาก	สูงที่สุด	30-40	5	8	4	1
					(หลังจาก aging ที่ 510-550°C)				

หมายเหตุ * สำหรับระดับความสามารถด้านการกลึงไส ความเหนียว ความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูง ความด้านทานต่อการสึกหรอ ตัวเลขยิ่งสูงหมายถึงยิ่งคุณสมบัติ

สรุปกลุ่มหลัก ๆ ของเหล็กกล้าเครื่องมือและสัญลักษณ์ตาม AISI

W = เหล็กกล้าเครื่องมือที่ชุบแข็งด้วยน้ำ Water-hardening tool steels

S = เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก Shock-resisting tool steels

O = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน Oil-hardening cold-work tool steels

A = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยลม Air-hardening, medium-alloy cold-work tool steels

D = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นผสมโครเมียมและคาร์บอนสูง High-carbon, high-chromium cold-work tool steels

P = เหล็กทำแม่พิมพ์ Mold steels

H = เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน Hot-work tool steels, chromium, tungsten, and molybdenum

T = เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม W Tungsten high-speed tool steels

M = เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม Mo Molybdenum high-speed tool steels

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ

กระบวนการ	คุณสมบัติที่ต้องการ	ชนิดเหล็กกล้าเครื่องมือที่เลือกใช้
หล่อแบบฉีด (die casting)	รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง, ด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock), ด้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง, การบิดเบี้ยวต่ำ, ความสามารถในการกลึงไสสูง, ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง	H13, P20
แม่พิมพ์สำหรับพลาสติกและยาง	ความต้านทานแรงอัด, ความแข็งที่ผิวสูง, ความแข็งแรงที่แกนสูง, ความสามารถในการกลึงไส, ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง, ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ, ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว (เฉพาะกรณีที่ใช้ในงานในสภาวะที่มีกัดกร่อนสูง)	S1, O1, A2, D2, P6, P20, P21, H13

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ

กระบวนการ	คุณสมบัติที่ต้องการ	ชนิดเหล็กกล้า เครื่องมือที่ เลือกใช้
ทุบขึ้นรูปร้อน (hot forging)	ความเหนียว, รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง, ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง, ต้านทานต่อการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock), ทนการสึกหรอ	H11, H12
อัดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion)	ความเหนียว, รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง, ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง, ต้านทานต่อการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock), ทนการสึกหรอ	H11, H12, H13
ทุบหัวเย็น (cold heading)	ความเหนียว, ความแข็งแรง, ทนการสึกหรอ, รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง จากการแปรรูป , ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง	W1, W2, M1, M2, D2
หัวกดอัดขึ้นรูปเย็น(cold extrusion punch)	ความแข็งแรง, ทนการสึกหรอ, ทนการเสียดสี, รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง) , ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง จากการแปรรูป	A2, D2, M2, M4
แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (cold extrusion die)	ความเหนียว, ทนการสึกหรอ	O1, W1, A2, D2
ลูกรีดขึ้นเกลียว (thread rolling die)	ความแข็งแรง, ทนการสึกหรอ, ความเหนียว, รักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง) , ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง)	A2, D2, M2

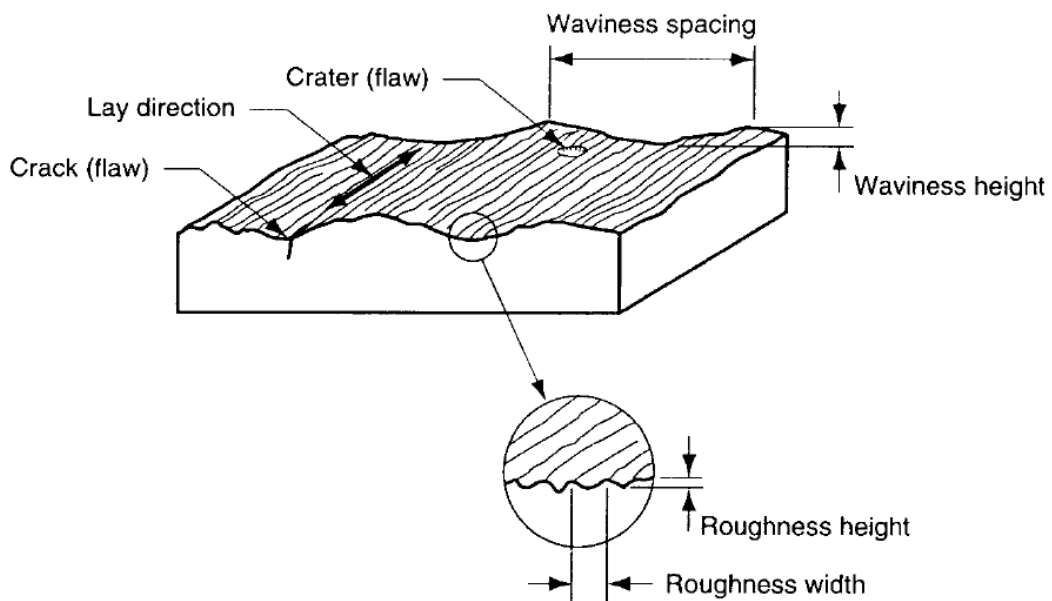
ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ตัวอย่างการใช้งานหลักกล้าเครื่องมือ

กระบวนการ	คุณสมบัติที่ต้องการ	ชนิดเหล็กกล้า เครื่องมือที่ เลือกใช้
Shear spinning	ความแข็ง, ทนการสึกหรอ, ความเหนียว, รักษาความแข็งไว้ ได้ที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง), ด้านทาน ต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง)	A2, D2, M2
ตัดโลหะร้อน (hot shearing)	ความเหนียว, สามารถรักษาคมตัดได้ดี, รักษาความแข็งไว้ ได้ที่อุณหภูมิสูง, ด้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง, สามารถรับแรงกระแทกซ้ำๆ ได้, ทนการสึกหรอ, ด้านทาน ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock)	H11, H12, H13
ตัดโลหะเย็น (cold shearing)	ความแข็ง, ความเหนียว, สามารถรักษาคมตัดได้ดี, สามารถ รับแรงกระแทกซ้ำๆ ได้	D2, A2, S2, S5, S7
แม่พิมพ์ลาก ขึ้นรูป (drawing)	ความแข็ง, ความเหนียว, ทนต่อการสึกหรอ	W1, O1, A2, D2
เครื่องมือเจาะ หรือคว้าน (boring tools)	สามารถ รักษาความแข็งคมตัดได้ดีมาก, รักษาความแข็งไว้ ได้ที่อุณหภูมิสูง, ความแข็งสูง, ทนต่อการเสียดสี, ทนต่อ การสึกหรอ	M2, T1, T4
สว่าน (drills)	สามารถ รักษาความแข็งคมตัดได้ดีมาก, รักษาความแข็งไว้ ได้ที่อุณหภูมิสูง, ความแข็งสูง, ทนต่อการเสียดสี, ทนต่อ การสึกหรอ	M2, T1
Milling cutters	สามารถ รักษาความแข็งคมตัดได้ดีมาก, รักษาความแข็งไว้ ได้ที่อุณหภูมิสูง, ความแข็งสูง, ทนต่อการเสียดสี, ทนต่อ การสึกหรอ	T1, T4

2.4 ความหยาบละเอียดของผิวงาน [5]

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของผิวงานที่ผ่านการแปรรูปและผ่านการตัดเฉือน

ผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น งานกัด งานกลึง และงานเจียรระไน ฯลฯ เมื่อมองด้วยสายตาเราจะเห็นว่าผิวของชิ้นงานมีความเรียบ แต่เมื่อนำมาขยาย ก็จะพบว่าผิวงานเหล่านั้น ขรุขระเป็นคลื่น สูง - ต่ำไม่เท่ากัน โดยเฉพาะถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูง - ต่ำ แตกต่างกันมาก ก็แสดงว่าผิวของชิ้นงานนั้นมีความหยาบของผิวมาก แต่ถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูง - ต่ำน้อย แสดงว่ามีความเรียบของผิวมากหรือเรียบมากกว่า ซึ่งความเรียบของผิวนี้ จะมีความจำเป็นสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลบางชนิด เช่น ตลับลูกปืน เป็นต้น แต่สำหรับชิ้นงานบางชนิดก็อาจจะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องระบุความหยาบละเอียดของผิวงาน เพราะจะทำให้เสียเวลาในการผลิต [5]



รูปที่ 2.17 ส่วนต่าง ๆ ของความหยาบละเอียดของผิวงาน

1. ผิวงาน (Surface) หมายถึง ขอบเขตหรือบริเวณ ที่แยกออกจากส่วนเนื้อวัสดุงาน รูปร่าง และลักษณะผิวงาน ระบุได้ด้วยรูปภาพ (Drawing) หรือคำอธิบายคำจำกัดความ (Descriptive Specifications)
2. รูปทรงผิว (Profile) หมายถึง เส้นที่แสดงลักษณะพื้นผิวงาน ตลอดภาคหน้าตัดที่ถูกนำมาพิจารณา

3. ความหยาบของผิว (Roughness) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปอันเนื่องมาจากขบวนการผลิต

4. คลื่นของผิวงาน (Waviness) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงาน ที่มีระยะในการพิจารณา กว้างกว่าช่วงความหยาบผิว เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของทั้งชิ้นงาน และการหลวมคลอนของชิ้นส่วน เครื่องจักรกล รวมทั้งการสั่นสะเทือนขณะทำการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.17

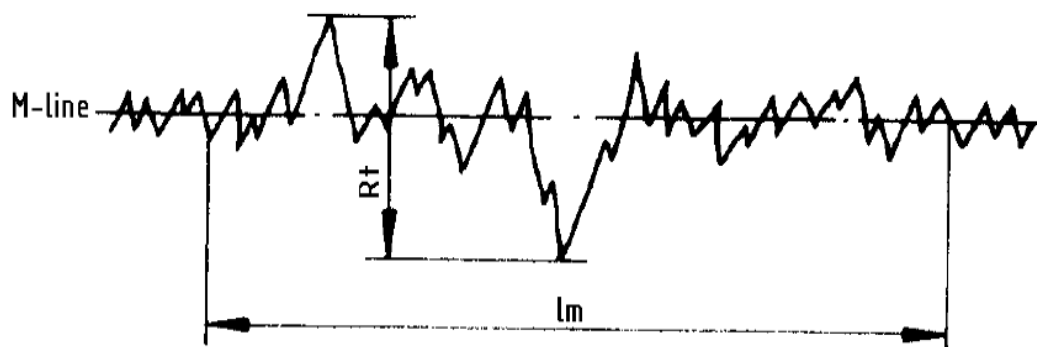
5. Flaw หมายถึง ความผิดปกติของผิวงาน ที่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวงาน เช่นรอยขีดข่วน รอยแตก และรูพรุน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.17

6. Lay หมายถึง แนวทิศทางของรอยสัน ส่วนยอดความหยาบของผิวที่ทำการตรวจสอบ ดังรูปที่ 2.17

2.4.2 การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานตามมาตรฐานของ ISO 4287

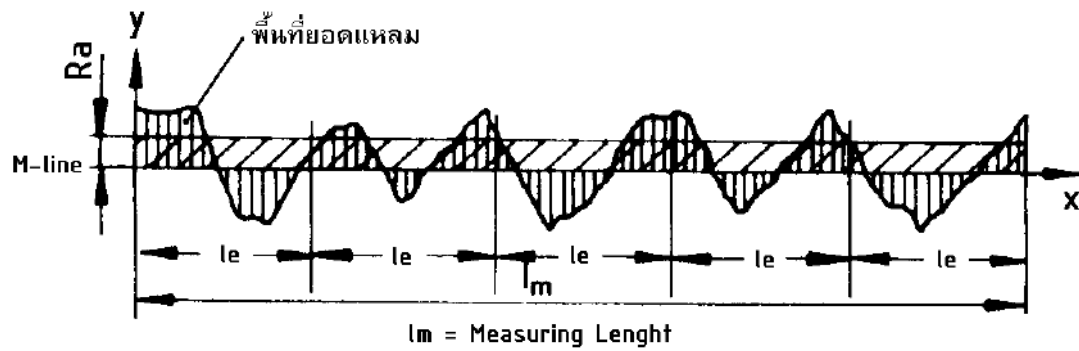
การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานที่จะกล่าวถึงนี้ ประกอบด้วย ค่า R_t , R_a และ R_z ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) โดยแต่ละค่ามีวิธีการวัด ดังนี้ [6]

2.4.2.1 ค่า R_t หมายถึง ค่าวัดจากจุดสูงสุดไปยังถึงจุดต่ำสุดของผิวงาน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงค่าวัดจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของผิวงาน

2.4.2.2 ค่า R_a หมายถึง ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M - Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หาค่าด้วยความยาวเฉลี่ย (L_m) โดยที่ค่าของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.19



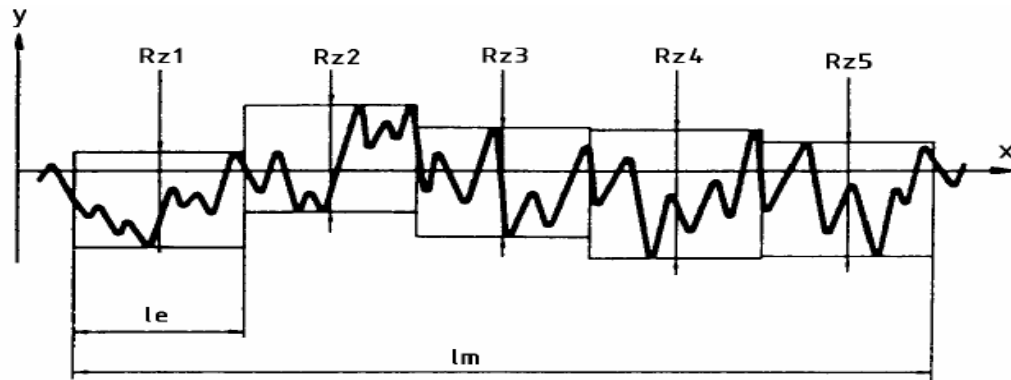
รูปที่ 2.19 แสดงการหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าและชั้นความหยาบของผิวงาน ตามมาตรฐานของ ISO1302 –1978 [6]

ค่า Ra (หน่วย : ไมโครเมตร)	ชั้นความหยาบละเอียดของผิว
50.00	N12
25.00	N11
12.50	N10
6.30	N9
3.20	N8
1.60	N7
0.80	N6
0.40	N5
0.20	N4
0.10	N3
0.05	N2
0.02	N1

หมายเหตุ: Ra ค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิต

2.4.2.3 ค่าความหยาบ Rz หมายถึง ค่าหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตรดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน

ตารางที่ 2.4 แสดงขอบเขตความเรียบผิวงานของกระบวนการการผลิต [7]

Process	Roughness height rating, μm (μin) Ra												
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.8	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
	(2000)	(1000)	(500)	(250)	(125)	(63)	(32)	(16)	(8)	(4)	(2)	(1)	(0.5)
Flame cutting													
Snagging													
Sawing													
Planing, shaping													
Drilling													
Chemical milling													
Elect. discharge mach.													
Milling													
Broaching													
Reaming													
Electron beam													
Laser													
Electro-chemical													
Boring, turning													
Barrel finishing													
Electrolytic grinding													
Roller burnishing													
Grinding													
Honing													
Electro-polish													
Polishing													
Lapping													
Superfinishing													
Sand casting													
Hot rolling													
Forging													
Perm. mold casting													
Investment casting													
Extruding													
Cold rolling, drawing													
Die casting													

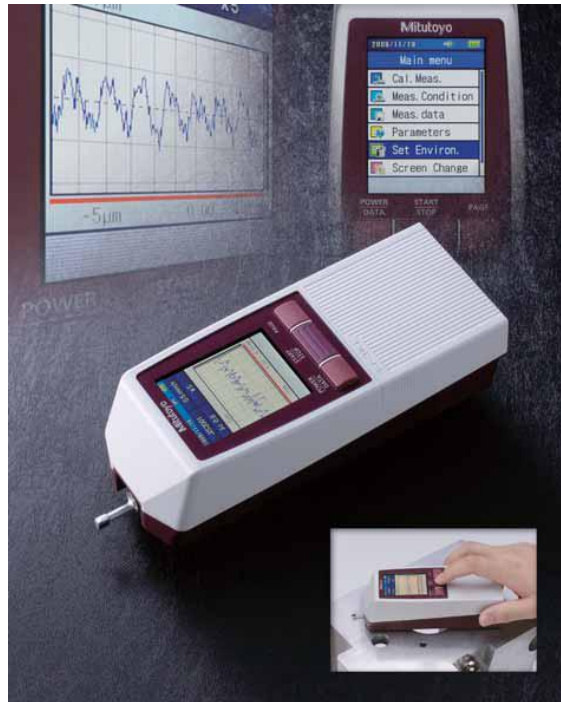
The ranges shown above are typical of the processes listed.
Higher or lower values may be obtained under special conditions.

 Average application
 Less frequent application

Smoother texture
 higher cost
 Rougher texture
 lower cost

2.4.3 การตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิว

การตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิว โดยทั่วไปจะใช้วิธีการตรวจสอบผิวของชิ้นทดสอบเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการเจียรนัยด้วยเครื่องวัดผิว ดังรูปที่ 2.21 [6]



รูปที่ 2.21 เครื่องมือวัดค่าความหยาบผิวงาน

2.5 การชุบแข็งและการชุบผิวแข็ง [12]

2.5.1 การชุบแข็ง คือ การอบชุบความร้อนวิธีหนึ่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนในด้านความแข็งและความต้านทานการขัดสี. กระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงอุณหภูมิที่โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ ปล่อยให้เย็นลงในเตาจนกระทั่งได้โครงสร้างออสเทนไนต์ที่สม่ำเสมอ แล้วทำให้เย็นตัวด้วยอัตราเร็วพอที่ทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ หรืออัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical cooling rate). เพื่อที่จะให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่สม่ำเสมอ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

2.5.1.1 ปริมาณของธาตุคาร์บอน : เหล็กกล้าที่มีปริมาณร้อยละของธาตุคาร์บอนยิ่งสูง จะทำให้มีโอกาสในการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์มากขึ้น นอกจากนี้ ธาตุผสมอื่น เช่น นิเกิล โครเมียม และ

โมลิบดีนัม ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) โดยการลดอัตราการเย็นตัววิกฤตอีกด้วย

2.5.1.2 อัตราการเย็นตัว : อัตราการเย็นตัวที่ต้องการเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้น ไม่ควรต่ำกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ผิวของชิ้นงานจะมีอัตราการเย็นตัวมากกว่าใจกลางเสมอ นอกจากนั้นยังชิ้นงานมีขนาดใหญ่ อัตราเร็วการเย็นตัวตลอด ชิ้นก็จะต่ำลงด้วย ด้วยเหตุนี้ที่สภาวะเดียวกัน ชิ้นงานที่ยิ่งเล็กจะยิ่งมีโอกาสที่จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่สมบูรณ์

- ตัวกลางการเย็นตัวที่ต่างกัน จะให้อัตราเร็วการเย็นตัวที่ต่างกันด้วย เช่น น้ำ และน้ำเกลือ (น้ำที่มีโซเดียมคลอไรด์หรือแคลเซียมคลอไรด์ละลายอยู่ด้วยปริมาณหนึ่ง) จะให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วกว่าน้ำมัน. นอกจากนั้นการปั่นกวสารถัวกลางยังเป็นการเพิ่มอัตราการเย็นตัวอีกวิธีหนึ่งด้วย

2.5.2 การชุบผิวแข็ง (Hardening) [4]

คือการเพิ่มความแข็งให้กับผิวชิ้นงาน เพื่อความทนทานต่อการสึกหรอ และทนทานต่อ Dynamic Stresses โดยนำเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติทนทานต่อการใช้งานหนัก มาทำให้ผิวของเหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น การชุบผิวแข็งแบ่งได้เป็น 4 วิธี

2.5.2.1 Case Hardening คือการนำเหล็ก Low carbon ไปอบกับสารที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ จนมีอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤตบนผิวของชิ้นงานเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นถึง 0.85% ต่อมาจึงทำ Heat Treatment ซึ่งจะได้ชิ้นงานมีผิวแข็งทนทานต่อการสึกหรอ การเพิ่มปริมาณคาร์บอนเรียกว่า Carburising แยกเป็น 3 ประเภท คือ

- Solid Carburising คือการนำชิ้นงานสำเร็จ อัดด้วยสารลงในกล่องเหล็กกล้าให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารดังกล่าวให้ทั่วถึงทุกซอกทุกมุม บริเวณผิวชิ้นงานที่ไม่ต้องการให้เกิดการชุบแข็งก็อาจปิดด้วยแผ่นทองแดงหนา 0.075 มม. ฝากล่องใช้ดินเหนียวอัดให้แน่นไม่ให้อากาศเข้าได้ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 900 - 950°C เป็นเวลา 3 - 8 ชม. และปล่อยให้เย็นตัวช้าๆในเตา สารที่นำมาอบด้วย เช่น ถ่านไม้ ถ่านโค้กปนผสมกับตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยา แบเรียมคาร์บอเนต เมื่อนำไปอบแบเรียมคาร์บอเนตจะสลายตัวในออกซิเจน ซึ่งจะไปออกซิไดส์คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดเป็น Nascent Carbon หรือ คาร์บอนที่เกิดใหม่ ที่จะซึมเข้าไปในผิวเหล็กกล้า โดยมีความลึกของผิวชุบแข็งระหว่าง 0.05 - 1.55 มม. ชิ้นงานที่นำมาอบที่ 900°C เป็นเวลา 1 ชม. จะมีความลึกของผิวชุบแข็งประมาณ 0.25 มม. ต่อชั่วโมง

- Liquid Carburising สารที่นำมาอบด้วยประกอบด้วยไซโตเนียมไซยาไนด์ ประมาณ 20 - 45% ไซโตเนียมคาร์บอเนต และไซโตเนียมคลอไรด์ ชิ้นงานจะถูกนำไปใส่ตะกร้ามาจุ่มลงในอ่างเกลือหลอมเหลว ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 870 - 950°C หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นตัวโดยเร็ว วิธีนี้เป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ ชิ้นงานจึงบิดงอน้อย เป็นวิธีที่ประหยัด และเหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็กที่ต้องการผิวชุบแข็งเพียงบางๆ การชุบชิ้นงานที่ทำจาก Mild Steel และใช้รับแรงน้อย ควรชุบผิวแข็งหนาไม่เกิน 0.25 มม. ทำได้โดยแช่ชิ้นงานไว้ในอ่างเกลือหลอมเหลว 45 นาที ความหนาสูงสุดที่ทำได้โดยค่าใช้จ่ายไม่เพิ่มขึ้นคือ 0.75 มม. โดยแช่ชิ้นงานเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ข้อระวัง: เนื่องจากการชุบผิวแข็งวิธีนี้ต้องใช้ ไซยาไนด์ สารพิษรุนแรงจึงต้องระมัดระวังมาก เหนืออ่างหลอมเหลวจะต้องมีที่ดูดควันอย่างดี ต้องระมัดระวังไม่ให้ของเหลวกระเด็นออกนอกอ่าง และต้องระมัดระวังไม่ให้ไซยาไนด์เข้าสู่ร่างกายโดยเฉพาะอย่างยิ่งทางบาดแผล

- Gas Carburising คือการอบชิ้นงานให้มีอุณหภูมิประมาณ 900°C ภายในเตาที่มีก๊าซ อีเทน (Ethane) โพรเพน (Propane) บิวเทน (Butane) ที่เหมาะสม ผิวที่ชุบแข็งจะมีความลึกประมาณ 0.25 - 1.0 มม. โดยใช้เวลาอบไม่เกิน 4 ชั่วโมง

Gas Carburising อีกแบบหนึ่งคือ Carbonitriding Plain Carbon Steels จะเกิดทั้ง Carburising และ Nitriding หลังจากอบชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 - 950°C ภายในเตาที่มีก๊าซแอมโมเนีย และไฮโดรคาร์บอน อุณหภูมิที่เลือกอบจะขึ้นอยู่กับความลึกของผิวที่ต้องการชุบให้แข็งจะประมาณ 820 - 840°C หลังจากนั้นจึงนำออกจากเตาทำให้เย็นตัวโดยเร็ว ชิ้นงานที่ได้จะแตกร้าว และบิดงอน้อย เนื่องจากอบที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ต้องทำ Heat Treatment ซ้ำอีก

2.5.2.2 Nitriding (Surface Hardening) คือ การทำให้ผิวชิ้นงานเกิดเป็นโลหะไนไตรด์ ด้วยการอบชิ้นงานที่ผ่านการทำ Heat Treatment มาแล้ว ในภาชนะปิดที่มีก๊าซแอมโมเนียหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา อบจนมีอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 - 4 วัน แอมโมเนียจะสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน และไนโตรเจน จะซึมเข้าไปในผิวชิ้นงานเกิดเป็นโลหะไนไตรด์ โลหะพวก Plain Carbon Steels ไม่ควรนำมาทำ Nitriding เนื่องจากจะเกิดคาร์บอนไนไตรด์ ที่ผิวชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานเปราะเกินไป

ส่วนโลหะที่เหมาะสมกับการทำ Nitriding ได้แก่ โลหะผสม Nitralloy ซึ่งจะมีคาร์บอน 0.2 - 0.5% โครเมียม 1.5% อลูมิเนียม 1% และโมลิบดีนัม 0.2% ผิวชิ้นงานจะเกิดเป็นโครเมียม และอลูมิเนียมไนไตรด์ทำให้ผิวแข็งขึ้น เนื่องจากการเกิดโครเมียมไนไตรด์ เกิดเข้าไปในผิวชิ้นงานได้ลึกกว่าอลูมิเนียมไนไตรด์มาก ดังนั้น ความแข็งภายในผิวชิ้นงานจะค่อยๆ ลดลง เป็นลำดับตามความลึก โมลิบดีนัมที่มีอยู่จะช่วยปรับสภาพเกรนบริเวณแกนกลางชิ้นงาน ทำให้ทนทานต่องานหนักได้ดี

ข้อดีของการทำ Nitriding

- เนื่องจากชิ้นงานได้ผ่านการทำ Heat treatment มาก่อนทำ Nitriding การบิดงอหรือแตกร้าวของชิ้นงานซึ่งเกิดจากการทำให้เย็นตัวโดยเร็วจึงไม่มี และหลังจากผ่านการทำ Nitriding แล้วจะปราศจากความเครียดภายในเนื้อโลหะ
- ผิวชิ้นงานจะแข็งประมาณ 1050 - 1100 HV ที่ความลึกประมาณ 0.03 – 0.08 มม.
- ความแข็งของผิวชิ้นงานจะคงสภาพที่อุณหภูมิ 500°C ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการทำ Carburising จะมีความแข็งของผิวเพียงประมาณ 200°C เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 200°C ผิวชิ้นงานจะอ่อนตัวลง
- ทนทานต่อการกัดกร่อนต่างๆ ได้ดีมาก
- มีความทนทานต่อการล้าตัว (Fatigue) ของเนื้อโลหะ
- การทำ Nitriding จะเสียค่าใช้จ่ายในขั้นต้น เช่น ค่าก่อสร้างโรงงานมากกว่าการชุบแข็งแบบอื่น ๆ และยังต้องใช้โลหะผสมชนิดพิเศษอีกด้วย แต่ถ้าต้องชุบแข็งชิ้นงานจำนวนมากๆ วิธีนี้จะถูกกว่าวิธีอื่น ๆ

2.5.2.3 Flame Hardening คือ การใช้เปลว Oxy Acetylene เผาชิ้นงานจนมีอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤติ แล้วพ่นละอองน้ำให้ชิ้นงานเย็นตัว เหล็กกล้าที่ทำ Flame Hardening ควรจะมีปริมาณคาร์บอน 0.4 – 0.6 % เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวแข็งและทนทานต่อการใช้งานหนัก เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.45 % หลังจากทำ Flame Hardening จะมีผิวแข็งประมาณ 600 – 650 HV ที่ความลึกประมาณ 3.0 – 3.8 มม. ตัวอย่างชิ้นงาน เช่น เกียร์ ลูกเบี้ยว ซีพียงต่างๆ ก่อนที่จะนำชิ้นงานมาชุบแข็งควรจะลดความเครียดภายในออกเสียก่อน หลังจากทำการชุบผิวแข็งแล้วจึงทำการ Annealing ที่อุณหภูมิต่ำๆ เพื่อลดความเครียดอีกทีหนึ่ง

2.5.2.4 Induction Hardening คือ การให้ความร้อนผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ด้วยกระแสความถี่สูงทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤติภายในเวลา 3 – 5 วินาที แล้วทำให้เย็นตัว โดยการพ่นละอองน้ำ ความลึกของผิวชุบแข็งที่ได้มีค่าประมาณ 3.2 มม. เหล็กกล้าที่จะนำมาทำ Induction Hardening ควรมีปริมาณคาร์บอน 0.4-0.6% วิธีนี้ถ้าควบคุมเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งได้ตามกำหนด การที่ผลึกจะขยายขนาดขึ้น การบิดงอของชิ้นงาน หรือ De-Carburisation จะไม่มีโอกาสเกิดขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปฐุณี เพชรไพรินทร์ [8] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและความสึกหรอของคมตัด ในการกัดทองเหลืองผสม พบว่าค่าความความเรียบผิวงาน ที่เกิดจากการใช้น้ำมันตัดทั้ง 2 ชนิด แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า สารหล่อเย็น มีผลต่อความเรียบผิวงาน เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านอื่น ๆ เช่น ความเร็วตัด พบว่า ความเร็วตัดมีผลต่อความเรียบผิวงาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ด้านอัตราป้อน พบว่า อัตราป้อนมีผลต่อความเรียบผิวงาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาด้านความสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างสารหล่อเย็นและความเร็วตัด พบว่า มีความสัมพันธ์กันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า สารหล่อเย็นและความเร็วตัด มีผลต่อความเรียบผิวงาน เมื่อพิจารณาด้านความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอัตราป้อน พบว่า ความเร็วตัดและอัตราป้อนมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า ความเร็วตัดและอัตราป้อน มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาด้านความสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างสารหล่อเย็น ความเร็วตัด และอัตราป้อน พบว่า ระหว่างสารหล่อเย็น ความเร็วตัดและอัตราป้อน มีความสัมพันธ์กันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า หล่อเย็นและความเร็วตัด และอัตราป้อน มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน และเมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ LSD พบว่า ความเร็วตัดและอัตราป้อนในแต่ละระดับมีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ประพล เปี่ยมศักดิ์ชัย [9] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น D2 พบว่าระยะป้อนลึกไม่ส่งผลต่อความเรียบผิวของผิวงาน ส่วนความเร็วตัด และอัตราป้อนทั้ง 3 ระดับ มีผลต่อความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น D2 กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วตัดจาก 50, 70 และ 90 เมตรต่อนาทีมีผลทำให้ความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น D2 น้อยลง และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจาก 100, 140 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาที มีผลทำให้ความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น D2 เพิ่มมากขึ้น

Eyup Bagci , และคณะ [10] ได้ศึกษาปัจจัยที่จะทำให้ค่าความเรียบผิวดีที่สุดในการกัดเหล็กcobalt - based alloy (satellite 6) ด้วยระยะป้อนลึก 3 ระดับ ได้แก่ 0.25, 0.5 และ 0.75 มิลลิเมตร, ความเร็วตัด 3 ระดับ ได้แก่ 50, 70 และ 90 เมตรต่อนาที และอัตราป้อน 3 ระดับ ได้แก่ 100, 140 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าทั้งสามปัจจัยมีผลต่อความเรียบผิว

J.M. Vieira และคณะ [11] ได้ศึกษาเรื่อง Performance of cutting fluid during face milling of steels เป็นการศึกษาประสิทธิผลของการใช้น้ำมันตัดเฉือนในงานกัดผิวราบเหล็กเหนียว ซึ่ง ประกอบด้วย น้ำมันตัดเฉือนแบบผสมน้ำ น้ำมันกึ่งสังเคราะห์และน้ำมันสังเคราะห์ การ กัด ผิวราบ เหล็ก เหนียว

AISI 8640 โดยใช้มีดคาร์ไบด์เคลือบผิวเปรียบเทียบกับงานกัดแบบแห้งเพื่อวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของมีด กำลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนและความเรียบผิวงานรวมทั้งศึกษาความสามารถในการหล่อเย็นของน้ำมันตัดเฉือน อุณหภูมิระหว่างการตัดเฉือนของวัสดุเหล็ก AISI 1020 โดยวิธีการใช้เทอร์โมคัปเปิล จากการทดลองพบว่า เมื่อตัดเฉือนแบบแห้งจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาคือ การใช้ น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันแบบผสมน้ำ และน้ำมันกึ่งสังเคราะห์ ตามลำดับ ส่วนกำลังที่ใช้ในการตัดเฉือนจะเป็นส่วนกลับผกผันกับอุณหภูมิส่วนอายุการใช้งาน ได้สูงที่สุดคือ การตัดเฉือนแบบแห้ง รองลงมาคือแบบสังเคราะห์และกึ่งสังเคราะห์ตามลำดับ การเกาะเกาะของคมตัดจะมีลักษณะเป็นแบบซี่คล้ายหวี ส่วนความเรียบผิวงานนั้น การตัดเฉือนแบบแห้งจะมีผิวงานที่ค่อนข้างเรียบกว่าการใช้ น้ำมันตัดเฉือนแบบ อื่น ๆ

ปัญญาคม เจริญไชย [13] ได้ศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของน้ำมันพืชและน้ำหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ที่มีต่อแรงกลึงเหล็กเครื่องมือ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและการสึกหรอของของมีดกลึง โดยใช้วิธีการกลึงปอกชิ้นงาน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย สารหล่อเย็น ความเร็วตัด และ อัตราป้อน ตัวแปรตามคือคุณภาพของผิวงานและการสึกหรอของมีดกลึง เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องกลึง ยันศูนย์ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เครื่องทดสอบหาความเรียบผิว และอุปกรณ์หาการสึกหรอมีดกลึง ชิ้นงานทดลองคือ เหล็กเครื่องมือ AISI 4140 ผลการศึกษาพบว่า สารหล่อเย็นไม่มีอิทธิพลต่อผลต่อการสึกหรอของมีดกลึง ความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อความเรียบ อย่างน้อยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อการสึกหรอของมีดกลึง มุมเลี้ยวของดอกตัดเกลียวไม่มีผลต่อการสึกหรอของดอกตัดเกลียว อย่างน้อยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 อัตราป้อนมีอิทธิพลต่อความเรียบผิว และการสึกหรอของมีดกลึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ชาญ ราชวงศ์ [15] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวในการกลึงงานแข็งโดยเปรียบเทียบกับคุณภาพผิวงานเจียระไนเป็นเกณฑ์ วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็ก SCM 4 ชุบแข็ง ปัจจัยที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย อัตราป้อน และความลึกในการป้อน ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผล คือ อัตราป้อนซึ่งมีผลต่อคุณภาพผิวงาน โดยที่อัตราป้อนต่ำจะให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวน้อยแต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนให้สูงขึ้นทำให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนความลึกในการป้อนไม่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน และระหว่างอัตราป้อนกับความลึกในการป้อนไม่เกิดอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน