

# วัสดุเครื่องมือตัด

สิริพรรณ นิลโพธิ์  
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและผลิตภัณฑ์ที่มีความละเอียดแม่นยำทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปในหลาย ๆ รูปแบบ รวมถึงการพัฒนาทางวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด ซึ่งในการใช้งานเครื่องมือตัดต้องรับแรงกระทำทั้งแรงคงที่ และแรงผันแปร (Static and Variable forces) การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและความเร็ว (Varying temperature and speed) ตลอดจนการเกิดการสึกหรอ (Wear) ฉะนั้น เครื่องมือตัดจึงควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความแข็งสูง (High Hardness) โดยเฉพาะความแข็งเมื่อได้รับความร้อน (Hot hardness) เพื่อสามารถทนต่อการตัดที่ความเร็วรอบสูงได้โดยไม่ลดอายุการใช้งาน

- มีความแกร่งสูง (High Toughness) เพื่อสามารถทนต่อการแตกหัก หรือการบิ่น (chipping) เนื่องจากแรงเค้น

- มีความทนต่อการสึกหรอ (Wear resistance) เพื่อที่จะมีอายุการใช้งานได้นานก่อนที่จะต้องลับคมใหม่

- ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical stability) หรือมีความเฉื่อยทางเคมี (Inertness) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับชิ้นงานที่นำมาตัด

จากความต้องการดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือตัดจากวัสดุต่าง ๆ ในช่วงเวลาต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีการพัฒนาเพื่อให้เครื่องมือตัดสามารถใช้งานที่ความเร็วตัด (Cutting speed) ที่สูง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้เร็วขึ้น ในสมัยแรก ๆ จะทำด้วยเหล็กกล้า เครื่องมือ (Carbon tool steel) แล้วพัฒนาต่อไปเป็นเหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนแปลงครั้งยิ่งใหญ่สำหรับการตัดโลหะและพัฒนาต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงวัสดุประเภทซิลิกอนไนไตรด์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงวัสดุและการใช้งานไว้พอเป็นสังเขปคือ

## 1 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Carbon tool steels)

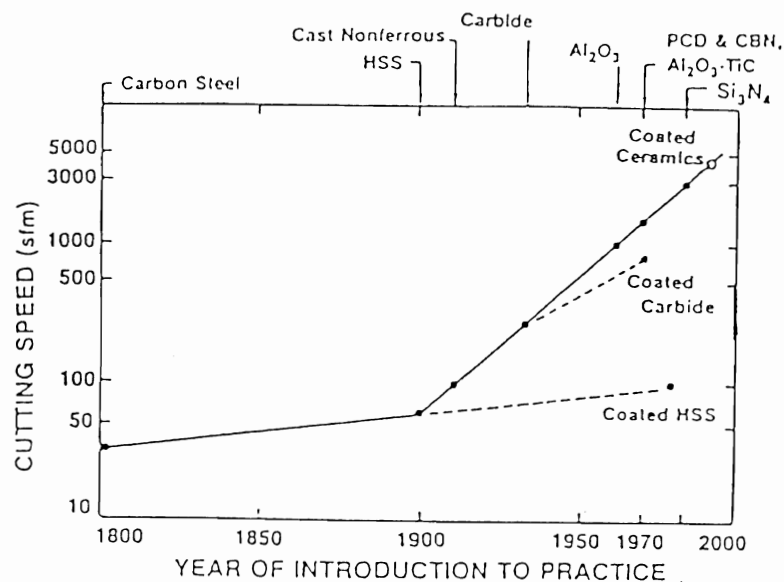
จัดเป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่เก่าแก่ที่สุด และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยฉับพลัน (Thermal Shock) และมีราคาไม่แพง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steels) ที่มีคาร์บอน 0.90–1.30% สามารถทำการ heat-treated เพื่อเพิ่มความแข็งและแข็งแรงและมีคมตัดที่ดีได้ แต่อย่างไรก็ตามเหล็กเกรดนี้จะสูญเสียคุณสมบัติไป คือความแข็งแรงจะลดลง เมื่อใช้งานจนเกินอุณหภูมิ 200° C เพราะจะเป็นการอบคืนไฟจนได้ความแข็งแรงต่ำลง (รูปที่ 2)

ต่อมาจึงมักนิยมใช้เหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Low / Medium Alloy steels) มาใช้งานทดแทนซึ่งจะมีการผสมธาตุอื่น ๆ อาทิ โมลิบดีนัม (Mo) และโครเมียม ทำให้มีความแข็งหรือ ผสมทั้งสแตน (W) เพื่อเพิ่มความต้านทานในการเสียดสี (Wear resistance) สำหรับวัสดุเหล่านี้นิยมใช้ทำเครื่องมือตัดจำพวก ดอกเจาะ ดอกกริมเมอร์ แม่พิมพ์ ฯลฯ ที่มีราคาถูก และมีความเร็วรอบในการใช้งานต่ำ

## 2 เหล็กกล้าความเร็วสูง (High - speed steels)

เหล็กกล้าความเร็วสูงเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) ที่มีการผสมธาตุต่าง ๆ อาทิ ทั้งสแตน (W) โครเมียม (Cr) วานาเดียม (Va) โมลิบดีนัม (Mo) และโคบอลต์ (Co) ทำให้เพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการเสียดสี และเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 650° C ดังนั้นสามารถตัดด้วยความเร็วรอบที่สูงกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือถึง 2 เท่า โดยมีอายุการใช้งานเท่า ๆ กัน

ในการใช้งานเหล็กกล้าความเร็วสูง จะใช้ในการทำเครื่องมือตัดจำพวกดอกสว่าน (Drilling) ตัวยับเกลียว (Tapping) ดอกกัด (milling) ดอกคว้าน (Reaming) ดอกสว่านแต่งรู (Broaching) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความเหนียวทำให้สามารถสร้างปลายมีดที่แหลมคมให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงสามารถนำมาสร้างเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ และราคาไม่สูง โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (4)



รูปที่ 1 การพัฒนาวัสดุที่เป็นเครื่องมือตัดโดยใช้ความเร็วในการตัดเป็นเกณฑ์

- Tungsten-type (T-Series) ประเภทนี้มีส่วนผสมของทังสเตน 18% โครเมียม 4% และวานาเดียม 1% มีคุณสมบัติที่ดีคือ ทนต่อการเสียดสีและทนต่อความร้อนได้ดี

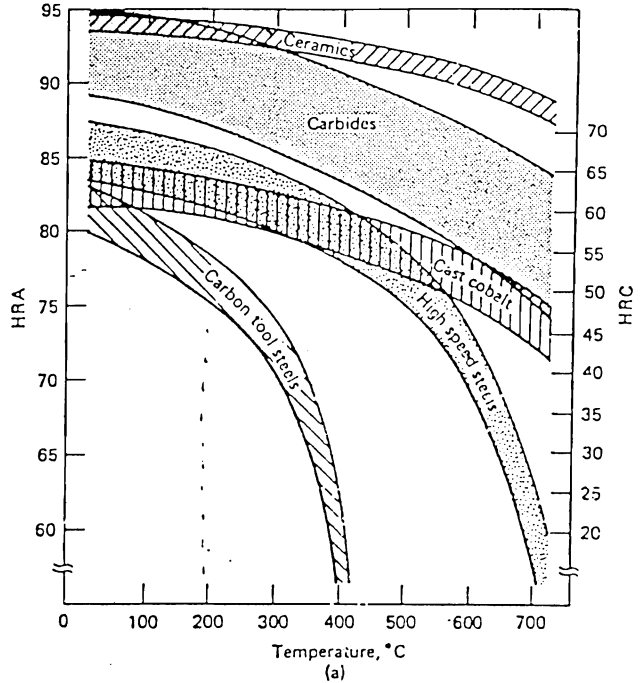
- Molybdenum type (M-Series) ประเภทนี้มีส่วนผสมของ โมลิบดีนัม 6% โครเมียม 4% และวานาเดียม 2% มีคุณสมบัติที่ดีคือทนต่อการเสียดสี และทนต่อแรงกระแทกได้ดี เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง

- Super HSS ส่วนผสมที่สำคัญสำหรับประเภทสุดท้ายคือ การเพิ่มปริมาณโคบอลต์ 2 % และ 15% ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการตัด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

### 3 โคบอลต์ผสมหล่อ (Cast Cobalt Alloys)

โคบอลต์ผสมหล่อหรือที่รู้จักกันดีในชื่อ "สเทลไลท์" (Stellite Tools) ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกในปี 1915 มีส่วนผสมที่ประกอบด้วยโคบอลต์ 38-50% โครเมียม 30-33% และมีทังสเตน 10-20% เนื่องจากมีค่าความแข็งที่สูง ( 58-64 HRC) ทำให้มีการทนการสึกกร่อนได้ดี และยังคงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง(รูปที่2) มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูง แต่ต่ำกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ และสามารถเพิ่มความเร็วยรอบในการตัดได้ประมาณ 25% เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าความเร็วสูง แต่อย่างไรก็ตามความแข็งที่ได้หลังจากการหล่อไม่สามารถอบชุบด้วยความร้อนให้ความแข็งต่ำลง หรือแข็งเพิ่มขึ้นได้การนำมาทำเครื่องมือตัดจึงขึ้นกับกรรมวิธีการหล่อ และการเจียรไนให้ได้รูปร่างตามต้องการ โดยปกติเครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุชนิดนี้ มักมีรูปทรงง่าย ๆ อาทิ เครื่องมือตัดคมเดียว ( Single - point cutting tool)หรือใบมีด (Saw blades)ในปัจจุบันวัสดุพวกนี้

นิยมนำมาทำเครื่องมือตัดน้อยลง เนื่องจากมีต้นทุนเพิ่มขึ้น การขาดวัตถุดิบประกอบกับได้มีการพัฒนาวัสดุซึ่งมีคุณภาพดีกว่าและต้นทุนการผลิตต่ำกว่า



รูปที่ 2 การผันแปรของความแข็งที่อุณหภูมิสูง (hot hardness) (Rockwell A , และ C Scales) ของวัสดุทำเครื่องมือตัดชนิดต่าง ๆ (5)

### 4 ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbides)

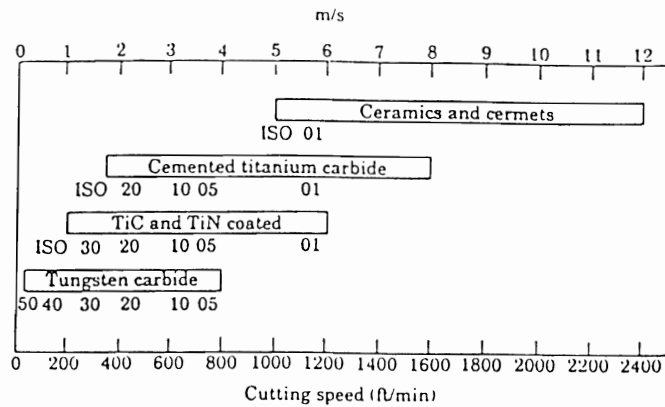
วัสดุเกรดนี้ได้นำมาใช้ครั้งแรกในปี 1930 โดยมีส่วนผสมของโลหะที่มีสารประกอบคาร์บอน และมีจุดหลอมเหลวสูง อาทิ WC TiC TaC มาผสมเข้ากับตัวประสานโคบอลต์ สำหรับพวกซีเมนต์คาร์ไบด์มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีความแข็ง (ในอุณหภูมิสูง) มีโมดูลัสของการยืดหยุ่นสูง (high modulus of elasticity) นำความร้อนได้ดี (high thermal conductivity) และมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ (low thermal expansion) จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงทำให้กลายเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการทำงานเป็นเครื่องมือตัดมากที่สุดชนิดหนึ่ง

สำหรับกลุ่มของคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นเครื่องมือตัดส่วนใหญ่สามารถแบ่งกลุ่มได้ดังนี้

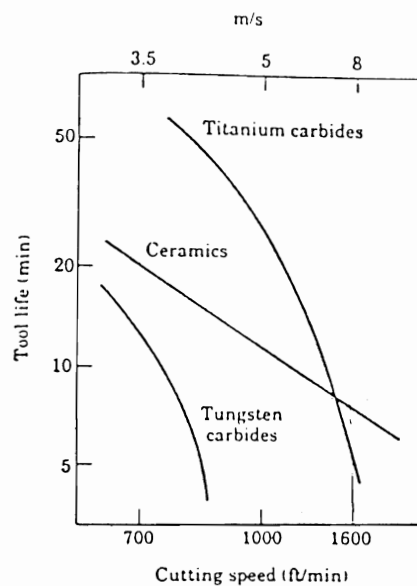
a) ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นทั้งสแตนและมีโคบอลต์เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยปกติใช้ในการตัดพวกวัสดุขูดถูที่ไม่ใช่กลุ่มเหล็ก (non ferrous abrasive materials) พวกเหล็กหล่อ และวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ นอกจากนี้ยังมีทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมพวกไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) แทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) และ นีโอเบียมคาร์ไบด์ (Niobium carbide) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอทางด้านงัด (Crater Wear) และเพิ่มค่าความแข็งที่อุณหภูมิสูง

ซึ่งวัสดุเหล่านี้นำไปใช้ในการแต่งรูปชิ้นงาน (Machining) พวกเหล็กกล้า (steels)

b) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ตัวประสานที่ใช้ในคาร์ไบด์กลุ่มนี้จะประกอบด้วยนิกเกิล (Ni) และโมลิบดีนัม (Mo) มีความทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์ และการใช้งานที่ต้องการความเร็วรอบสูงกว่า (รูปที่ 3) และมีอายุการใช้งานนานกว่า (รูปที่ 4) แต่มีความเหนียวน้อยกว่า นิยมใช้ในการตัดพวกโลหะแข็ง เหล็กกล้าและเหล็กหล่อเป็นหลัก ในการตัดที่มีความเร็วรอบสูง ประมาณ 400 - 1600 ฟุตต่ออนาที จะมีอายุการใช้งานนานกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3 ช่วงความเร็วรอบในการตัดที่เหมาะสมของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดชนิดต่าง ๆ



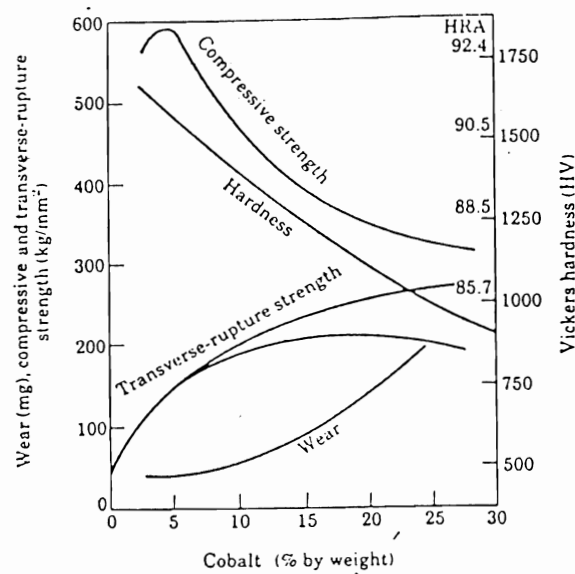
รูปที่ 4 กราฟแสดงอายุการใช้งานสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ ในงานกลึง (Turning) กับความเร็วในการตัด

C) พวคาร์ไบด์ชนิดเคลือบ (Coated Carbide) เป็นการนำเอาทั้งสแตนคาร์ไบด์มาเคลือบด้วยวิธี Chemical Vapor deposition (CVD) ให้ความหนาประมาณ 5-9 ไมครอน สารที่นำมาใช้เป็นตัวเคลือบได้แก่ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) หรือ อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งการเคลือบนี้สามารถนำไปใช้กับพวกเครื่องมือและแม่พิมพ์ที่เป็นพวกเหล็กกล้าก็ได้ นอกจากนี้การเคลือบให้มีความหนาหลายชั้น (Multilayer) ก็ได้มีการใช้ประโยชน์แล้วด้วยเช่นกัน คุณสมบัติของเครื่องมือตัดที่มีตัวเคลือบเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ มักจะทนต่อการสึกหรอเนื่องจากการขัดถูได้ดี ในขณะที่เคลือบพวกไทเทเนียมไนไตรด์จะป้องกันการเกาะติดระหว่างเครื่องมือตัดกับเศษชิ้นงาน ทำให้ลดการสะสมของเศษชิ้นงาน (Pickup) และการถาก (Galling) ได้ดี ซึ่งการเคลือบด้วยไททาเนียมไนไตรด์จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดให้นานขึ้น แต่เครื่องมือตัดเหล่านี้ไม่สามารถใช้กับงานที่ใช้ความเร็วรอบต่ำๆได้ เนื่องจากตัวเคลือบสามารถหลุดหรือเกิดการแตกหักเนื่องจากการเกิดการยึดระหว่างตัวอย่างกับผิวเคลือบ ดังนั้นการใช้สารหล่อลื่นจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือตัดพวกเหล็กชุบความเร็วสูงที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ซึ่งจะมีสีเหลืองทอง สำหรับการสึกกร่อนที่ด้านข้างของเครื่องที่เรียกว่า Flank wear สามารถนำมาลับคม (reground) หลังจากการใช้งานได้ เนื่องจากการเจียรไนไม่สามารถที่จะเอาสารเคลือบบริเวณ Rake Face ออกไปได้

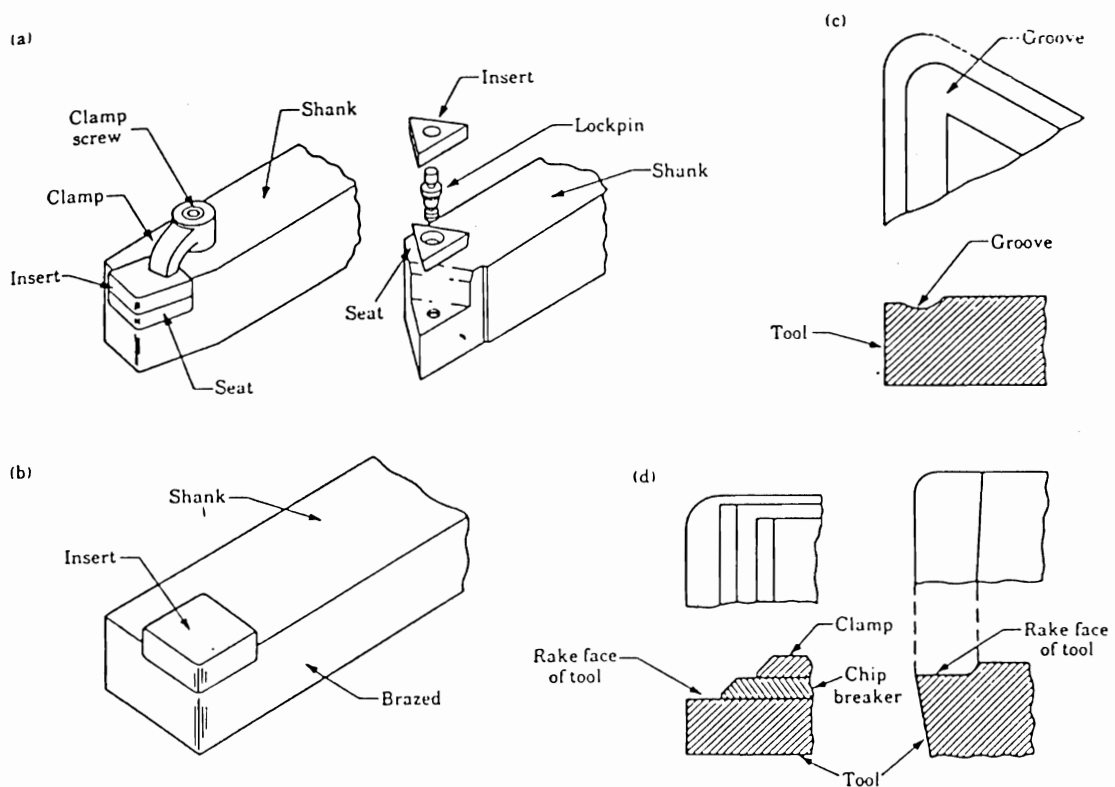
ในงานที่ใช้ความเร็วรอบสูงการเคลือบเครื่องมือตัดด้วยอลูมินาออกไซด์จะช่วยให้การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ดีขึ้น ในปัจจุบัน คาร์ไบด์ชนิดเคลือบมีอายุการใช้งานสูงกว่าพวกไม่เคลือบถึง 5 เท่า

สำหรับปริมาณของโคบอลต์จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (รูปที่ 5) แต่เป็นที่สังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณโคบอลต์ความแข็งแรง ความแข็ง และการคงทนต่อการสึกกร่อนจะลดลงในขณะที่ค่าความแข็งแรงในแนวขวางจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเหนียวของคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโคบอลต์ด้วยเช่นกัน

**มิดเล็บ (Insert)** สำหรับมีเล็บคาร์ไบด์มีรูปร่าง ๗ ต่าง ๗ หลายแบบ อาทิ สี่เหลี่ยม (Square) สามเหลี่ยม (Triangular) และเม็ดกลม (round) โดยปกติจะมีการหนีบ (Clamped) หรือประสาน (Brazed) ที่บนด้ามจับ(รูปที่ 6) แต่เนื่องจากความแตกต่างของค่าการขยายตัวเชิงอุณหภูมิ การเชื่อมควรจะทำอย่าง ระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการรั้วหรือบิด (warping) ซึ่งความแข็งแรงของมิดเล็บจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง โดยที่ขนาดและมุมที่เล็กกว่าจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ซึ่งเป็นหลักที่ใช้ได้กับเครื่องมือตัดทุกชนิดในการป้องกันการบิ่น (Chipping) โดยเพิ่มแรงต้านบริเวณขอบของเครื่องมือตัด (Edge strength) ทำได้โดยการลบมุม (Chamfer) ของมิดเล็บ หรือทำเป็นส่วนโค้ง (Honed) ให้มีรัศมีประมาณ 0.001 นิ้ว สำหรับความแกร่ง ของเครื่องจักรมีผลอย่างมาก ต่อการใช้งานที่มีความเร็วรอบต่ำ การกินเบา (Light feed) และมีการโยกจะเป็นอันตรายต่อเครื่องมือตัดประเภทนี้ด้วยเช่นกัน การที่จะทำให้้อัตรการผลิตมีประสิทธิภาพ จะต้องคำนึงถึงปัจจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์สูงสุดจากพวกเครื่องมือตัด ความแกร่ง ความเร็วรอบสูง กำลังของเครื่องจักร เครื่องมือตัดชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารพวก Cutting fluid ในการทำงาน แต่ถ้ามีการใช้ต้องมีปริมาณที่มากและใช้อย่างต่อเนื่องเพื่อลดความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเครื่องมือที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการตัด



**รูปที่ 5** ผลของปริมาณโคบอลท์ในเครื่องมือที่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติ เชิงกล (สังเกตได้ว่าความแข็งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Compressive strength โดยมีค่าผกผันกับการทนต่อการสึกหรอ)

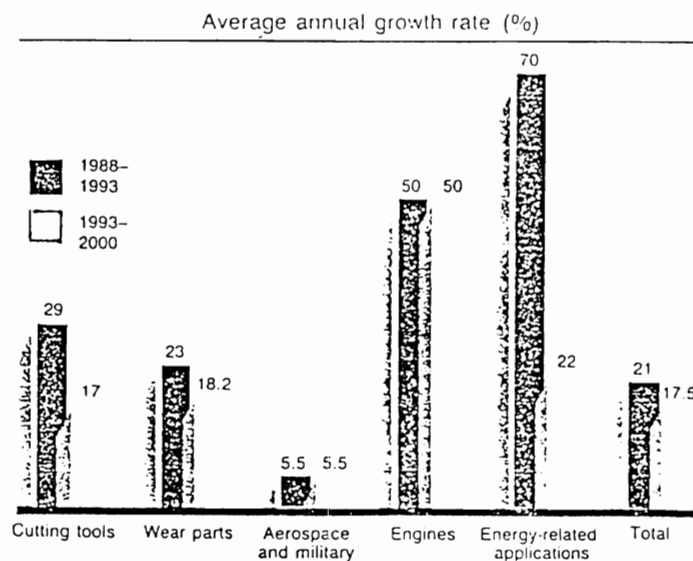


**รูปที่ 6** a) แบบอย่างของมิดเล็บบที่สามารถถอดได้ (Typical indexable inserts)  
 b) การประสานมิดเล็บบนด้ามจับ (Insert brazed tool shank)  
 c) รอยบิ่นที่เป็นร่องบนมิดเล็บบ (Groove-type chip breaker on insert)  
 d) รอยบิ่นแบบ Obstruction type chip breaker

## 5 เซรามิกส์ (Ceramics)

เครื่องมือตัดเซรามิกได้นำมาจำหน่ายในท้องตลาดเมื่อประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา โดยเครื่องมือตัดเซรามิกซึ่งมีอลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เป็นส่วนประกอบหลักนั้นได้นำมาใช้ในการตัดความเร็วสูงและเนื่องจากเซรามิกมีคุณสมบัติที่มีความแข็งสูง และทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (6) จึงได้นำมาใช้ในการตัดแต่งรูปเชิงกลพวก Superalloy พวก Hard chilled - cast iron และพวก Strength steels แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้เซรามิกจะขาดความเหนียว จึงทำให้ขอบเขตการใช้งานถูกจำกัด แต่ทว่าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาปรับปรุงวัสดุ การพัฒนาอย่างรวดเร็วของความทนทานของ

เครื่องมือกล ซึ่งมีผลส่งผลให้เซรามิกมาเป็นที่ยอมรับกันอีกครั้งหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเซรามิกกับซีเมนต์คาร์ไบด์พบว่า เซรามิกจะมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการใช้งาน ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดีกว่าคาร์ไบด์ ทำให้อายุการใช้งานของพวกเขา เครื่องมือตัดเซรามิกจะนานกว่า ถึงแม้ว่าจะใช้ความเร็วรอบในการตัดชิ้นงานสูงกว่าคาร์ไบด์ 2-3 เท่า แต่เซรามิกจะมีความหนาแน่น ความเหนียว และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ (ตารางที่ 1) สำหรับศักยภาพในการเซรามิกผสม (Ceramics Composites) มาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดนั้นจะมีอัตราเติบโต 29% ในช่วงปี 1988-1993 และจากปี 1993-2000 จะมีอัตราเติบโต 17% (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 แนวโน้มการเติบโตของวัสดุเซรามิกส์ผสม (Ceramics Composites) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ รวมถึงเครื่องมือตัด (Cutting tool) (7)

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเครื่องมือตัดเซรามิกและซีเมนต์คาร์ไบด์

Property <sup>b</sup>	Ceramics <sup>a</sup>	Cemented Carbide <sup>c</sup>
Hardness, HRA <sup>d</sup>	91-95	90-93
TRS <sup>e</sup> for alumina-based ceramics MPa <sup>f</sup>	690-930	1590-2760
Melting range, °C	ca 2000	1350
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.9-4.5	12.0-15.3
Modulus of elasticity E, GPa <sup>f</sup>	410	70-648
Grain size, μm	1-3	0.1-6
Compressive strength, MPa <sup>f</sup>	2760	3720-5860
Tensile strength, MPa <sup>f</sup>	240	1100-1860
Thermal conductivity, W/(m-K)	-	41.8-125.5
Thermal expansion coefficient, 10 <sup>-6</sup> /°C	7.6	4-6.5

- a The exact properties depend upon the materials used, grain size, binder content, volume fraction of each constituent, and processing method.
- b Coated carbides are not included.
- c Rockwell hardness A scale.
- d Transverse rupture strength.
- e To convert MPa to psi, multiply by 145.
- f To convert GPa to psi, multiply by 145,000.

ที่มา : Encyclopedia of Chemical Technology



เครื่องมือตัดเซรามิกที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็น disposable tips (7,8) สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

**5.1 เครื่องมือตัดที่มีอลูมินาออกไซด์เป็นส่วนผสมหลัก** (Alumina-Based Cutting tool Material) สามารถแบ่งได้ตามวิธีการผลิตและส่วนผสมดังต่อไปนี้

**5.1.1 ประเภทอลูมินาออกไซด์** ( $Al_2O_3$ ) ความบริสุทธิ์สูง (Pure Alumina)

ในช่วงปี 1960 เครื่องมือตัดเซรามิกจะเป็นการนำ  $\alpha-Al_2O_3$  มาขึ้นรูปโดยการนำมา Sintering ที่อุณหภูมิสูงหรือใช้ Hot-pressed โดยทั่วไปอาจเรียกว่า เซรามิกขาวประกอบด้วยผงอลูมินาออกไซด์ประมาณ 99% ผสมกับพวกสาร Sintering aid ในอัตราต่าง ๆ โดยปกตินิยมใช้แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็น Sintering aid และเป็นตัวช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรน นอกจากนี้ตัวเติมอื่น ๆ อาทิ ไทเทเนียมออกไซด์ ( $TiO_2$ ) โครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) นิกเกิลออกไซด์ (NiO) คาร์ไบด์ โลหะ (MO) จะช่วยในคุณสมบัติเฉพาะด้าน อาทิ เพิ่มความแข็งแรง สำหรับเครื่องมือตัดอลูมินาออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ความบริสุทธิ์สูงนี้จะมี ความเหนียวต่ำ ทำให้มีความจำกัดเรื่องอัตราความเร็วของการป้อนและระยะเวลาการป้อน นิยมใช้ทำเครื่องมือตัดพวกเหล็กหล่อที่มีความแข็งน้อยกว่า 253 HB หรือเหล็กกล้าที่มีความแข็งน้อยกว่า 34 HRC

**5.1.2  $Al_2O_3 -Ti (N,C)$**

ในการเพิ่มคุณสมบัติด้าน ความร้อนเชิงกล (thermo-mechanical) ของ  $Al_2O_3$  ได้มีการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ผสมลงไป ใน  $Al_2O_3$  แล้วนำไป Sintering ในบรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) ที่อุณหภูมิ  $1750^\circ C$  การเพิ่ม TiC จะทำให้ค่าการนำความร้อน

(thermal conductivity) ความแข็ง และ Fracture toughness เพิ่มขึ้นโดยปกติเครื่องมือตัดพวกนี้จะมี สัปดาห์มักถูกเรียกว่า เซรามิกดำ

สำหรับคุณสมบัติของเครื่องมือตัดประเภทนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับพวกอลูมินาออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ พบว่ามีความแข็งมากกว่าไม่ว่าจะเป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีใด (ตารางที่ 2) ทำให้สามารถใช้งานขึ้นรูปหลาย นอกเหนือจากการขึ้นรูปละเอียดได้อีกด้วย นอกเหนือจากนี้แล้วยังทำให้เครื่องมือตัดเซรามิกส์สามารถใช้งานตัดความเร็วสูง สำหรับเหล็กกล้าหรืองาน Face milling สำหรับเหล็กหล่อ อีกด้วย ทำให้ขอบเขตการใช้งานของเครื่องมือตัดกว้างยิ่งขึ้น

**5.1.3  $Al_2O_3 - ZrO_3$**

อลูมินาออกไซด์เกรดนี้ได้นำออกมาในปี 1980 ซึ่งการเพิ่ม Fracture toughness และเพิ่มความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยฉับพลัน จะมีความสัมพันธ์กับ วัฏภาคเดี่ยวของอลูมินา (Single - Phase  $Al_2O_3$ ) สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการใช้ PZT (Partially Stabilized tetragonal  $ZrO_3$ ) นั้นเป็นการเพิ่มความเหนียวที่เกิดจากการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Monoclinic ปริมาณ  $ZrO_3$  ที่นิยมใช้ประมาณ 10, 25 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปถ้ามี  $ZrO_3$  มากกว่าจะมีความเหนียวมากกว่า แต่ก็แข็งแรงน้อยกว่าและระดับความเหนียวของเซรามิกจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการ Sintering จะมีค่าประมาณ  $1600^\circ C$

ความเหนียวของ  $Al_2O_3$  เมื่อเพิ่ม  $ZrO_3$  เกิดจากการเปลี่ยนผลึกที่เป็นกลไกในการดูดซับพลังงาน การเพิ่ม PZT ในรูปของ Oblate spheroid ในเนื้อภายใต้ความเค้น (Stress) ทำให้ได้โครงสร้าง โมโนคลินิก (Monoclinic) ที่เสถียร ดังนั้นทำให้ค่าของ Fracture toughness เพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของเครื่องมือตัดเซรามิกประเภท Pure Alumina กับ ประเภท Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Ti (N,C)

ส่วนประกอบหลัก	วิธีการผลิต	ชื่อของเครื่องมือเซรามิกที่มีจำหน่าย	ความแข็ง (HRA)	ความทนทานต่อการแตกหัก (Kgf/mm <sup>2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> บริสุทธิ์	วิธี Cold press	NTK : C 1	93-94	40-50
		NTK : C 1S TOSHIBA : TUNGALOX LXA KYOCERA: CERATIP W KENDEX C 06 HYPER LOX SN 56. S N 76	93.5	60
	วิธี Hot press	NTK : HC1 CCT 707 HYPER LOX Ceramut 1	94.5	60-70
	วิธี HIP	SUMITOMO : SUMI WHITE W80 NIPPON TUNGSTEN : NPE-H1	2400 (Hv)	80
ประเภท Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC	วิธี Hot press	NTK : HC2	94.5	70-80
		NPC : A2		
		TUNGLOX LX21 CERATIP B HYPER LOX : Ceramcut II B & W : C10 MITSUBISHI : DIA LOX XD -3	93.5	90
	วิธี Cold press	Widalox		
วิธี HIP	SUMITOMO BLACK B 90	3000 (Hv)	90	

ที่มา : สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหการ

## 5.2 เครื่องมือตัดที่มีซิลิกอนไนไตรด์ เป็น

### ส่วนผสมหลัก

วัสดุซิลิกอนไนไตรด์เซรามิก (Silicon Nitride Ceramics) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนโตรเจนเซรามิก เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดที่ได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในงานตบแต่งขึ้นรูปเมื่อไม่นานนี้ และเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพ

ในการนำมาพัฒนาใช้ในงานเครื่องมือตัดค่อนข้างสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีด้าน Fracture toughness และการทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยฉับพลัน (Thermal shock) (ตารางที่ 3) คุณสมบัติของซิลิกอนไนไตรด์สามารถปรับปรุงได้โดยวิธีการเตรียมผงและการควบคุมการผลิต

**ตารางที่ 3** คุณสมบัติของซิลิกอนไนไตรด์

Composition, Silicon nitride, percent	90
Alumina, percent	2
Yttria, percent	8
Average grain size, $\mu\text{m}$	2
Transverse rupture strength, N/mm <sup>2</sup>	800
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.25
Hardness, HV	1800

ที่มา : World Directory and Handbook of Hardmetal and Hardmaterial (8)

5.2.1 ซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

ซิลิกอนไนไตรด์เป็นสารสังเคราะห์ที่ไม่มีอยู่ตามธรรมชาติ ปัญหาทางด้านเทคโนโลยีการผลิตชิ้นงานเพื่อใช้ในด้าน Structure นั้นคือการทำให้เกิดความหนาแน่นสูงซึ่งไม่สามารถได้จากการขึ้นรูปโดยวิธีการดั้งเดิม อาทิ Solid state sintering เพราะการแพร่เชิงปริมาตร (Volume diffusion) ใน  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ไม่มากพอที่จะต้าน อิทธิพลทางด้าน การแพร่ของพื้นผิว (Surface diffusion) และการระเหย (Volatilization) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการที่ซิลิกอนไนไตรด์จับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ค่าการแพร่เชิงปริมาตร (Volume diffusion) ต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการ Sintering ด้วย Hot pressed ต้องใช้พวกตัวเติม (additive) เพิ่มลงในผงซิลิกอนไนไตรด์

ซิลิกอนไนไตรด์จะมีวัฏภาคที่สำคัญ 2 วัฏภาคคือ  $\alpha$  และ  $\beta$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Hexagonal สำหรับวัฏภาคที่เป็น  $\alpha$  จะมีหน่วยผลึกขนาดใหญ่

เป็น 2 เท่าของวัฏภาคที่เป็น  $\beta$  ชิ้นงาน  $\beta - \text{Si}_3\text{N}_4$  ที่หนาแน่นได้จากการนำผง  $\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4$  มาขึ้นรูปด้วย Hot- pressing โดยใช้ตัวเติมที่ช่วยในการเพิ่มความหนาแน่น อาทิ  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยใช้แรงดัน 30 MPa ที่อุณหภูมิ 1700 - 1800 °C โดยปกติ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  จะมีชั้น  $\text{SiO}_2$  ปกคลุมอยู่การเติมพวก additive ก็เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  และปริมาณ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  เพียงน้อยภายใต้อุณหภูมิของ Hot Pressing จะทำให้เกิด Oxynitride เหลว ซึ่ง  $\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4$  จะเกิดละลายและตกตะกอนเป็น  $\beta - \text{Si}_3\text{N}_4$  เซรามิกที่มี  $\text{Si}_3\text{N}_4$  เป็นองค์ประกอบหลักทำให้เกิดความหนาแน่นโดยกระบวนการ liquid phase sintering ซึ่งวัฏภาคที่เกิดจะมีทั้ง Crystalline  $\text{Si}_3\text{N}_4$  และ Intergranular bonding phase สำหรับ Intergranular bonding phase จะเป็นแก้วหรือแก้วที่มีผลึก (Devitrified) และสาร Sintering aid ซึ่งวัฏภาคที่เป็น Intergranular bonding นี้จะเกิดอ่อนตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง

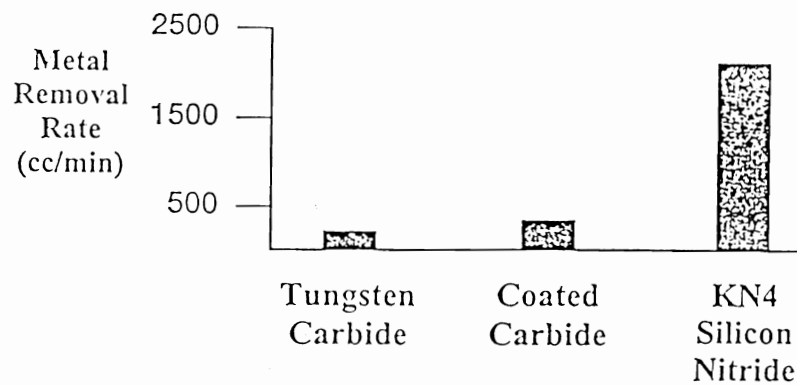
จึงทำให้ Strength ลดลง ณ อุณหภูมิดังกล่าว

เครื่องมือตัดซิลิกอนไนไตรด์ที่ใช้เชิงการค้าหลายชนิดได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติในระหว่างการผลิต อาทิ ในการปรับปรุงความแข็ง และทนต่อการสึกหรอได้ใช้ส่วนผสมที่มี 70% เป็น Matrix phase, (92%  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 16%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ 30% เป็น dispersed phase (TiC หรือ TiN) หรือใช้ส่วนผสมที่มี  $\text{Si}_3\text{N}_4$  และเพิ่ม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยไม่มี TiC หรือ TiN เป็นต้น

สำหรับซิลิกอนไนไตรด์มีอัตราของการกัดกลึงเนื้อโลหะ (Metal Removal Rate) สูงกว่าพวกทั้งสแตนคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์ที่เคลือบผิวถึง 1100% (รูปที่ 8)

### 5.2.2 Si AION

ในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมาบริษัท Lucas ในประเทศอังกฤษได้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชื่อทางการค้าว่า Syalon ซึ่งใช้เรียกแทน SiAION หรือ Silicon - Aluminium Oxynitride ซึ่งเป็นสารละลายเชิงของแข็งระหว่าง  $\beta$  - SiAION {ได้จากส่วนผสม  $\beta$  -  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (77%)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13%)  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (10%) } และ AlN เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น แล้วนำผงที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้ CIP (Cold Isostatic Pressing) และ Sintering ที่ 1800 C นาน 1 ชม. ในระหว่างการ Sintering ส่วนผสม  $\beta$  - SiAION จะเกิดการเพิ่มปริมาตรทำให้ความหนาแน่นลดลงมากกว่าในการสังเคราะห์พวก  $\text{Y}_2\text{O}_3$  - Stabilized  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ดังนั้น  $\beta$  - SiAION สามารถที่จะทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุดได้โดยไม่ต้องใช้แรงดัน การลดลง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตรากัดกลึง (Metal Removal Rate) เนื้อของซิลิกอนไนไตรด์กับพวกคาร์ไบด์ (11)

อย่างรวดเร็วของอุณหภูมิในระหว่างทำการ Sintering ทำให้เกิดจุดโครงสร้างที่มีเกรน  $\beta$  - SiAlON โดยระหว่างเกรน (Intergranular) เป็น ภูมิภาคที่เป็นแก้วถ้าใช้  $Y_2O_3$  เป็น Sintering aid สามารถเปลี่ยนส่วนที่เป็นภูมิภาคแก้วไปเป็นผลึก Yttrium-Aluminum-Garnet (YAG) โดยใช้ ความร้อนและการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ แต่ อย่างไรก็ตาม Sintering SiAlON จะยังคงมี ภูมิภาคแก้วตกค้างอยู่โดยเฉพาะที่จุดพบของขอบ เขตเกรนทั้ง 3 ด้าน (Grain -boundary triple point) สำหรับคุณสมบัติของ SiAlON นั้นจะ ขึ้นอยู่กับพวกสารและปริมาณของ Sintering aid และกระบวนการในการขึ้นรูปเป็นสำคัญ SiAlON มี คุณสมบัติด้านความเหนียวและทนต่อการ เปลี่ยนแปลงความร้อนได้ดี จึงสามารถนำเครื่องมือ ตัด SiAlON ที่มีรูปต่าง ๆ อาทิ สีเหลี่ยม สามเหลี่ยม และรูปร่างแบบเพชร

มาใช้แต่งขึ้นรูปวัสดุพวก Superalloy ได้ ในขณะที่ มีวัสดุเซรามิกอื่น ๆ ใช้ได้เฉพาะรูปร่างที่เป็นทรงกลม ซึ่งคุณสมบัติบางประการของ SiAlON ได้แสดงไว้ ในตารางที่ 4 สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่เป็นที่รู้จักกันดีของ SiAlON อาทิ Kyon 2000 ของ บริษัท Kennametal มีสีน้ำตาลใช้ในการตัดแต่งรูป เชิงกล High-Nickel alloy และเหล็กหล่อ เป็นต้น กล่าวโดยทั่วไปแล้วเครื่องตัดที่มีซิลิกอนไน ไตรด์เป็นองค์ประกอบ หลักมีการทนต่อการ เปลี่ยนแปลงความร้อนดีกว่าพวก อลูมินาออกไซด์ แต่ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมีน้อยกว่า การปรับปรุงให้มีความคงทนทางเคมีจึงทำได้โดย เพิ่ม  $Al_2O_3$  ใน  $\beta$  -SiAlON และปรับปรุงความ เหนียวทำได้โดยเพิ่ม  $ZrO_2$  แต่การเพิ่ม  $ZrO_2$  จะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งทำให้ไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นได้ดังนั้น  $Al_2O_3$  และ AlN ซึ่งยังคงใช้เป็นสาร Sintering aid ต่อไป

ตารางที่ 4 องค์ประกอบและคุณสมบัติของ SiAlON

Composition, Wt %	
$Si_3N_4$	77
$Al_2O_3$	13
$Y_2O_3$	10
Properties	
density, g/cm <sup>3</sup>	3.2-3.4
hardness, GPa(Kgf/mm <sup>2</sup> )	17.65(1800)
Young's modulus, GPa <sup>a</sup>	300
compressive strength, MPa <sup>b</sup>	> 3500
thermal conductivity, W/(m-K)	20-25
thermal expansion coefficient, per °C	$32 \times 10^{-5}$

a To convert GPa To psi, multiply by 145,000

b To convert MPa to psi, multiply by 145.

ที่มา : Encyclopedia of Chemical Technology.

## 6 วัสดุความแข็งสูงพิเศษ (Superhard Material)

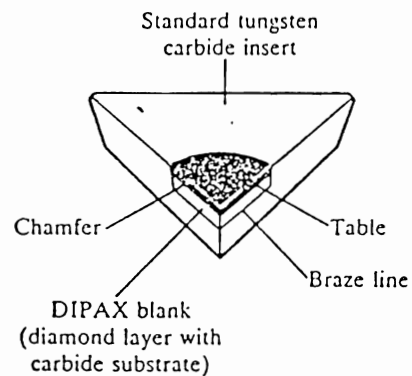
พวกวัสดุความแข็งแรงชนิดพิเศษจะจับยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ อาทิ เพชร (Diamond) และคิวบิกโบรอนไนไตรต์ (Cubic Boron Nitride, CBN) ได้นำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน อาทิ เป็นวัสดุขัด (abrasive) และเป็นพวกเครื่องมือตัด แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากปัญหาคุณสมบัติความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับชิ้นงาน นอกจากนี้วัสดุเหล่านี้ก็มีราคาค่อนข้างแพง

สำหรับเพชรและ CBN มีความคล้ายคลึงกันในหลายประการ อาทิ มีความแข็งแรง มีรูปร่างผลึกเหมือนกัน นำความร้อนได้สูง และมีการขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมี ความแตกต่างเช่นกัน เนื่องจากโดยปกติแล้วเพชรเป็นวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C จะกลายเป็น graphite นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Ferrous material) ที่อุณหภูมิปานกลางได้เป็น Cementite ( $Fe_3C$ ) ในขณะที่ CBN เป็นสารสังเคราะห์และคุณสมบัติทางความร้อนค่อนข้างคงที่ทั้งในสภาพอากาศปกติหรือในสภาพที่มีเหล็ก ดังนั้นการใช้งานจึงมีความแตกต่างกันคือ พวกเพชรจะใช้กับวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous material) และ CBN จะใช้กับวัสดุที่เป็นเหล็ก (Ferrous material) ตามลำดับ

### 6.1 เพชร (Diamond)

เครื่องมือตัดวัสดุความแข็งสูงพิเศษที่เป็น Single crystal diamond ได้นำมาทำเป็นเครื่องมือตัดคมเดียวเพื่อใช้ในงาน ทำด้ามจับเครื่องมือเหล็ก (a steel tool shank) เป็นครั้งแรกและปัจจุบันก็ยังคงใช้ในการแต่งขึ้นรูปนาฬิกาข้อมือและหามมเตยนาฬิกาแขวน แผ่นดิสก์สำหรับคอมพิวเตอร์ และคอนแทคเลนส์ สำหรับพวกเพชร

สังเคราะห์ที่ไม่สามารถทำให้มีขนาดใหญ่พอที่จะทำเป็นไบมิตดัดคมเดียวได้ จะใช้วิธีการอัดแน่น (Consolidation) พวกผงเพชรขนาดเล็กในลักษณะแท่ง(Block) ตามขนาดที่จะใช้งานซึ่งในทางการค้า การเพิ่มความเป็ Polycrystalline block ได้จากการเติมวัสดุที่เป็นพวกโลหะหรือเซรามิก แล้วนำเพชรที่อัดเป็นแท่งตามรูปร่างที่เหมาะสม จะเชื่อมติดกับพวกแผ่นรอง (Substrate) HSS และคาร์ไบด์ (รูปที่ 9) โดยใช้ Silver alloy brazer สำหรับการใช้งานพวกเครื่องมือตัดเพชรได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในการตัดแต่งรูปเชิงกลพวกวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก ตั้งแต่ได้มีการผลิต polycrystalline diamond (PCD) ในปี 1972 เป็นต้นมา นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการแต่งขึ้นรูปวัสดุต่างๆ ที่ไม่ใช่โลหะ อาทิ พวก Fiber-glass epoxy พวก Graphite reinforced plastic และพวก Hard-rubber ได้ด้วย



รูปที่ 9 Polycrystalline -type insert (12)

## 6.2 คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (CBN)

ได้ผลิตครั้งแรกโดยบริษัท General Electric ซึ่งเพชรเทียมนี้ได้จากการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของคาร์บอนจาก Hexagonal ไปเป็น Cubic ภายใต้เงื่อนไข คือที่มีความดันอุณหภูมิและสาร Catalyst Solvent ที่เหมาะสม สำหรับ CBN ถึงจะไม่มีความแข็งเท่าเพชรแต่ก็จะมีปัญหาทางด้านการเกิดปฏิกิริยาเคมีน้อยกว่า โดยเฉพาะในการแต่งขึ้นรูปพวกเหล็กชุบแข็ง (Harden steels) Hard chilled-cast iron, Nickel และ Cobalt-based superalloyed ซึ่งถ้าใช้พวก CBN เป็นเครื่องมือตัดในการแต่งขึ้นรูปในวัสดุเหล่านี้จะสามารถทำงานเร็วกว่า Cemented carbide ถึง 5 เท่า โดยที่ให้ความแม่นยำ ความละเอียด และ Surface integrity ที่สูงกว่า

สำหรับพวก Sintered CBN Tool มีการขึ้นรูปในลักษณะเดียวกับพวก PCD และมีขนาดที่เท่ากัน เนื่องจาก CBN จะมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าคาร์ไบด์และ PCD จึงได้มีความคิดค้นการขึ้นรูปที่ให้มีต้นทุนถูกลงกว่าเดิม

จากที่ได้กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ทำเป็นเครื่องมือตัดมาแล้ว จะพบว่าค่อนข้างหลากหลาย การเลือกวัสดุในการทำเครื่องมือตัดในแต่ละชนิดต้องการความรู้และประสบการณ์ ซึ่งการคบเกี่ยวกับของคุณสมบัติแต่ละวัสดุอาจทำให้เกิดทางเลือกใหม่ ๆ ในการทำพวกเครื่องมือตัดและใช้งานได้อย่างเฉพาะเจาะจง สำหรับแนวทางในการเลือกวัสดุสำหรับใช้เป็นเครื่องมือตัดขึ้นงาน ลักษณะการใช้งาน ฯลฯ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

## เอกสารอ้างอิง

1. Sukyong, K., "Advanced Ceramic As Cutting tool : Part 1-An Overview" ; J. Canadian Ceram. Soc., 61(1) 51-58 1992.
2. ประกอบ บุญมา, พื้นฐานเทคโนโลยีของการผลิตและการใช้มีดกลึงไฮสปีด (ตอนที่ 1) วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด, วารสารแม่พิมพ์ ฉบับที่ 1 ปีที่ 6 เดือนมกราคม-มีนาคม 2537. สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย หน้า 15-21.
3. Kalpak Jion, S; "Manufacturing Process for Engineering Material", Addison-Westry, 1984.
4. Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Son. New York, V 23, 1983.
5. Forcast Issue; J.Am. Ceram. Soc. Bull. 67(2) 1988.
6. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะ (MIDI), วิธีการใช้ Cutting tool (ภาควัสดุ), กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535.
7. Sukyong, K. "Advanced Ceramic As Cutting tool : Part II - State - of - The - Art and Developments" ; J. Canadian. Ceram. Soc; 61(1) 59-69. 1992.
8. Brooks, K.S.A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials, 5th, Publishing by International Carbide Data, UK, 1992.
9. Ceramic Cutting tool insert, Product information, Electrofull.
10. Lindbery, R.A., "Process and Material of Manufacture" 4<sup>th</sup> ed. Allyn and Bacon, 1990.

ตารางที่ 2.5 การเลือกวัสดุเครื่องมือตัด

Tool Materials	Work materials	Machining operation and cutting-speed range	Modes of tool wear or failure	Limitations
Carbon steels	Low strength, softer materials, nonferrous alloys, plastics	tapping, drilling, reaming ; low speed	buildup, plastic deformation, abrasive wear, microchipping	low hot hardness, limited hardenability and wear resistance, low cutting speed, low-strength materials
low-medium alloy steels	low strength-soft materials, nonferrous alloys, plastics	tapping, drilling, reaming ; low speed	buildup, plastic deformation, abrasive wear, microchipping	low hot hardness, limited hardenability and wear resistance, low cutting speed, low-strength materials
HSS	all materials of low-medium strength and hardness	turning, drilling, milling, broaching; medium speed	flank wear, crater wear	low hot hardness, limited hardenability and wear resistance, low to medium cutting speed, low-to-medium strength materials
cemented carbide	all materials up to medium strength and hardness	turning, drilling, milling, broaching; medium speed	flank wear, crater wear	not for low speed because of cold welding of chips and microchipping, not suitable for low speed application
coated carbides	cast iron, alloy steels, stainless steels, superalloys	turning; medium to high speed	flank wear, crater wear	not for low speed because of cold welding of chips and microchipping, not for titanium alloy since the coated grades do not offer additional benefits over uncoated
ceramics	cast iron, Ni-base superalloys, nonferrous alloys plastics	turning; high speed to very high speed	DCL <sup>a</sup> notching, micro chipping, gross fracture	low strength and thermomechanical fatigue strength, not for low speed operations or interrupted cutting, not for machining Al, Ti alloys
CBN	hardened alloy steels, HSS, Ni-base superalloys, hardened chill-cast iron, commercially pure nickel	turning, milling; medium to high speed	DCL notching, chipping, oxidation, graphitization	low strength and chemical stability at higher temperature, but high strength, hard materials otherwise
diamond	pure copper, pure aluminum, aluminum-Si alloys, cold-pressed cemented carbides, rock, cement, plastics, glass epoxy composites, nonferrous alloys hardened high carbon alloy steels (for burnishing only), fibrous composites	turning, milling; high to very high speed	chipping, oxidation, graphitization	low strength and chemical stability at higher temperature, not for machining low carbon steels, Co, Ni, Ti, Zr

<sup>a</sup> Depth of cut line.

ที่มา : Encyclopædia of Chemical Technology.