

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ซีเมนต์คาร์ไบด์

โลหะชนิดนี้ทำขึ้นจากผลึกคาร์ไบด์ชนิดละเอียดของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงยิ่ง (Refractory metals) แล้วนำมาอัดเชื่อมประสานเข้าด้วยกันกับโลหะผสมในกระดุมเหล็ก ก่อให้เกิดเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงยิ่ง ทนต่อการกัดกร่อนเป็นเลิศ ซีเมนต์คาร์ไบด์ถูกประดิษฐ์ขึ้นด้วยกรรมวิธีทางโลหะวิทยาผงโลหะ (Powder Metallurgy) วิธีการย่อยๆของเทคนิคการผลิตจะเริ่มจากการเตรียมผงคาร์ไบด์ของทั้งสแตน ทิคานีอัม หรือแทนทาลัม ผสมผงคาร์ไบด์เหล่านี้ชนิดเดียวกันหรือหลายชนิดเข้ากับตัวเชื่อมประสานซึ่งโดยปกติใช้ผงโคบอลต์แล้วนำไปกดอัดขึ้นรูปตามต้องการ ทำการเผาทำให้มีอุณหภูมิเกือบถึงจุดหลอมเหลว เพื่อให้มวลสารเชื่อมและหลอมรวมตัวกัน

การผสมกับสารตัวเชื่อมประสานและอัดขึ้นรูปนี้ จะใช้วิธีอัดเย็นแล้วตามด้วยการทำเผาหรือใช้วิธีอัดร้อนแล้วทำการเผาไปพร้อมกันก็ได้ ขนาดของแรงอัดที่ใช้ในกรณีอัดเย็นอยู่ในช่วง 5 - 30 ตัน / ตารางนิ้ว ขึ้นกับรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะอัด อุณหภูมิของการเผาจะอยู่ที่ระดับ 2500 - 2700 ° F เวลาที่ใช้ประมาณ 30 - 60 นาที ที่ระดับอุณหภูมิขนาดนี้ โครงสร้างคาร์ไบด์และโคบอลต์จะรวมตัวกันเป็นของผสมจุลภาคเชื่อมประสานผงโลหะทุกชนิดเข้าด้วยกัน เมื่อเย็นตัวลงก็ยังคงมีคุณสมบัติอื่นของธาตุผสมทั้งหลายติดตัวมาอย่างครบถ้วน รวมทั้งจะไม่สามารถนำชิ้นงานที่ได้ไปอบชุบด้วยความร้อน เพื่อปรับคุณสมบัติทางกลอื่นใดได้อีกแล้ว โครงสร้างคาร์ไบด์ที่ได้จะปรากฏเป็นเกรนอิสระกระจายกระจายเป็นโครงข่ายห้อมล้อมโคบอลต์อันเป็นผลจากคาร์ไบด์ละลายลงในโคบอลต์บางส่วนขณะผ่านขบวนการเผา (Sintering)

เราสามารถจัดแบ่งโครงสร้างคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ชนิด คือ

ชนิดที่ 1 ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ที่จะใช้เป็นใบมีดหรืออุปกรณ์ขัดถูเครื่องจักรเพื่อตกแต่งเหล็กหล่อ เหล็กออกสเตนไนท์ โลหะที่มีไขเหล็ก และวัสดุอื่นๆที่ไม่ใช่โลหะ

ชนิดที่ 2 แทนทาลัมและทิคานีอัมคาร์ไบด์ ถูกนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ในการใช้เครื่องจักรตกแต่งเหล็กเฟอร์ริค ในตารางที่ 2.1 จะได้แสดงรายละเอียดการนำโลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ไปใช้งานในกรณีต่างๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมและการแบ่งชนิดของซีเมนต์คาร์ไบด์ (Classification of Cemented Carbides)

| กลุ่ม<br>คาร์ไบด์             | ส่วนผสม       |          | ความแข็งแรงการประยุกต์ |   |
|-------------------------------|---------------|----------|------------------------|---|
|                               | ท้ายสุด<br>Co | Ta + TiC | R/A                    |   |
| กลุ่มทั้งเตนคาร์ไบด์          |               |          |                        |   |
| 1                             | 2.5-6.5       | 0-3      | 93-91                  | - ใช้เป็นอุปกรณ์ขัดถูตกแต่งเหล็ก<br>หล่อ โลหะผสมชนิดนินเฟอร์<br>ซูเปอร์อัลลอย, แม่พิมพ์กดอัด<br>เบร |
| 2                             | 6.5-15        | 0-2      | 92-85                  | - ดัดขยายพวกเหล็กหล่อแม่พิมพ์<br>กดอัดปานกลาง   |
| 3                             | 15-30         | 0-5      | 88-85                  | - ทำแม่พิมพ์กดอัดสูง  |
| คาร์ไบด์ TiC ให้เด่น          |               |          |                        |   |
| 4                             | 3-7           | 20-42    | 93.5-92                | - เรียวในความเร็วสูงบนเหล็กกล้า   |
| 5                             | 7-10          | 10-22    | 92.5-90                | - ตกแต่งชิ้นประณีตและความเร็ว<br>สูงบนเหล็กกล้า   |
| 6                             | 10-12         | 8-15     | 92-89                  | - ดัดขยายเหล็กกล้า  |
| คาร์ไบด์เจือ TaC ให้เด่น      |               |          |                        |   |
| 7                             | 4.5-8         | 16-25    | 93-91                  | - ดัดเหล็กกล้าบางๆ  |
| 8                             | 8-10          | 12-20    | 92-90                  | - ใช้ได้หลายจุดประสงค์รวมทั้ง<br>การตัดเหล็กกล้าหนาหลายๆ  |
| คาร์ไบด์เจือ ไม่มี TaC ผสมเลย |               |          |                        |   |
| 9                             | 5.5-16        | 18-30    | 91.5-84                | - ในกรณีต้องการความต้านทาน<br>การสึกหรอ โดยเฉพาะเมื่อชิ้น<br>งานต้องสัมผัสความร้อนสูง               |

คุณสมบัติที่เด่นอีกประการหนึ่งของซีเมนต์คาร์ไบด์นอกเหนือจากมีความแข็งและความแข็งแรงสูงแล้วยังทนต่อการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนได้ดีเยี่ยม ค่าความแข็งต่ำสุดของซีเมนต์คาร์ไบด์มีค่าประมาณเท่ากับค่าความแข็งสูงสุดของเหล็กทำเครื่องมือชนิดที่แข็งที่สุดคือประมาณรอกเวด ๘๕๕ หรือ C67 ค่าความแข็งแรงกดอัดของซีเมนต์คาร์ไบด์ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2 ค่าความแข็งแรงกดอัดของทุกเกรดจะสูงกว่า 500,000 psi ทั้งสิ้นและมีความยืดหยุ่นสูงอีกด้วย คุณสมบัติทั้ง 2 ประการนี้จะลดลงถ้ามีโคบอลต์เข้าผสมมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของซินเตอร์คาร์ไบด์ เมื่อได้รับแรงกดอัด (Typical Compressive Mechanical Properties of Sintered Carbides)

| (วัดในเทอมของโมดูลัสการกดอัด) |                              |                                |                               |                |               |                                |                     |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------|---------------------|
| ของ                           |                              |                                |                               |                |               |                                |                     |
| กลุ่มคาร์ไบด์                 | ความแข็ง<br>แรงกด<br>อัด Psi | ขีดจำกัดความ<br>หืด<br>หืด Psi | ค่าความ<br>หืดหืด<br>ล้าน Psi | ผิวของ<br>เรโซ | ความยืดตัว(%) | ความแข็ง<br>แรงกระแทก<br>FT-LB | ขีดจำกัด<br>ความถี่ |
| 1(3%Co)                       | 615,000                      | 500,000                        | 105                           | 0.24           | 0.6           | -                              | -                   |
| 1(6%Co)                       | 614,000                      | 286,000                        | 105                           | 0.28           | 0.85          | 0.73                           | 95                  |
| 2(10%Co)                      | 600,000                      | 125,000                        | 87                            | 0.2            | 1.9           | 1.1                            | 105                 |
| 3(16%Co)                      | 545,000                      | 95,000                         | 76                            | 0.22           | 2.7           | 1.75                           | -                   |
| 5                             | 625,000                      | 230,000                        | 78                            | 0.22           | 1.00          | 0.6                            | 90                  |
| 6                             | 533,000                      | 97,000                         | 80                            | 0.22           | 2.00          | 0.4                            | 90                  |
| 7                             | 635,000                      | 173,000                        | 82                            | 0.21           | 0.9           | -                              | -                   |
| 8                             | 631,000                      | 250,000                        | 81                            | 0.22           | 1.00          | 0.6                            | 85                  |
| 9                             | 705,000                      | 240,000                        | 86                            | 0.22           | 1.77          | 0.6                            | 85                  |

ลักษณะและรูปแบบของการก่อตัวเป็นโครงสร้างสุดท้าย มีผลต่อความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงานมาก ขนาดของเม็ดเกรนคาร์ไบด์ ลักษณะการกระจายและการเกิดรูพรุนรวมทั้งคุณสมบัติด้านการจับตัวเชื่อมประสานกันระหว่างโคบอลต์กับผลึกคาร์ไบด์ เป็นองค์ประกอบที่จะส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและความแข็งแรงของซินเตอร์คาร์ไบด์ทั้งสิ้น

ถ้าขนาดเม็ดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์โคบอลต์ ความแข็งจะต่ำลง เพราะโคบอลต์ซึ่งเป็นธาตุอ่อนและเป็นตัวเชื่อมอยู่ระหว่างเกรนจะโคบอลต์ตาม ดังได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1 สำหรับสัดส่วนผสม 94 % ของ WC กับโลหะผสมโคบอลต์ 6% ความแข็งจะลดต่ำกว่าค่ารอกเวด A93 เป็น A92 และ A91 ตามลำดับ เมื่อเกรนของ WC เติบโตขึ้นจากละเอียดเป็นค่าปานกลางและหยาบในที่สุด

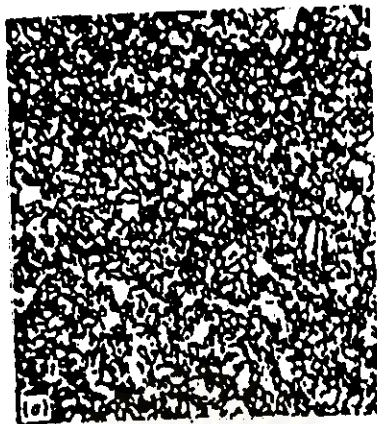
ด้วยเหตุที่ซินเมนต์คาร์ไบด์มีความเหนียวต้านแรงดึงได้น้อยจึงไม่นิยมนำมาใช้ทั้งแท่ง แต่จะตัดเฉพาะส่วนที่ต้องใช้งานเป็นชิ้นคาร์ไบด์เล็กๆ เรียก Insert เอามาติดเข้ากับค้ำเหล็ก ซึ่งจะเป็ยตัวยึดที่แข็งแรงในภาวะรับแรงจากการตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การติดอินเดิร์ทมักกระทำกันสองวิธี คือ โดยการบัดกรีและใช้วิธีทางการกล ชิ้นคาร์ไบด์สามารถถอดออกจากเครื่องมือกลไปทำการลับด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือใช้หินลับทำด้วยกากเพชร ภายได้เงื่อนไขเช่นนี้จะสามารถใช้คมตัดได้เพียง 1 หรือ 2 มม.เท่านั้น สำหรับการจับยึดด้วยวิธีทางการกล ก็อาจคลายน๊อตเดือนคมตัดที่ 2 เข้าแทนที่โดยไม่ต้องยกทั้งชิ้นออกจากเครื่อง ด้วยวิธีการเช่นนี้ชิ้นงานจะมีคมตัดจำนวนมากให้

หมุนเวียนใช้งาน หลังจากใช้คมตัดทุกด้านหมดแล้วจึงถอดทิ้ง นำอินเสิร์ตตัวใหม่เข้าติดตั้งแทน จะสิ้นเปลืองน้อยกว่าถอดอันเก่าออกมาแต่งคม วิธีนี้ช่วยลดอันตรายจากการหักพังของเครื่องมือได้อย่างดี เพราะชิ้นงานเมื่อถูกใช้งานนานจะมีความเครียดสะสมสูง

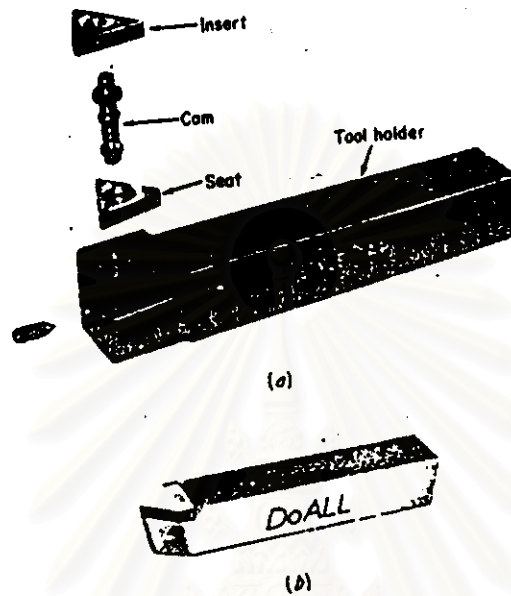
ส่วนใหญ่การใช้งานซีเมนต์คาร์ไบด์ก็เพื่อการตัดโลหะ ใช้งานอย่างอื่นน้อยมากเพราะสามารถรักษาคมตัดของมันให้มีคมอยู่เสมอด้วยวิธีดังกล่าว โลหะชุดทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นวัสดุทำเครื่องมือชนิดเดียวที่สามารถตัดวัสดุสำหรับขีด เช่น พลาสติกเบอร์กลาส พลาสติกเรซิน คาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงสุด สามารถนำมาตัดพวกเหล็กหล่อสีขาว ซึ่งมีความแข็งขนาด รอกเวด C60 พวกซีเมนต์คาร์ไบด์สามารถนำมาทำพวกดอกสว่าน เครื่องคว้าน หัวเจาะ ไบมีด เครื่องเจียรในผิวหน้าและไบเล็อดสำหรับตัดชิ้นงานที่เป็นโลหะและไม่ใช่โลหะ เมื่อใช้ซีเมนต์คาร์ไบด์เป็นคมตัดเราสามารถป้อนชิ้นงานเข้าตัด และใช้ความเร็วในการตัดได้ในอัตราที่สูงกว่าเมื่อใช้เครื่องมือทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูงหรือขเทลไลท์

ความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอที่สูงของซีเมนต์คาร์ไบด์ทำให้มันมีความเหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้กับงานชุดเจาะดินและงานเหมือง โดยสามารถนำมาทำเป็นหัวเจาะหินแข็ง ใช้ฉาบผิวหัวค้อนกลในเครื่องมือหิน ฉาบผิวหน้าของหัวพันทราย ฉาบผิวของแหวนและปลั๊กเกอร์รวมทั้งเกจบด็อก ใช้ทำพวกแม่พิมพ์สำหรับงานดึงร้อนลวดทั้งสแตนและโมลิบดีนัม และงานดึงเย็น เพื่อทำลวด แท่งโลหะ เส้นโลหะและท่อของโลหะพวกทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก และวัสดุอื่นๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างซีเมนต์คาร์ไบด์ ซึ่งมีส่วนผสม WC4% และ Co6% จะมองเห็นเม็ดเกรนแบบต่างๆของ WC ต่างๆกัน คือ (a) เกรนละเอียด (b) หยาบปานกลาง (c) เกรนหยาบ และความแข็งจะลดต่ำลง จากภาพ (a) สูงสุดคือ รอคเวด A93 (b) รอคเวด A92 และ(c) รอคเวด A91 ทั้งหมดผ่านการกัดกรด murakami ด้วยเวลา 1,500 เท่า



รูปที่ 2.2 แสดงชิ้นส่วนและเครื่องมือทำด้วยคาร์ไบด์

(a) แสดงการจับยึดทางกล

(b) บัดกรีด้วยทองเหลืองติดกับตัวจับยึด

มีวัสดุชนิดหนึ่งเรียกกันว่า "เซอ์เมท" (Cermets) เป็นโลหะผสมของคาร์ไบด์ที่ได้จากทิตานเนียมและโครเมียมด้วยการใช้นิกเกิล หรือโลหะผสมของนิกเกิลเป็นตัวเชื่อมประสาน เซอ์เมทที่รู้จักกันดีและมีความแข็งสูงจะมีส่วนประกอบของทิตานเนียมคาร์ไบด์ และโครเมียมคาร์ไบด์ โดยมีนิกเกิล 30 - 70 % เป็นตัวเชื่อมประสาน เซอ์เมทเกรดนี้มีความแข็งสูง มีความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี ทนทานต่อการได้รับความร้อนโดยเฉียบพลัน (Thermal Shock) มีความหนาแน่นต่ำ มีอำนาจการยึดตัวและความเหนียวต่ำ มักใช้กับงานที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูง และต้องการความต้านทานการบดขีดยกเป็นจุดประสงค์หลักในกรณีมีตัวเชื่อมประสานผสมอยู่น้อยกว่า 20% อาจใช้ซีเมนต์นี้ตัดพวกเหล็กกล้าและเหล็กได้ด้วยความเร็วสูง แต่ชิ้นงานต้องไม่หนามาก

## 2.1.2 กฎการกำหนดอายุเครื่องมือตัด

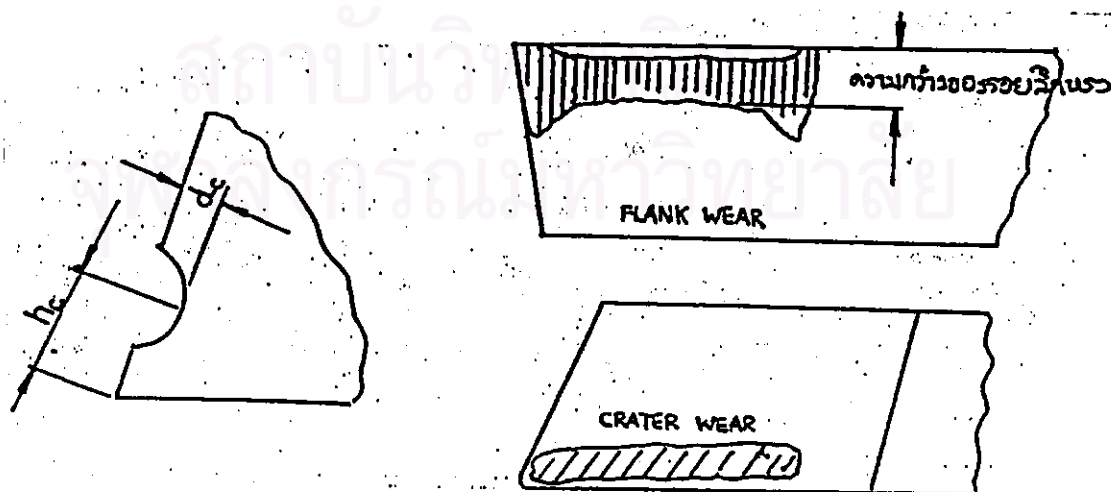
ช่วงเวลาที่สามารถใช้งานวัสดุเครื่องมือตัดได้ตามวัตถุประสงค์ของงานเรียกว่า อายุเครื่องมือตัด การใช้งานเครื่องมือตัดที่หมดอายุแล้ว จะเป็นผลเสียอย่างมาก เช่น ผลิตชิ้นงานไม่เรียบเท่าที่ควร ใช้แรงในการตัดเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิในการตัดที่เพิ่มสูงขึ้นมาก อาจเป็นผลเสียกับคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน และขนาดของชิ้นงานที่ผลิตไปเป็นต้น นอกจากนี้ในกรณีที่ดองตัวเครื่องมือตัดมาใช้ใหม่ ถ้าปล่อยให้มีการสึกหรอมากเกินไป จะต้องเสียเวลาในการลับคมตัดใหม่ ทั้งยังเสียเนื้อวัสดุเครื่องมือตัดไปในการลับคมตัดมากขึ้น กฎการกำหนดอายุเครื่องมือตัดที่เหมาะสมมีดังนี้

2.1.2.1 การกำหนดอายุเครื่องมือตัดโดยการใช้ความกว้างของรอยสึกหรอ จะใช้ความกว้างของรอยสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด เป็นตัวกำหนดอายุเครื่องมือตัด ลักษณะของรอยสึกหรอแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนปลายคมตัด ส่วนกลางคมตัด และส่วนท้ายคมตัด การสึกหรอทางส่วนปลายและส่วนท้ายจะมากกว่าส่วนกลาง เนื่องจากบริเวณส่วนปลายคมตัดเป็นส่วนที่เกิดความร้อนสะสมมากกว่าส่วนอื่น และส่วนท้ายคมตัดเป็นส่วนที่สัมผัสกับบรรยากาศ ซึ่งมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสิ่งแวดล้อมเป็นตัวเร่งให้เกิดการสึกหรอ สำหรับการสึกหรอทางส่วนกลางของคมตัดอาจเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ได้ การวัดความกว้างของรอยสึกหรอต้องทำในส่วนนี้ตามมาตรฐานของ ISO กำหนดให้

ความกว้างของรอยสึกหรอ = 0.3 มิลลิเมตรในกรณีที่รอยสึกสม่ำเสมอ

ความกว้างของรอยสึกหรอ = 0.3 มิลลิเมตรในกรณีที่รอยไม่สึกสม่ำเสมอ

หากวัดความกว้างของรอยสึกหรอได้ตามนี้แล้วถือว่าเครื่องมือตัดหมดอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรอยสึกหรอของเครื่องมือตัด

2.1.2.2 การกำหนดอายุเครื่องมือตัดจากความถี่ของหุยมบนผิวคายเศษโลหะ เนื่องจากความถี่ของหุมนี้อาจมีผลต่อความแข็งแรงของคมตัด และทำให้เศษโลหะไหลออกจากผิวคายเศษโลหะได้ยากขึ้นจึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและต้องใช้แรงในการตัดมากขึ้น ตามมาตรฐาน ISO กำหนดให้

$$d_c = 0.06 + 0.3f$$

โดยที่  $d_c$  = ความถี่สูงสุดของหุยม

$f$  = การป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)

หมายเหตุ อัตราส่วน  $d_c/h_c$  ต้องอยู่ในช่วง 0.2-0.4 มิลลิเมตร

2.1.2.3 การกำหนดอายุเครื่องมือตัดโดยใช้ความเร็วผิว เมื่อคมตัดเกิดการสึกหรอข้อมทำให้ความเร็วผิวของชิ้นงานเสียไปด้วย ดังนั้นจึงสามารถใช้ความเร็วผิวเป็นตัวแปรที่กำหนดอายุเครื่องมือตัดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตัดละเอียด เมื่อเครื่องมือตัดไม่สามารถสร้างความเร็วผิวที่ต้องการได้ ถือได้ว่าเครื่องมือตัดหมดอายุการใช้งาน

2.1.2.4 การกำหนดอายุเครื่องมือตัดจากขนาดของชิ้นงาน เมื่อเครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอ ข้อมทำให้ขนาดของชิ้นงานผิดไปด้วย เมื่อขนาดของชิ้นงานผิดไปมากกว่าขนาดที่ข้อมรับได้ ถือว่าเครื่องมือตัดนั้นหมดอายุการใช้งาน

### 2.1.3 การสึกหรอและอายุของเครื่องมือตัด

ในการใช้งานเครื่องมือตัดบริเวณที่เกิดการสึกหรอคือ บริเวณที่สัมผัสกับเศษโลหะและชิ้นงาน การสึกหรอเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ เกิดบริเวณผิวคายเศษโลหะ ( Rake Face ) และบริเวณผิวด้านข้างของคมตัด ( Flank ) การสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เครื่องมือตัดหมดอายุการใช้งานจำเป็นต้องเปลี่ยนเครื่องมือตัดอันใหม่เข้ามาใช้งาน ในกรณีจำเป็นต้องหยุดการทำงานของเครื่องมือกล ทั้งยังเสียเวลาในการปรับตำแหน่งของเครื่องมือตัด เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นงาน

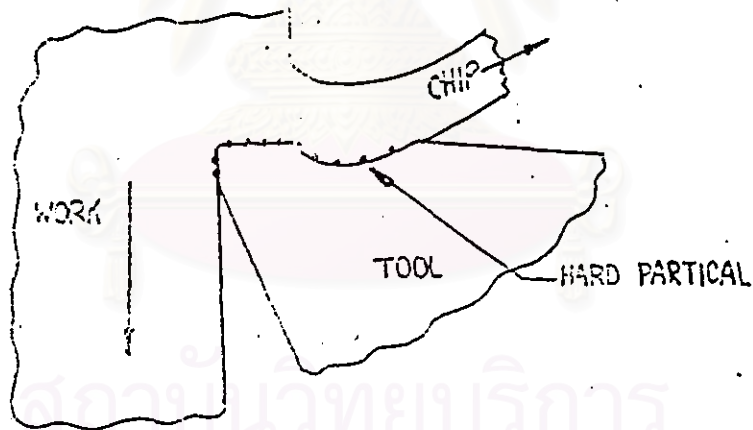
ระยะเวลานับจากเริ่มใช้งานถึงหมดอายุการใช้งานเรียกว่า " อายุเครื่องมือตัด " หรือ " อายุการใช้งานของใบมีด " ( Tool Life ) การเลือกใช้อายุเครื่องมือตัดที่เหมาะสมจะทำให้ขบวนการตัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

เป็นที่ข้อมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าอายุการใช้งานของใบมีด มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อต้นทุนการผลิต ปัญหาข้อหนึ่งในเรื่องเกี่ยวกับอายุการใช้งานของใบมีดก็คือ ปัญหาที่ว่าเราจะเอาอะไรมาเป็นข้อมบ่งบอก ( Criterion ) ว่าใบมีดนั้นๆ หมดสภาพการใช้งานแล้ว ซึ่งข้อมบ่งบอกเหล่านี้ อาจจำเป็นต้องคิดแยกแวกแตกต่างกันออกไปตามสภาวะของการตัดโลหะ ของลักษณะการเสื่อมสภาพของใบมีดและยังขึ้นอยู่กับคุณภาพ ( Quality ) ของผลผลิตที่ผู้ผลิตได้ตั้งไว้อีกด้วย



### สาเหตุของการสึกหรอของเครื่องมือตัด

สาเหตุที่ 1 การสึกหรอจากการเสียดสี การที่วัตถุสองชนิดเกิดการเสียดสีย่อมเกิดการสึกหรอ วัสดุชิ้นที่แข็งกว่าย่อมมีการสึกหรอน้อยกว่าวัสดุที่มีความแข็งน้อย ในการตัด อุณหภูมิบริเวณคมตัดที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสึกหรอของคมตัดได้เร็วยิ่งขึ้น เศษโลหะที่เคลื่อนผ่านบริเวณคมตัด จะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งสูงพอที่จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนสูงเกินกว่าวัสดุเครื่องมือตัดจะรับได้ จึงเกิดการเฉือนของเนื้อวัสดุเครื่องมือตัด นอกจากนี้ยังอาจมีอนุภาคของแข็งที่แปดกปปลอมเข้ามาช่วยให้เกิดการสึกหรอมากยิ่งขึ้น เช่น เศษทรายที่ยังติดอยู่ที่ผิวของงานหล่อ หรือเศษโลหะที่เกิดการทำผิวชั้นงานให้แข็ง (work hardened)



รูปที่ 2.4 แสดงการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสี

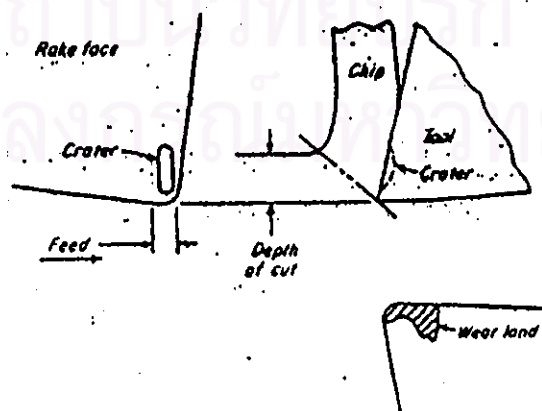
สาเหตุที่ 2 การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดของเศษโลหะ เศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด (Built Up Edge) เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในขบวนการตัดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เศษโลหะอ่อนตัวลง รวมทั้งผลของความเสียดทานระหว่างเศษโลหะกับผิวคายเศษโลหะ จึงทำให้มีเศษโลหะบางส่วนเกิดการเชื่อมติดกับคมตัดแล้วพอกตัวหนาขึ้น เมื่อถึงขนาดหนึ่งจะแตกออกมาซึ่งจะทำให้เนื้อวัสดุเครื่องมือตัดบางส่วนหลุดตามออกมาด้วย การเกิดเศษโลหะเชื่อมติดจะเกิดขึ้นแล้วหลุดออกตลอดเวลาของการตัด ทำให้เกิดการสึกหรอกับเครื่องมือตัดด้วย

สาเหตุที่ 3 การสึกหรอจากการแพร่ ผิวสัมผัสที่อุณหภูมิสูงประกอบกับการเสียดสี จะทำให้อะตอมจากวัสดุที่แข็งกว่าสามารถแพร่ไปยังวัสดุที่นิ่มกว่าได้ และในทางตรงกันข้ามอะตอมจากวัสดุที่อ่อนกว่าก็สามารถแพร่ไปยังวัสดุที่แข็งกว่าได้เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าในกรณีนี้ทำให้วัสดุที่แข็งกว่าเสียดคุณสมบัติไป ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น การแพร่นี้ อุณหภูมิเป็นองค์ประกอบสำคัญ เช่นในการตัดโลหะด้วยเครื่องมือตัดที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูง อัตราการแพร่จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุกๆอุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ที่เพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปการสึกหรอของใบมีดนั้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

ลักษณะที่ 1 การสึกหรอบนผิวหน้าคายเศษโลหะ(Crater wear) เป็นแอ่งตื้นบนผิวหน้าคายเศษโลหะ(rake face) การกัดกร่อนจะเป็นไปในด้านลึกมากกว่าด้านกว้าง การสึกกร่อนจะขยายใกล้ คมมีด (cutting edge) และใบมีดจะหมดสภาพการใช้งาน(failure) เมื่อเกิดรอยหักจากแอ่งตื้น ไปยังด้านข้างของคมตัด (clearance face) การสึกกร่อนของมีดแบบนี้มักจะเกิดกับสภาพการตัดแบบไม่ต่อเนื่อง

ลักษณะที่ 2 การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด (Wear land) เกิดขึ้นบนด้านข้างของคมตัด ในแนวขนานกับผิวงานที่เพิ่มถูกตัด แต่เมื่อเป็นไปนานๆเข้า รอยสึกกร่อนจะเอียงขึ้นไปทางคมมีด มากกว่าทางด้านข้างของคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสึกหรอของมีดตัด

แฟกเตอร์ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของใบมีด คือสภาวะการตัด อันได้แก่ ความกว้าง และความลึกของการตัด ความเร็วตัด ลักษณะเรขาคณิตของมีดตัด และคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาตัดอันได้แก่ โครงสร้างของเกรน(grain structure) การผ่านขบวนการทางความร้อน(heat treatment) ความแข็ง(hardness) ความแข็งแรง(strength) ความยืดหยุ่น(elasticity) และอื่นๆ การที่ส่วนปลายมีดกระแทะหลุดออกไป เนื่องจากการสึกหรอบนผิวหน้าคาชเคสโลหะ ผสมกับการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดดังกล่าวแล้ว การเกิดเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด เข้มติดกับปลายมีด เมื่อเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัดหลุดก็ดึงเอาเนื้อโลหะของปลายมีดให้หลุดตามไปด้วย นี่ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการหักที่ปลายมีดเช่นกัน การเกิดการสึกหรอจะมีผลต่อแรงและชิ้นงานดังต่อไปนี้

1. โดยปรกติจะเพิ่มแรงที่ใช้ในการตัด แต่ในบางกรณีการสึกหรอบนผิวหน้าคาชเคสโลหะอาจทำให้แรงลดลงได้เพราะว่าทำให้มุมคายเพิ่ม
2. การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด และการกระแทะหลุดไปที่ปลายมีดจะทำให้แรงตัด เพิ่มขึ้นเพราะเพิ่มแรงเสียดทาน
3. ทำให้ความเรียบของผิวงาน ( surface finish ) เสียไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปลายมีดหักและเกิดการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด แต่ในบางกรณีการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด อาจจะขัดผิวของชิ้นงานทำให้ความเรียบดีขึ้น
4. การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด ทำให้ลักษณะของคมตัดเปลี่ยนไป ทำให้ชิ้นงาน ที่ได้มีรูปร่างไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ผลอันนี้จะมีมากถ้าเป็นใบมีดที่มีรูปร่างเฉพาะ
5. การสึกหรอของใบมีดอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือน(vibration) การที่มีดสูญเสียสภาพการใช้งาน ( fail ) อาจพิจารณาได้ 2 กรณี  
 กรณีที่หนึ่ง คือ จะทำให้ปลายมีด ( tool tip ) อ่อนตัวลงจึงเกิดการไหลแบบพลาสติก(plastic flow) ที่ความเค้นเฉือน(shear stress) ต่ำๆ ทำให้ที่อลง และความถี่เนื่องจากการไหลแบบพลาสติกก็เข้าไปในเนื้อมีดเรื่อยๆ  
 กรณีที่สอง คือ การสึกหรอบนผิวหน้าคาชเคสโลหะและการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด ประกอบกันทำให้เกิดรอยแตกที่ปลายมีด และกระแทะหลุดไปในที่สุด เป็นแบบที่หักเนื่องจากความเปราะของมีด

#### 2.1.3.1 กลไกของการสึกหรอจากการขัดสี ( Mechanism of Wear in Sliding System )

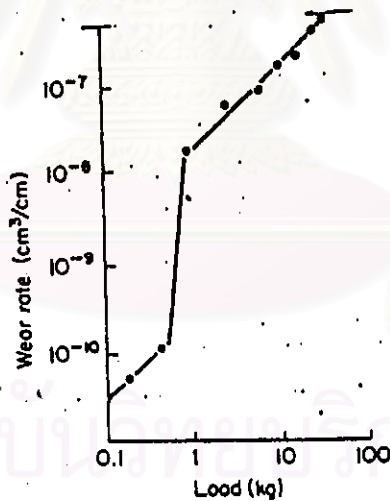
จากการศึกษาลักษณะของการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานแห้งๆ 2 ชิ้น ขัดสีกันพบว่ามีอยู่ 4 ลักษณะคือ

### 2.1.3.1.1 Adhesion Wear

เป็นการขัดสีโลหะ 2 ชนิด โดยที่การขัดสีเกิดขึ้นเข้าไปเข้ามาบนผิวหน้าอันเดิม ซึ่งจะไดผล ดังนี้ คือ

Bowden และ Tabor (1954) พบว่าโลหะที่อ่อนกว่าส่วนหนึ่งจะหลอมละลายไปปะติดกับโลหะที่แข็งกว่า เกิดเป็นปุ่มนูนขึ้นบนโลหะที่แข็งกว่า แต่เมื่อการขัดสิดำเนินไป ปุ่มนูนนี้ก็จะถูกขัดให้หลุดออกโดยที่รอยฉีกจะกินลึก รอยต่อของโลหะทั้งสองนั้นทำให้ผิวของโลหะที่แข็งกว่าหลุดไป

Archard และ Hirst (1956) ได้พิจารณาการสึกกร่อนไป ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คืออย่างอ่อน ( mild ) และอย่างรุนแรง ( sever ) แต่ที่อธิบายเพียงว่าในกรณีที่เรียกว่าการสึกกร่อนไปอย่างอ่อนนั้น ผิวหน้าของโลหะที่ขัดสิดันจะเรียบขึ้นและชั้นส่วนที่หลุดไปจากผิว ( wear debris ) ก็เล็กมาก ส่วนในการสึกกร่อนอย่างรุนแรงจะเกิดการเข้มนิดและหลุดไป และชั้นส่วนที่หลุดไปจากผิวก็ใหญ่มาก ความแตกต่างของอัตราการสึกกร่อนระหว่างอย่างอ่อนกับอย่างรุนแรงนั้นจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.6

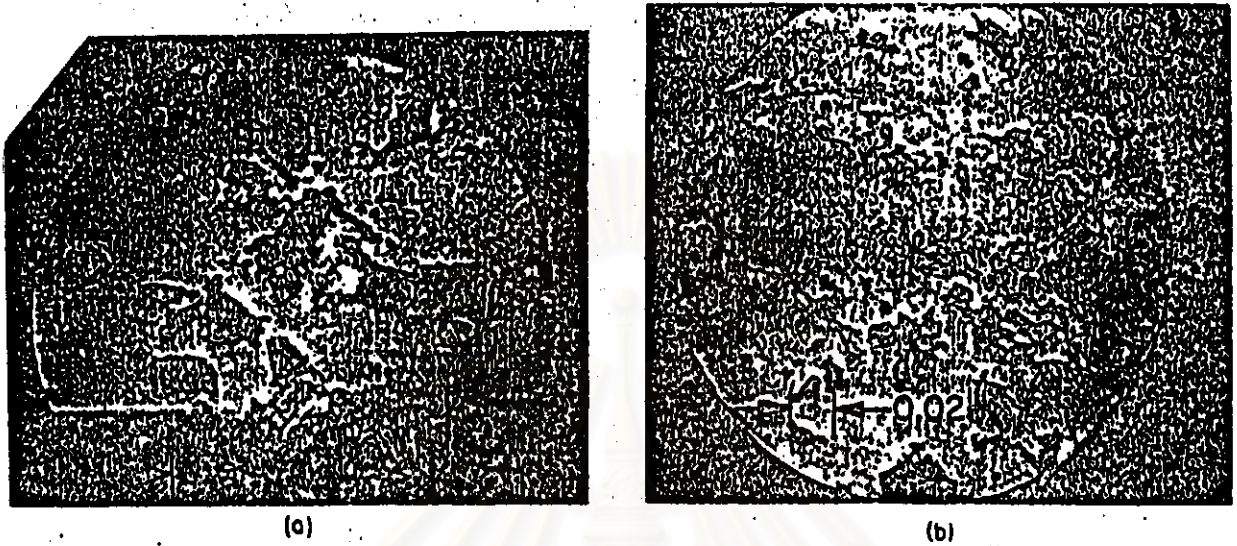


รูปที่ 2.6 การแปรเปลี่ยนไปของอัตราการสึกกร่อนเมื่อขัด 60/40 brass กับ stellite โดยมี acetone เป็นสารหล่อลื่น

Kerridge และ Lancaster (1956) ได้อธิบายกลไกของการกร่อนอย่างอ่อนและอย่างรุนแรง ดังนี้ ในระยะเริ่มแรกของการขัดสิดันน้ำหนัก ( load ) ที่กดลงบนผิวที่ขัดสิดันนั้นน้อย จะทำให้รอยขรุขระของผิวหน้าทั้งสองถูกขัดไป บริเวณที่ผิวทั้งสองจะสัมผัสกันก็มีมากขึ้น ผิวที่เกิดใหม่

นี่จะมีฟิล์มออกไซด์ (oxide film) ปรากฏมาด้วย ทำให้ผิวหน้าทั้งสองไม่สามารถสัมผัสกันได้อีก แต่เมื่อการขัดถูยังคงดำเนินไป ฟิล์มออกไซด์ ก็จะหลุดออกไปเป็นชิ้นส่วนที่หลุดไปจากผิว (wear debris) เกิดการกร่อน การเกิดฟิล์มออกไซด์และการหลุดของชิ้นส่วนสลับ กัน เช่นนี้ เป็นต้นเหตุให้การกร่อนไปดำเนินไปอย่างช้าๆ ในกรณีที่น้ำหนักมากขึ้นก็จะกลายเป็นการกร่อน แบบรุนแรงซึ่งจะมีโลหะของผิวหน้าที่อ่อนกว่ามาเชื่อมติดกับโลหะที่แข็งกว่าเป็นปุ่มนูนขึ้น ปุ่มนี้ก็จะถูกทำให้หลุดไปโดยแรงกระแทกขณะขัดถู รอยฉีกเกิดขึ้นได้มีผิวหน้าเดิมของโลหะที่แข็งกว่า ทำให้โลหะที่แข็งกว่านั้นกร่อน

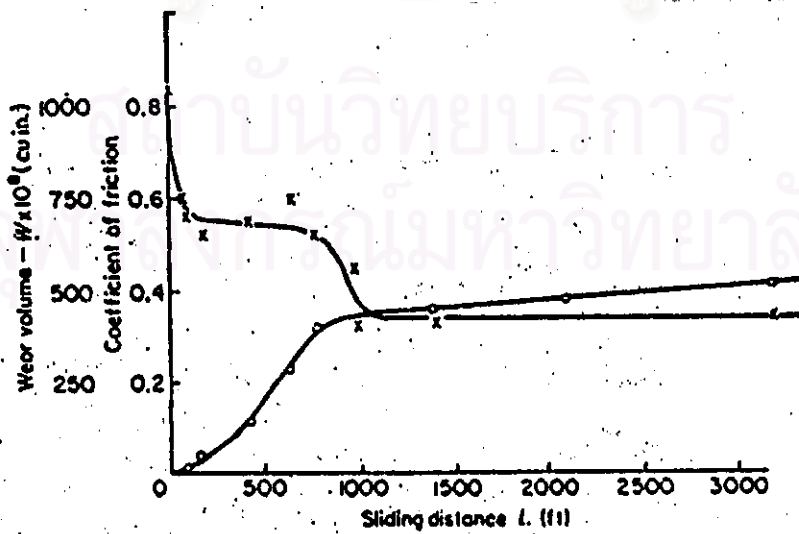
Armarego และ Brown (1969) ได้ทำการทดลองโดยใช้วงแหวน mild-steel หมุนอยู่กับที่ และมีโลหะอีกชนิดหนึ่งซึ่งแข็งกว่าเป็นตัวขัดถู ผลปรากฏว่าเกิดการกร่อน 2 ชนิด ดังกล่าวเช่นกัน แต่ในกรณีของการกร่อนอย่างรุนแรงนั้นเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะ 2 ชั้น คือ ชั้นแรกจากวงแหวนที่อ่อนกว่าไปเกาะติดบนตัวขัดถู เมื่อขนาดโคขึ้นก็หลุดออก และดึงเอาเนื้อโลหะที่แข็งกว่าติดไปด้วย แต่เนื่องจากความดันระหว่างผิวหน้าทั้งสองนั้นสูง ทำให้ชิ้นส่วนที่หลุดนั้นเคลื่อนไปปะติดกับวงแหวนที่อ่อนกว่า โดยลักษณะเป็นแผ่นบางๆเกาะติดอย่างไม่แน่นอนนัก เมื่อการขัดถูดำเนินต่อไปตัวขัดถูก็จะขอเอาแผ่นบางๆนี้ให้หลุดไป แต่ขณะที่แผ่นบางๆนี้หลุดไปตัวขัดถูจะเกิดมีจุดนูน (high spot) เล็กๆเกาะติดแน่นอยู่ เมื่อมีแผ่นบางๆมาเกาะมากขึ้นจุดนูนนี้ก็จะสูงขึ้น เมื่อขนาดของจุดนูนเพิ่มขึ้นระยะห่างระหว่างผิวหน้าของวงแหวนและตัวขัดถูก็ลดลงจนในที่สุดทำให้ผิวหน้าของโลหะทั้งสองถูกดันโดยจุดนูนให้ห่างกันออกไปจนผิวหน้าเดิมไม่สามารถสัมผัสกันได้ จุดนูนนี้มีความแข็งมากกว่าโลหะที่มันเกาะติดอยู่มาก (จุดนูนมีความแข็ง 600 วิกเกอร์ เมื่อเทียบกับความแข็ง 200 วิกเกอร์ ของ mild steel ซึ่งเป็นโลหะที่มันมาเกาะติด) ในกรณีของการสึกกร่อนอย่างอ่อน จะเปลี่ยนชิ้นส่วนที่หลุดไปจากผิว เป็นผงออกไซด์ที่ค้ำและค้ำสัมผัสประสิทธิภาพเสียดทานก็ลดลง รูปที่ 2.7 (a) และ (b) แสดงขนาดของชิ้นส่วนที่หลุดไปจากผิวที่เปลี่ยนไป รูปที่ 2.8 แสดงผลของเปลี่ยนแปลงที่มีต่อความเสียดทานและอัตราการสึกกร่อน ซึ่งคำอธิบาย ของ Armarego และ Brown (1969) ได้รับการสนับสนุนจากนักค้นคว้าคนอื่น เช่น Antre และ Chek ด้วย Antre เรียกการเกิดส่วนที่นูนเพิ่มขึ้นนี้ว่า prow formation เนื่องจากคล้ายกับการเกิดเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัดในการตัดโลหะ



(a)

(b)

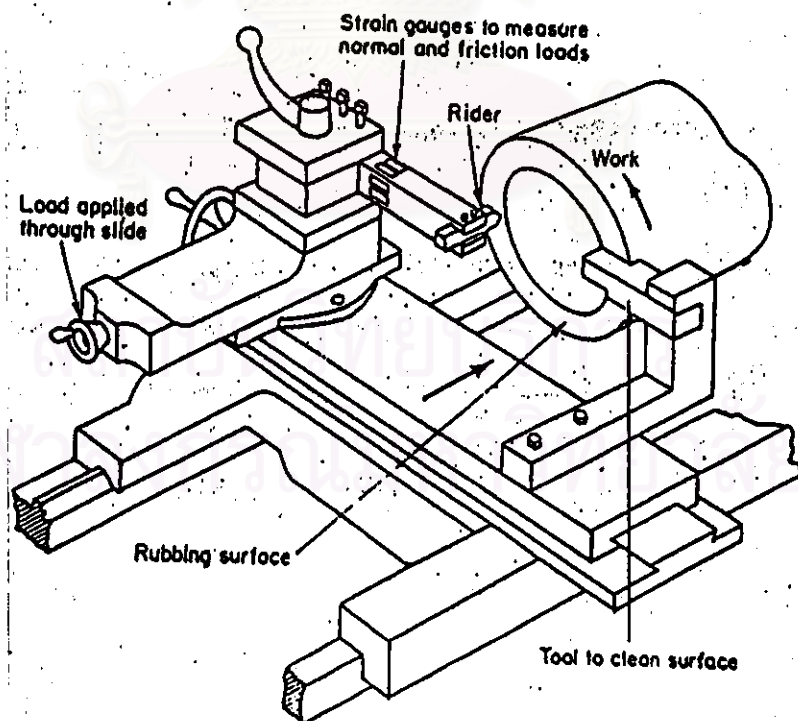
รูปที่ 2.7 Wear debris (a) ก่อน (b) ภายหลังจากการเปลี่ยนแปลง เป็นการสึกกร่อนอย่างอ่อนเมื่อโลหะแข็งขัดสีบนวงแหวน ซึ่งอ่อนกว่าที่ 182 sfpm ด้วยน้ำหนัก 60 ปอนด์



รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานและปริมาณของการสึกกร่อนจากตัวขัดสีในสภาวะเดียวกับรูปที่ 2.7

ในกรณีของการตัดมักจะเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานที่ใหม่อยู่เสมอ ซึ่งต่างกับการทดลองข้างต้น Armarego และ Brown (1969) ได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวขัดที่เป็นเหล็กกล้ารอบสูง ที่ถูกทำให้แข็ง และวงแหวนที่หมุนคือ mild steel ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ปรากฏว่าการกร่อนของตัวขัดที่ลดน้อยลงอย่างมากเมื่อขัดสับผิวใหม่อยู่เรื่อย เป็นที่สังเกตว่าโลหะที่อ่อนกว่าจะเชื่อมติดกับตัวขัดที่แข็งกว่าเป็นก้อน และก้อนนูนอันนี้เองที่สัมผัสกับวงแหวนที่หมุนไป เมื่อก่อนนี้โคจรรอบก็หลุดไปพาเอาชิ้นส่วนของโลหะที่แข็งไปด้วย ต่อมาก็เกิดก้อนนูนนี้ขึ้นอีกที่ตำแหน่งอื่นๆ ของตัวขัดที่ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นในระยะแรกของการขัดแบบซ้ำๆ (repeated rubbing) เช่นกัน แต่ในระยะหลังๆ การขัดแบบซ้ำๆ จะให้รอยกระแทกบนตัวขัดที่เป็นปุ่มตะป่ำน้อยกว่าทั้งที่อัตราการกร่อนเกิดขึ้นมากกว่า

การทดลองของ Armarego และ Brown (1969) ใกล้เคียงกับสภาพการตัดซึ่งใบมีดแข็งแรงกว่า ชิ้นงาน และใบมีดจะขัดสับผิวงานที่ใหม่เสมอ ดังนั้นผลการทดลองของเขาทั้ง 2 จึงแสดงว่า ใบมีดจะถูกปกคลุมและป้องกันการกร่อนโดยเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด ได้ชั่วระยะหนึ่ง ข้อสรุปอันนี้ได้จากการที่พบเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด ในการทดลองขัดแบบไม่ซ้ำ ซากและผิวพบว่าอัตราการกร่อนของการขัดแบบนี้น้อย



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการสึกหรอเมื่อเกิดการขัดสับผิวหน้าใหม่อยู่เสมอ



รูปที่ 2.10 การเกิด built up edge ที่คมตัดของมีด

#### 2.1.3.1.1.1 Adhesion wear theory

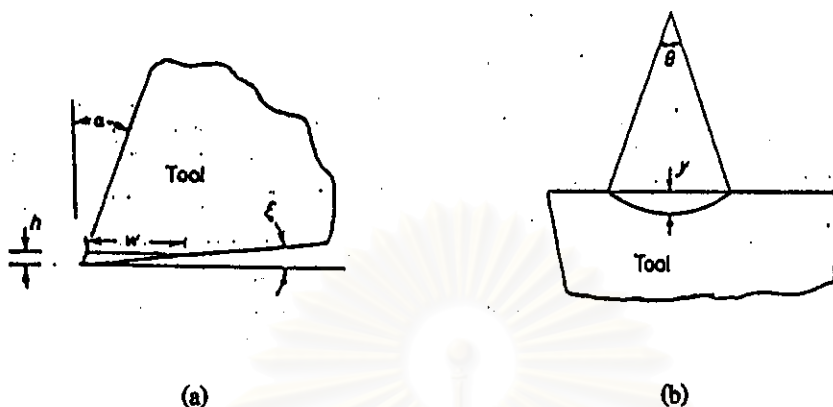
Taylor (1962) ได้พิจารณาการทดลองแบบที่ตัดซ้ำดีแข็งแกร่งกว่า และสภาพการขัดดี เป็นแบบไม่ซ้ำรอยเดิม (non repeating) และสรุปว่าอัตราการสึกหรอแปรผันโดยตรงกับน้ำหนัก ที่กระทำที่ผิวของการขัดดีนั้น และตั้งสมมติฐานปริมาตรของไบมีดที่กร่อนไปต่อหนึ่งหน่วยเวลา แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ของรอยที่เกิดจากการกร่อนนั้น (wear scar) จากสมมติฐานนี้และ พิจารณาการตัดแบบต่อเนื่องมามาก ทำให้สมการของการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด ดังนี้

$$w = (K/A) \cdot t + w_0$$

เมื่อ  $w_0$  คือ การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด เมื่อเวลา  $t = 0$  และ  $A$  และ  $K$  เป็นค่าคงที่  $w$  คือ การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดในแนวขนานกับทิศทางของการตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a)

สำหรับ crater wear เทย์เลอร์ได้กำหนดให้รูปร่างของแอ่งเหมือนส่วนของส่วนโค้ง ดังรูปที่ 2.11 (b) และพิจารณาจากการตัดแบบต่อเนื่องมามาก เขาให้ผลสรุปออกมาเป็น กราฟดังรูปที่ 2.12 ซึ่งความลึกของแอ่งแปรผันโดยตรงกับเวลาที่มันเคลื่อนที่ไป

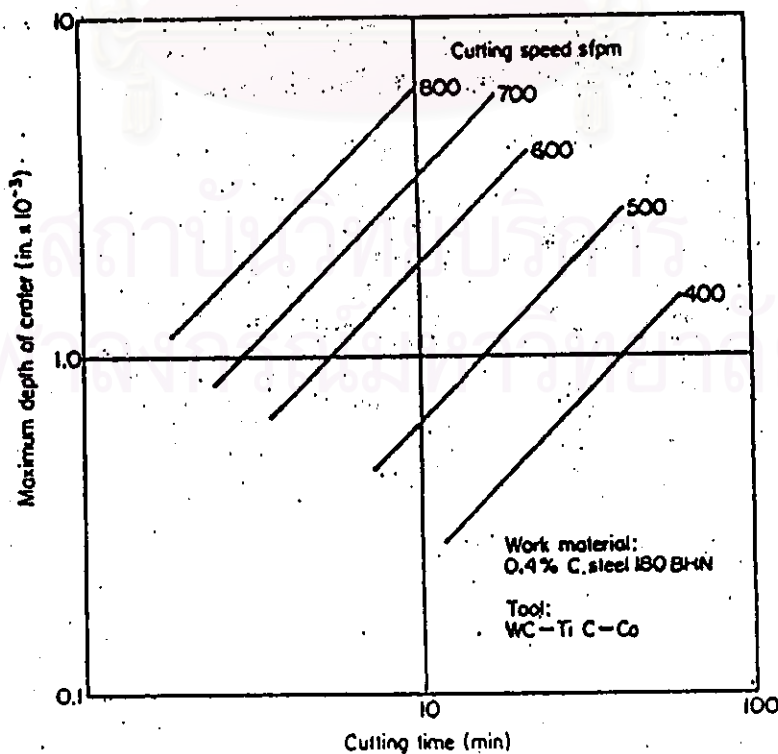




รูปที่ 2.11 (a) รูปร่างของ flank wear ที่เกิดบน clearance face  
 (b) รูปร่างของ crater wear ที่สมมุติโดย J. Taylor

2.1.3.1.2 Abrasive wear

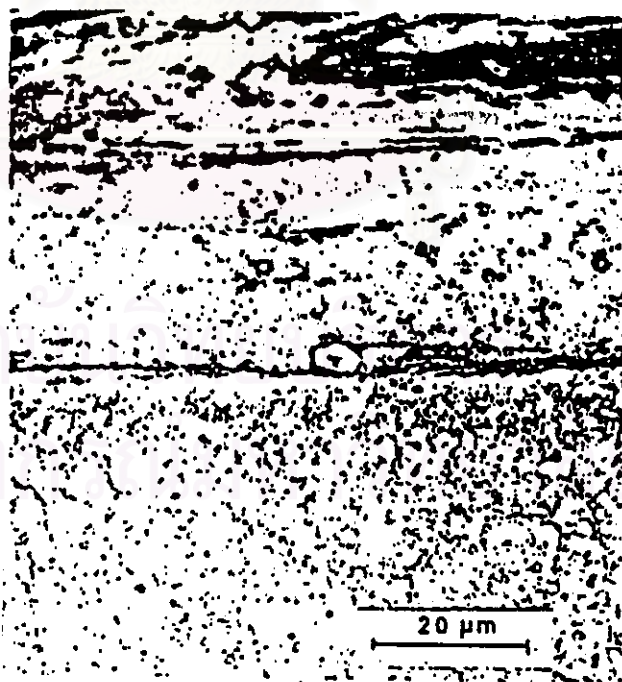
ข้อคิดเห็นอันแรกของการเกิดการกร่อนโดยที่โลหะอันหนึ่งมีผิวหน้าบางตอนที่สูงนูนขึ้น ส่วนนี้ก็จะขีดข่วนทำให้เกิดรอยกร่อนขึ้นในขณะที่ขัดสีกับโลหะอีกอันหนึ่ง การกร่อนแบบนี้เกี่ยวข้องกับ การตัด และขึ้นอยู่กับความแข็ง ความยืดหยุ่น (elastic properties) และรูปร่าง (geometry) ของผิวหน้าทั้ง 2 ด้วย



รูปที่ 2.12 ความลึกของ crater ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

Oberle (1965) กล่าวว่าถ้าโลหะใดมีความสามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) สูงก็จะทนต่อการสึกหรอแบบเสียดสีได้ดี Spurr และ Newcomb (1966) พบจากการทดลองว่าค่าความต้านทานการเสียดสี (abrasive resistance) ของโลหะแปรผันโดยตรงกับค่า elastic moduli ส่วน Kruschov แสดงว่าค่า ความต้านทานการเสียดสี (abrasive resistance) ของโลหะแปรผันโดยตรงกับความแข็งของโลหะที่อยู่ในสภาพอบอ่อน (anneal) ส่วน Kragelskii ได้พิจารณาและวิจารณ์ข้อเสนอแนะของ Levin, Tabor, Blok และคนอื่นๆเกี่ยวกับการเปลี่ยนจากแบบยืดหยุ่น ไปเป็นพลาสติก ถึงแม้ว่าผลการค้นคว้าจะมีข้อขัดแย้งกันอยู่บ้าง แต่ก็มีส่วนตรงกันที่สามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่เกิดการขัดสีกันถึงแม้ว่าแรงในการขัดสีจะต่ำ ก็มักจะเกิดการแปรรูปแบบพลาสติก ยกเว้นผิวหน้าที่ได้ผ่านการทำให้แข็ง (hardened surface) ที่มีผิวเรียบมากซึ่งกรณีนี้การแปรรูปจะเป็นแบบยืดหยุ่น

จากการทดลองของ Armarego และ Brown ก็พบว่าในการขัดสีด้วยขัดสีมีส่วนพอกพูนขึ้นนั้นจะขัดข่วนให้ผิวหน้าที่ถูกขัดสีเป็นร่องลึก ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าในการที่เกิดเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด ขึ้นที่ปลายมีดเป็นเหตุให้ผิวหน้าของชิ้นงาน ไม่มีผิวเรียบอย่างที่ควรจะเป็น



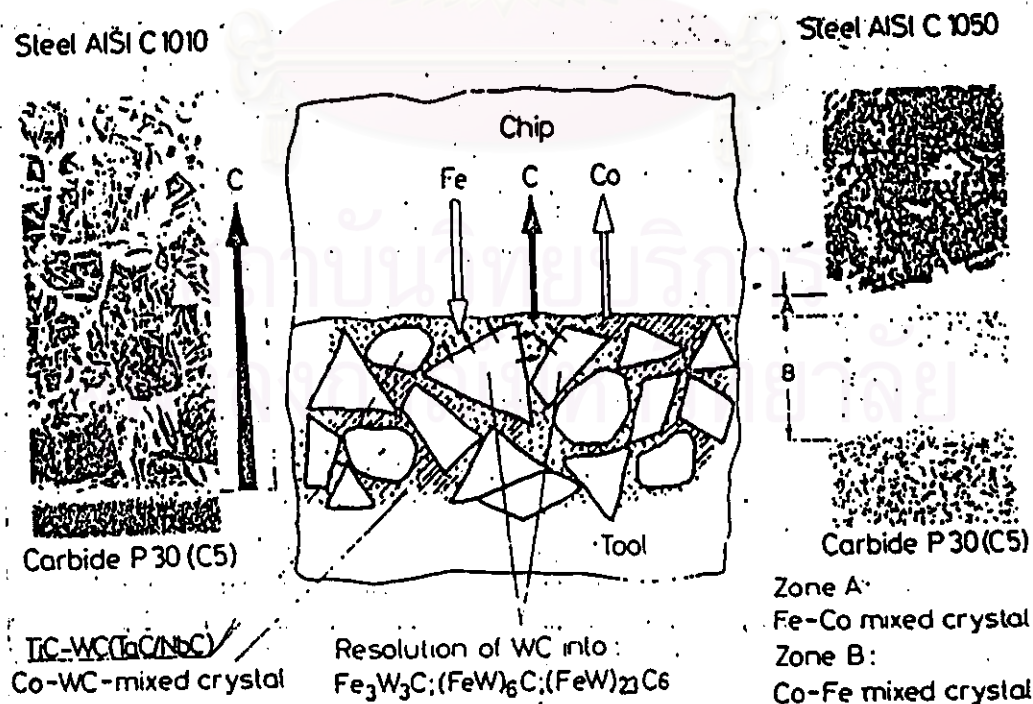
รูปที่ 2.13 Section through rake face of high speed steel tool after cutting austenitic stainless steel containing Ti(C,N) particle.

2.1.3.1.3 Diffusion wear

Holm (1955)คิดว่าการกร่อนเกิดจากการแพร่ของอะตอมที่บริเวณผิวหน้าซึ่งติดกันเพื่ออย่างเคียว แต่ภายหลังได้เชื่อกันว่า การกร่อนเนื่องจากการแพร่ของอะตอมนั้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสริมกับการกร่อนเนื่องจากวิธีการอื่น Bowden และ Tabor (1954) กล่าวว่า การแพร่เกิดขึ้นเมื่อมีโลหะอันหนึ่งไปปะติดกับโลหะอีกอันหนึ่ง และการแพร่นี้ผสมกับสภาพของโลหะผสมของผิวหน้าทั้งสองซึ่งขัดสีกันจะเป็นปัจจัย ที่ควบคุมขนาดและลักษณะของชิ้นส่วนที่กร่อนไป ( wear particles )

ในบางกรณีอาจจะจัดให้การแพร่เป็นส่วนหนึ่งของ ( abrasive wear ) ได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ เมื่อใช้มีดทำด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์แล้วตัดเหล็กกล้า เนื่องจากโคบอลต์ และ เหล็ก ในชิ้นงานมีความสามารถที่จะรวมตัวกันทางเคมีได้ดี ดังนั้นเมื่อมีดสัมผัสกับชิ้นงานทำให้มีโอกาสที่โคบอลต์จะแพร่ออกจากมีด ทำให้ผิวหน้าของมีดอ่อนแอลง ซึ่งผลก็เห็นได้จากการเกิดการสึกหรอบนผิวหน้าคายเศษโลหะบนมีดชนิดนี้เมื่อตัดเหล็กกล้า

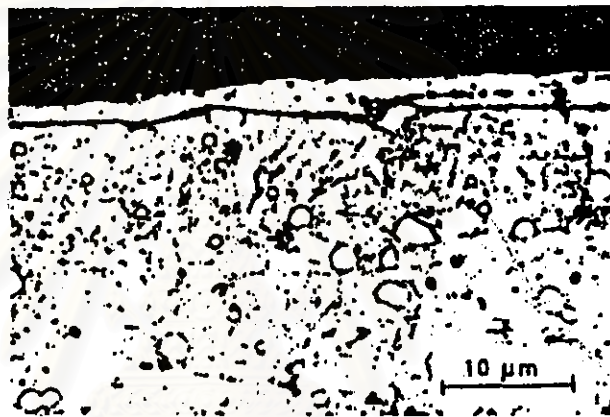
เนื่องจากอัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งแปรผันโดยตรงกับความเร็วในการตัด แต่ปริมาณของอะตอมที่แพร่ไปขึ้นอยู่กับเวลาที่ผิวหน้าทั้งสองสัมผัสกัน ซึ่งแปรผกผันกับความเร็วในการตัด ดังนั้นการพิจารณาการแพร่ของอะตอมสัมพันธ์กับอัตราการกร่อนและอัตราเร็วของการขัดสีจึงยุ่งยากซับซ้อน



รูปที่ 2.14 แบบจำลองของขบวนการแพร่ของมีด Tungsten carbide



รูปที่ 2.15 White etching layer formed at rake of high speed steel tool after cutting steel at medium cutting speed



รูปที่ 2.16 Section through rake face of high speed steel tool after cutting steel. Interface characteristic of diffusion wear.

นักค้นคว้ากลุ่มหนึ่งได้ให้ความเห็นว่า การสึกหรอของใบมีดจะต้องเกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการแพร่ ดังอธิบายในกรณีของเครื่องมือตัดที่เป็นทั้งสเตนคาร์ไบด์ Cook และ Nayak (1996) ได้ให้ข้อคิดเห็นว่าการกร่อนของใบมีดอาจจะเนื่องจากการแพร่ดังนี้

1. ใบมีดอ่อนตัวลงเพราะคาร์บอน จากผิวและส่วนลึกลงไปจากผิวของใบมีดแพร่ออกไปภายนอก
2. อะตอมของธาตุที่สำคัญของใบมีด แพร่ออกไปภายนอกเข้าสู่ใบมีด และผิวงานใหม่
3. อะตอมของธาตุที่มีจำนวนน้อยในใบมีดแพร่ออกไปภายนอกทำให้คุณสมบัติของใบมีดเปลี่ยนไป
4. ธาตุในวัสดุชิ้นงานแพร่เข้าหาใบมีด ทำให้คุณสมบัติของใบมีดเปลี่ยน เช่น กรณีตัดชิ้นงานที่มีแรงเป็นส่วนประกอบ แรงทำให้ใบมีดสร้างผิวใหม่ที่เปราะและหักได้ง่าย

5. การที่อะตอมของธาตุในไบเมทัลแพร์เข้าไปสู่เศษโลหะและวัสดุชิ้นงานนั้นทำให้ธาตุเหล่านี้ไปเพิ่มความแข็งแรงแก่ผิวเศษโลหะและวัสดุชิ้นงาน เช่น กรณีคาร์บอนทำให้ เศษโลหะและวัสดุชิ้นงานขูดได้ ไบเมทัลสึกกร่อนไป

Opitz (1965) ได้แสดงว่าขณะทำการตัดสามารถเกิด การเปลี่ยนแปลงเป็นออกไซด์บนไนท์ขึ้นที่ผิวของเศษโลหะได้ซึ่งถ้าวัสดุชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนสูงเฟสออกไซด์ไนท์ที่เกิดขึ้นจะแข็งกว่า คาร์ไบด์ของไบเมทัล แต่การที่จะเกิดการเปลี่ยนเป็นออกไซด์ไนท์ได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน ในวัสดุชิ้นงาน โครงสร้างของวัสดุชิ้นงาน ส่วนประกอบของไบเมทัล เวลา และ อุณหภูมิที่ เศษโลหะและไบเมทัลสัมผัสกันอย่างเช่น เครื่องมือตัดที่เป็นทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ จะยอมให้คาร์บอนแพร่ออกไปยากกว่าเครื่องมือตัดที่เป็นทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์จึงกร่อนน้อยกว่า ซึ่งทั้ง 5 ข้อนี้ไม่ได้เป็นสาเหตุของการกร่อนเพียงอันหนึ่งอันเดียว แต่อาจจะเกิดร่วมกันหลายแบบได้ และในบางกรณีข้อใดข้อหนึ่งอาจเป็นกลไกที่เด่นกว่าเพื่อน

Saibel และ Ling (1955) กับ Trigger และ Chao (1956) ทำการวิเคราะห์แต่ให้ผลที่มีส่วนคล้ายกันเล็กน้อยโดยกล่าวว่า การแพร่อาจเป็นกลไกสำคัญในการเกิดการสึกหรอตามแบบการสึกหรอเนื่องจากการยึดเหนี่ยว การวิเคราะห์ของทั้งสองคู่ใช้ reaction - rate theory ของ Eyring ในการพิจารณา

Saibel และ Ling (1955) ใช้ reaction - rate theory ในการอธิบายความเป็นไปได้ของการเกิดการเชื่อมติด ( weld ) อันหนึ่งและความเป็นไปได้ของการแปรเปลี่ยนโลหะ (metal transfer) เมื่อส่วนที่เชื่อมนี้หลุดไปอีกอันหนึ่งแล้วสรุปเป็นสมการของ อัตราการสึกหรอ (wear rate) ดังนี้

$$w = AT^B$$

เมื่อ T = temp, W = wear rate, A และ B เป็นค่าคงที่

ส่วน Trigger และ Chao ใช้ reaction - rate equation หาสัดส่วนของบริเวณที่สัมผัสกันขณะขัดสี ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแปรเปลี่ยนโลหะ อันหนึ่ง และหา indentation hardness ของส่วนที่บูนขึ้นออกมาอีกอันหนึ่งแล้วสรุปเป็นสมการของ อัตราการสึกหรอ (wear rate) ดังนี้

$$\frac{W}{IN} = \frac{l}{T}$$

เมื่อ W = Wear rate , N = normal load on surface

l = Sliding distance , T = absolute temperature

Dorinson (1956) ก็นำเอา reaction-rate equation มาใช้กับการสึกหรอของไบเมทัล เขาวิเคราะห์ว่าการกร่อนเกิดจากอะตอมของธาตุในเศษโลหะ แพร่เข้าไปสู่ไบเมทัลและทำปฏิกิริยากับธาตุใน ไบเมทัล ทำให้ผิวหน้าของไบเมทัลอ่อนลง เขาสันนิษฐานว่าปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวนี้เร็วมาก

เมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ Dorison ได้ให้สมการของการสึกหรอต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยเกี่ยวข้องกับ ปัจจัยหลายอันคือ พื้นที่เฉลี่ยของส่วนที่นูนยื่นออกมาแต่ละอันบนเศษโลหะและใบมีด และจำนวนของส่วนที่นูนยื่นออกมาโดยเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนเศษโลหะและใบมีด อัตราส่วนของส่วนที่นูนยื่นออกมาบนเศษโลหะต่อหนึ่งระยะทางที่สัมผัส , ความยาว และความกว้างของ chip tool contact rate constant และ average lump removal factor

#### 2.1.3.1.4 Fatigue wear

Radchic & Radchic (1966) ได้อธิบายว่าเมื่อผิวหน้าอันหนึ่งมีปุ่มนูนขึ้นมาแล้วขัดสีไปบนผิวหน้าอีกอันหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงกดขึ้นที่ผิวหน้าข้างปุ่มนั้น ขณะเดียวกันก็เกิดแรงดึงขึ้นข้างหลังของปุ่มนั้น เมื่อปุ่มนั้นเคลื่อนที่ไปบนผิวหน้าใดก็ทำให้ผิวหน้านั้นได้รับแรงกด และแรงดึงสลับกัน ซึ่งเป็นสาเหตุก็เกิดการล้าตัว ( fatigue failure ) ขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วจะทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นได้ผิวหน้าและรอยร้าวนี้ดำเนินต่อไปยังผิวหน้าทำให้ผิวหน้าหลุดออกไป

ในกรณีที่พบทั่วไปปรากฏว่าผิวที่หลุดมาโดยวิธีนี้มักจะเป็นชิ้นของฟิล์มออกไซด์ ดังนั้นการกร่อนเนื่องจากการล้าตัวนี้จึงเกิดขึ้นกับฟิล์มออกไซด์มากกว่าในโลหะ

Kragelskii (1959) ได้อธิบายว่าการกร่อนแบบนี้เองที่เกิดขึ้นกับโลหะเมื่อมีสารหล่อลื่นคลุมอยู่ เนื่องจากสารหล่อลื่นนั้นไม่ได้ลด normal load และถึงแม้จะทำให้ tangential load ลดก็ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนความเค้นสลับไปมาเช่นกัน ดังนั้นการล้าตัวจึงเกิดขึ้นได้ แม้โลหะที่เป็นผิวหน้าทั้งสองจะไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง

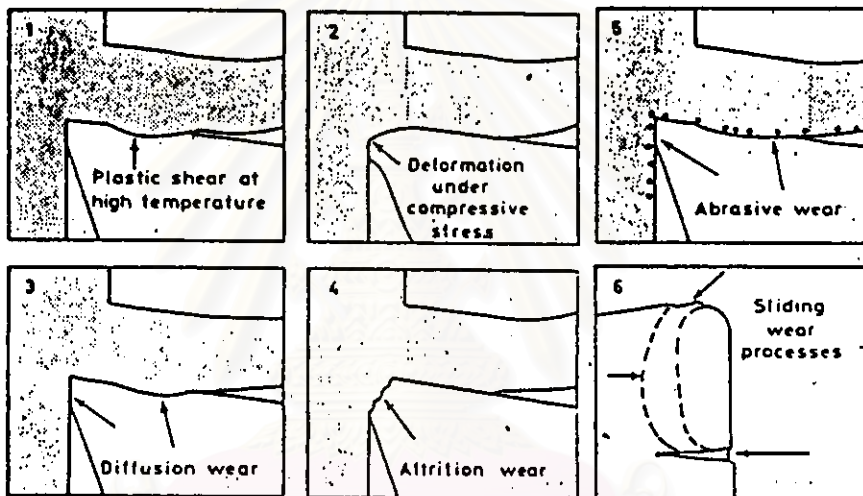
การประยุกต์ทฤษฎีการสึกหรอสำหรับการสึกหรอเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดสึกกร่อนไปเนื่องจากการขัดสีของเศษโลหะ กับชิ้นงานบนหน้ามุมคายและบนด้านข้างคมตัด เชื่อว่าการขัดสีนี้ทำให้ผลเป็นไปตามหลักการที่เสนอมาข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามในการตัดมีปัจจัยพิเศษที่ควรคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1. ผิวหน้าที่ขัดสีกับมีดนั้น เพิ่งถูกตัดออกมาใหม่ๆจะไม่มีเวลาพอที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ หรือฟิล์มชนิดอื่นๆ
2. ผิวหน้าที่ขัดสีกับมีดนั้น ได้ผ่านขบวนการชุบแข็งจนเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นพลาสติกมาแล้ว
3. อุณหภูมิและความดันที่ผิวหน้าซึ่งขัดสีกันนั้นสูงมาก อีกประการหนึ่งในการตัดใบมีดที่มีความแข็งกว่าชิ้นงาน ดังนั้นทฤษฎีที่จะหามาพิจารณาได้ก็ควรจะเป็นกรณีได้จากตัวขัดสีแข็งกว่าตัวถูกขัดสี ( ring )



รูปที่ 2.17 (a) Rake surface and (b) flank of high speed steel tool used to cut steel showing built up edge and sliding wear at position E



รูปที่ 2.18 Wear mechanism on high speed steel tools

### 2.1.3.2 การบ่งบอกสภาพการสึกหรอของใบมีด

กล่าวอย่างกว้างๆแล้ว ข้อบ่งบอกว่าใบมีดหมดสภาพแล้วนั้นจะมีอยู่มากมายก็อาจจะรวมอยู่ได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ

ประเภทที่ 1 การบ่งบอกสภาพการสึกหรอของใบมีดโดยยึดถือตัวใบมีดเป็นหลัก ( Tool life criteria based on tool ) ซึ่งก็ได้แก่การพิจารณาสภาพของใบมีด โดยอาจถือว่าใบมีดสิ้นสภาพเมื่อ

- ก. คมมีด ( cutting edge ) กระเทาะหรือร้าว
- ข. ขนาดของรอยสึก ( wear land ) บนด้านข้างคมตัดใหญ่เกินไป
- ค. ขนาดของหลุม ( crater ) บนหน้ามุมคาบอาจลึกเกินไปหรือใหญ่เกินไปหรือกว้างเกินไป

- ง. พิจารณาคูตั้งข้อ ข. และ ค. ประกอบเข้าด้วยกัน
- จ. ปริมาตรหรือน้ำหนักของเนื้อสารที่สึกออกจากไบมีดมีค่ามากเกินไป
- ฉ. ไบมีดแตกหักลงไปจริงๆ

ประเภทที่ 2 การบ่งบอกสภาพการสิ้นอายุของไบมีดโดยยึดถือเอาชิ้นงานเป็นหลัก ( Tool life criteria based on workpiece ) เป็นต้นว่า

- ก. ความขรุขระของพื้นผิวของชิ้นงานมีค่าสูงเกินไป
- ข. ขนาดของชิ้นส่วนที่ผลิตออกมามีขนาดเกินขนาดที่ต้องการ
- ค. แรงหรือกำลังในการตัดโลหะมีค่าสูงจนเกินไป

ค่าของอายุการใช้งานของไบมีด จะขึ้นอยู่กับว่าเราใช้ข้อบ่งบอกการสิ้นอายุของไบมีดข้อใด ดังนั้นจึงเป็นการจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องระบุข้อบ่งบอก ( tool life criterion ) ลงไปให้ชัดเจนเมื่อต้องการอ้างอิงหรือเปรียบเทียบของอายุการใช้งานของไบมีด

### 2.1.3.3 การเสื่อมสภาพและการสิ้นสภาพของไบมีด ( Tool Deterioration & Tool Failure )

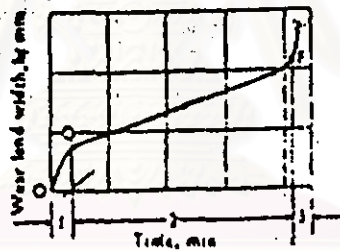
ไบมีดจะมีลักษณะของการเสื่อมและสิ้นสภาพอยู่หลายแบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาทำเป็นไบมีด สารชิ้นงาน ความเร็วในการตัด อัตราการป้อนไบมีด การหล่อเย็นระหว่างการตัดโลหะ และสาเหตุอื่นอีกมากมายซึ่งพอจะอธิบายได้ดังนี้

การกระแทะ ( chippoint ) ของคมไบมีด หรือการร้าว ( cracking ) ของคมไบมีดนั้นเป็นที่เข้าใจกันมานานว่าอาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการออกแบบลักษณะทางเรขาคณิตของไบมีด เนื้อโลหะที่จะรับ load ไบมีดบริเวณคมไบมีดมีน้อยเกินไป หรือเกิดขึ้นจากความบกพร่องในการลับไบมีด เช่น คมไบมีดมีรอยไหม้ การเลือกสารที่เปราะเกินไปมากทำให้ไบมีดสภาพการตัดที่ไม่คงที่ คืออาจจะมีอาการกระแทกเกิดขึ้น ความรู้เกี่ยวกับการกระแทะของไบมีดให้นำมาใช้ในการออกแบบไบมีด เช่นว่าถ้าออกแบบให้มุมคมตัดด้านข้าง ( side cutting edge angle ) มีค่าสูง การกระทบระหว่างคมไบมีดกับชิ้นงาน ก็จะอยู่บริเวณห่างจากปลายไบมีด ความสึกของรอยตัดก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้น จึงช่วยป้องกันการกระแทะหรือการร้าวของคมไบมีดโดยเฉพะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้ปลายไบมีด ไบมีดที่สร้างจากสารที่เปราะกระแทะร้าวง่าย เช่น คาร์ไบด์ หรือ เซรามิก เขามักจะให้ มุมคาย ( rake angle  $\alpha_n$  ) มีค่าเป็นค่าลบหรือมีค่าบวก แต่มีขนาดน้อยเพื่อให้มีจำนวนเนื้อสารใกล้เคียงบริเวณคมไบมีดมากขึ้นซึ่งจะเป็นการป้องกันการกระแทะร้าวของคมไบมีด

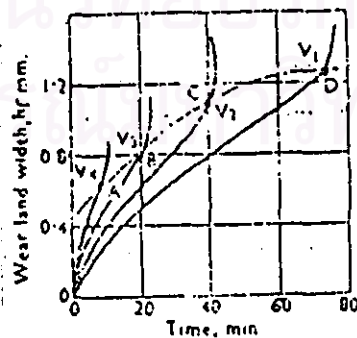
นอกจากการกระแทะหรือการร้าวของคมไบมีด ซึ่งมักจะเกิดหลังจากที่ไบมีดเพิ่งจะตัดโลหะได้ไม่นานนักแล้ว ยังมีการเสื่อมสภาพของไบมีดโดยวิธีอื่นอีก ส่วนการสึกหรอร่อนลงไปของไบมีดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ติดกับคมไบมีด เนื้อไบมีดด้านหลังคมไบมีดจะสึกออกไปทำให้เกิดรอยสึกหรอที่เรียกกันว่าการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด และบริเวณที่อยู่บนหน้ามุมคาย ซึ่งโลหะจะสึกหรอออกไปที่ร่องมุมไว้



ถ้าศึกษาถึงขนาดของการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด จะพบว่า การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดจะโตขึ้นตามเวลาในการตัดที่ล่วงไป แต่อัตราการขยายตัวของ การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดจะไม่คงที่อยู่ตลอดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เมื่อนำมีดที่ลับเสร็จใหม่ๆ มากลึงโลหะใบมีดจะสึกหรอโดยรวดเร็ว ( ตั้งแต่จุด O ถึงจุด Q ) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและเกิดการแปรเปลี่ยนเป็นพลาสติก ทำให้ความเค้นหายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงจุด Q หลังจากนั้นการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดก็ยังคงเกิดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่จะเพิ่มในลักษณะที่อัตราคงที่ ( Uniform wear rate ) ที่น้อยกว่าช่วงแรก จนกระทั่งถึงจุด F บริเวณ Q - F ที่แสดงในรูปที่ 2.19 นั้นการสึกหรอทางกลหรือการสึกหรอที่ไม่ไวต่ออุณหภูมิหลังจากจุด F ไปแล้ว ขบวนการเกิดการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีก ซึ่งจะทำให้แน่ใจได้ว่ามีดตัดจะกลับหาในไม่ช้านี้ จุด F นี้มักจะเรียกกันว่า จุดวิกฤต(critical point)ของ การสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด หรือเรียกง่ายๆว่า critical flank wear



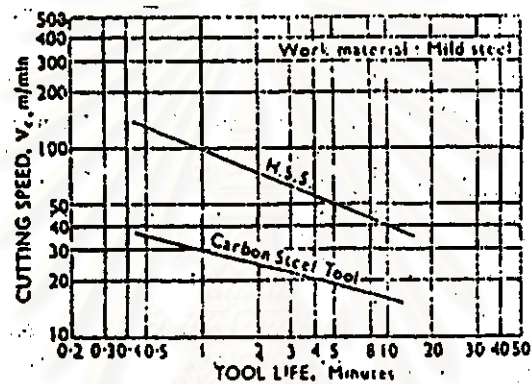
รูปที่ 2.19 การเพิ่มขนาดของ flank wear เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



$V_4 = 220$  m/min.  
 $V_3 = 200$  m/min.  
 $V_2 = 180$  m/min.  
 $V_1 = 160$  m/min.

รูปที่ 2.20 ผลของความเร็วตัดที่มีต่อ critical flank wear

จากรูปที่ 2.20 ซึ่งผลของความเร็วดัดที่มีต่อจุดวิกฤตของ flank wear จะสังเกตเห็นได้ว่า จุดวิกฤตไม่เพียงแต่จะเลื่อนลงมา เนื่องจากเวลาที่ลดลงเท่านั้นแต่ยังเกิดจากความเร็วดัดที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำมีดก็มีผลต่ออายุการใช้งานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 อายุการใช้งานของมีดตัดที่สภาวะการตัดต่างๆ

ในทางปฏิบัติจะไม่นิยมนำไปมีดตัดแตกหักลงไปจริงๆ แต่จะถอดไปมีดออกมาลับใหม่เมื่อมีความกว้างสูงขึ้นค่าๆหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

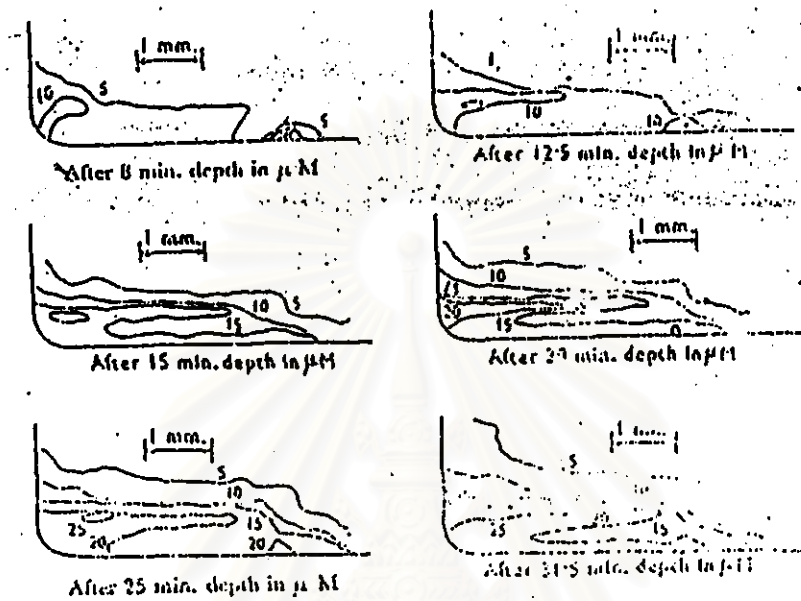
ตารางที่ 2.3 ขนาดของ flank wear ที่นิยมนำมาใช้กับไม้มัดคมดาซูการใช้งาน

| ขนาดของ Flank wear<br>hf. (มม.) | ชนิดของสารไบมีด  | หมายเหตุ                         |
|---------------------------------|------------------|----------------------------------|
| 0.762                           | Cemented carbide | Roughing passes                  |
| 0.254-0.381                     | Cemented carbide | finishing passes                 |
| 0.254-0.381                     | Cemented oxide   | Roughing and<br>finishing passes |
| 1.524 or total destruction      | High speed steel | Roughing passes                  |
| 0.254-0.381                     | High speed steel | finishing passes                 |

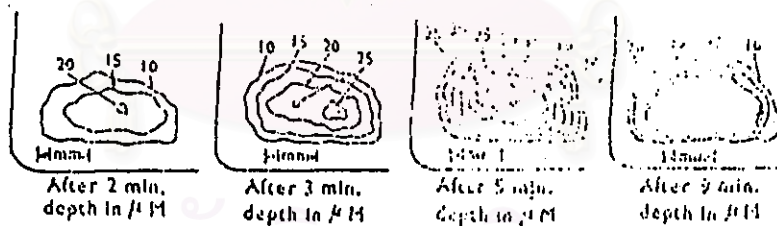
การสึกหรออีกแบบหนึ่งก็คือการสึกหรอแบบการสึกหรอบนผิวหน้าคานเศษโลหะ ซึ่งทำให้เกิดหลุมหรือแอ่ง ซึ่งขนาดของแอ่งก็อาจนำมาใช้กำหนดว่าไบมีดคมดาซูหรือยัง ทั้งนี้เพราะยิ่งแอ่งใหญ่ขึ้นเท่าใดไบมีดยังมีความแข็งแรงน้อยลง จนกระทั่งไบมีดอาจหักลงไปได้ กล่าวกันว่า การแตกหักของไบมีด ส่วนมากมักเกิดจากการสึกหรอบนผิวหน้าคานเศษโลหะ แต่การวัดขนาดของแอ่งนั้นอาจทำได้ยาก และรูปร่างของการสึกหรอบนผิวหน้าคานเศษโลหะนี้ไม่แน่นอนจึงเป็นการยากที่จะบ่งบอกลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.22

หลักอีกอย่างหนึ่งที่ใช้เป็นเครื่องวัดว่าไบมีดคมดาซูแล้วคือการที่ไบมีดแตกหักลงไปจริงๆ ซึ่งง่ายต่อการระบุออกว่าเมื่อใดไบมีดคมดาซู แต่การจะให้ไบมีดแตกหักลงไปจริงๆนั้นย่อมเป็นการสิ้นเปลือง ทั้งค่าลับไบมีดใหม่หรือค่าเปลี่ยนไบมีด นอกจากนี้แล้วชิ้นงานอาจจะพลอยถูกทำลายไปด้วย ฉะนั้นเขาจึงมักเปลี่ยนไบมีดหรือลับคมมีดก่อนที่ไบมีด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)

รูปที่ 2.22 (a) Crater wear contour : Carbide P-25

(b) Crater wear contour : HSS

#### 2.1.4 สมการอายุเครื่องมือตัด

อายุเครื่องมือตัดหมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งาน เครื่องมือตัดที่ไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวกัน และในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ เนื่องจากคมตัดเกิดการสึกหรอไปทั้งนี้ไม่รวมไปถึงคมตัดที่เกิดอุบัติเหตุทำให้

เกิดการแตกหักของคมมีด ก่อนเวลาการใช้งานตามปกติ เกณฑ์การตัดสินใจว่าเครื่องมือตัดนั้น หมดอายุการใช้งานแล้วมีดังนี้

2.1.4.1 เมื่อการสึกหรอทางด้านข้างคมตัดเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร เมื่อคมตัดสึกหรออย่าง สม่ำเสมอและ 0.6 มิลลิเมตร เมื่อคมตัดสึกหรอไม่สม่ำเสมอ โดยนับจุดที่สูงที่สุด

2.1.4.2 เมื่อความลึกของการสึกหรอ บนผิวคายเศษโลหะมีค่าเท่ากับ  $0.06 + 0.3 f$  เมื่อ  $f$  เป็นการป้อนต่อรอบ ทั้งนี้เมื่ออัตราส่วนสูงสุดของ มีค่าระหว่าง 0.2 - 0.4 ดังแสดงในรูปที่

2.23



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดค่าอัตราส่วน  $d_s/d_c$

2.1.4.3 เมื่อเกิดการแตกหักของคมตัด

2.1.4.4 เมื่อความเร็วผิวไม่ได้ตามต้องการ

2.1.4.5 เมื่อขนาดเกิดค่าพิถีพิถันเพื่อ

2.1.4.6 เมื่อแรงตัดมีค่ามากเกินไปกำหนด

2.1.4.7 จากปริมาณโลหะที่ตัดได้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของรอยสึกหรอตามข้อ 1

การใช้ขนาดของรอยสึกเป็นตัวตัดสินใจนั้น เป็นค่าโดยทั่วไป ที่ใช้งานกับเครื่องมือตัดทุก ชนิดโดยเฉพาะเครื่องมือตัดที่มีราคาแพง หากยอมให้เกิดการสึกหรอมากเกินไปแล้ว ในการลับ คมตัดจะต้องเสียเนื้อวัสดุไปมากทำให้การลับคมตัดทำได้น้อยครั้งลง ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายของ เครื่องมือตัด สำหรับการตัดสินใจในกรณีอื่นนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ในการตัด เพื่อให้ได้ความเร็วผิวหากเครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอจนไม่สามารถสร้างความเร็วผิวในค่าที่ ต้องการได้ก็จะถือว่าหมดอายุการใช้งาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 การเลือกขนาดสำหรับการตัดละเอียดสำหรับการตัดชนิดต่างๆ

| ขบวนการ  | การเลือกขนาด                    | ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม  |
|----------|---------------------------------|--|
| การกลึง  | 0.1-0.5<br>(เส้นผ่านศูนย์กลาง)  | 1. สำหรับการปาดหน้าและการคว้านควรว<br>ขนาดน้อยกว่าการกลึงนอก<br>2. สำหรับ Spring tool เลือกขนาด 0.04-0.15<br>มิลลิเมตร<br>3. สำหรับ Diamond tool เลือกขนาด 0.05-0.2<br>มิลลิเมตร   |
| การคว้าน | 0.05-0.4<br>(เส้นผ่านศูนย์กลาง) | 1. สำหรับมีดคว้านขนาดเล็กที่อาจเสียหายจาก<br>แรงตัดได้ ควรลดการเลือกขนาดลง<br>2. สำหรับมีดคว้านที่มี 2 ปลาย การเลือกขนาด<br>สามารถทำได้มากกว่าข้อ 1.<br>3. การคว้านที่ใช้มีดคว้าน 2 ด้าน ใช้การเลือก<br>ขนาด 0.1-0.15 มิลลิเมตร      |
| การกัด   | 0.1-0.3                         | 1. เมื่อใช้ เอนมิ ล ใช้ การเลือกขนาด 0.05<br>มิลลิเมตรในบางกรณี<br>2. ในการตัดขึ้น (Upward cut ) บางครั้งอาจ<br>เกิดการไถลจากจุดเริ่มต้นทำให้ไม่ได้ความลึก<br>ในการตัดที่ต้องการ<br>3. สำหรับการปาดหน้าให้ใช้การเลือกขนาดมาก<br>ขึ้น |
| การไสยาว | 0.2-0.5                         | เมื่อใช้เครื่องมือตัดแบบ Square nose ให้ใช้<br>การเลือกขนาด 0.03-0.1 มิลลิเมตร   |
| การไส    | 0.1-0.25                        | เมื่อใช้เครื่องมือตัดแบบ Square nose ให้ใช้<br>การเลือกขนาด 0.05-0.1 มิลลิเมตร   |

อายุเครื่องมือตัดจะยาวหรือสั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือ ความเร็วตัด การป้อน และ ความลึกในการตัด ตัวแปรสองตัวหลังมีผลต่ออายุเครื่องมือตัดน้อยกว่าความเร็วตัด ดังนั้นในการเลือกใช้งานแล้วจึงต้องเลือกค่าความลึกในการตัดและการป้อนให้เป็นค่ามากที่สุดเท่าที่จะรับได้ ของเครื่องมือตัดนั้นเพื่อประหยัดเวลา ( ในการตัดหยาบ ) ส่วนในการตัดละเอียดควรเลือกค่าความลึกในการตัดให้เหมาะสม ( อ้างอิงตารางที่ 2.4 ) ส่วนการป้อนต้องเลือกให้เกิดความเรียบผิวที่

ต้องการ จากการศึกษาที่ความเร็วตัดมีผลอย่างมากต่ออายุเครื่องมือตัด จากการทดลองพบว่ามีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$VT^n = C$$

โดยที่ T = อายุเครื่องมือตัด (นาที)

V = ความเร็วตัด (เมตร / นาที)

n, C = ค่าคงที่

จากสมการข้างต้น หากต้องการทดลองเพื่อทราบค่าคงที่ในสมการแล้วจะต้องกำหนดค่าความลึกในการตัดและการป้อน ซึ่งตามมาตรฐาน JIS B-4011 (Method of cutting experiments for cemented carbide tool) และ JIS B-4012 (Method of cutting experiments for tool steel and high tool steel) ได้กำหนดการเลือกใช้ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 JIS B-4011

| ความลึกในการตัด ( มม.) | การป้อน ( มม. / รอบ) | พื้นที่ตัด ( มม <sup>2</sup> ) | การตัด  |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|---------|
| 0.3                    | 0.05                 | 0.015                          | ตัดเบา  |
| 1.0                    | 0.25                 | 0.25                           |         |
| 2.0                    | 0.30                 | 0.60                           |         |
| 3.0                    | 0.50                 | 1.5                            | ปานกลาง |
| 5.0                    | 0.75                 | 3.75                           | ตัดหนัก |
| 6.0                    | 0.75 - 1.25          | 4.5 - 7.5                      |         |

ตารางที่ 2.6 JIS B-4012

| ความลึกในการตัด (มม.) | การป้อน (มม./รอบ) | พื้นที่ตัด (มม <sup>2</sup> ) | การตัด  |
|-----------------------|-------------------|-------------------------------|---------|
| 0.2<br>2.0            | 0.35<br>0.30      | 0.01<br>0.60                  | ตัดเบา  |
| 3.0<br>2.0            | 0.5<br>0.3        | 1.5<br>1.5                    | ปานกลาง |
| 6.0                   | 0.8 - 1.2         | 4.8 - 7.2                     | ตัดหนัก |

ข้อสังเกตสำหรับสมการอายุเครื่องมือตัด

ข้อที่ 1 สมการอายุเครื่องมือตัดของเทย์เลอร์ ใช้ได้ดีกับกรณีที่ไม่เกิดผลจากการป้อนโลหะชิ้นงานที่ต่างกันจะมีดัชนี ( $n$ ) ที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงช่วงดัชนีอายุเครื่องมือตัด

| วัสดุของเครื่องมือตัด    | ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของ $n$ |
|--------------------------|------------------------------|
| เหล็กกล้ารอบสูง          | 0.08-0.2                     |
| ซีเมนต์คาร์ไบด์          | 0.2-0.49                     |
| เซรามิก (ซีเมนต์ออกไซด์) | 0.48-0.7                     |

เมื่อกำหนดให้ดัชนีมีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่าความเร็วตัดและอายุเครื่องมือตัดจะแปรผันในเชิงเส้นตรง ดังนั้นเครื่องมือตัดที่มีคุณภาพสูงจึงควรมีดัชนีอายุเครื่องมือตัดใกล้ 1 มากที่สุด จึงสามารถเรียงลำดับคุณภาพของเครื่องมือตัดในตารางที่ 2.7 ได้คือ เซรามิก คาร์ไบด์ และเหล็กกล้ารอบสูงตามลำดับ

ข้อที่ 2 ผลการทดลองหาค่าคงที่อายุเครื่องมือตัด ตามสภาวะการตัดต่างๆโดยใช้วัสดุต่างชนิดกันได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.8 ค่าที่มากกว่าหมายถึงอายุเครื่องมือตัดที่นานกว่า



ข้อที่ 3 แม้ว่าการทำงานเพื่อหาสมการอายุเครื่องมือตัดจะใช้สภาวะต่างเหมือนอย่างที่สุด พบว่าค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งจะมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่บ้าง เนื่องจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุเครื่องมือตัดแต่ละชิ้น วัสดุชิ้นงาน หรืออาจจะเป็นเพราะการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นที่ต่างกันออกไป

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบแมชชีนอภิติของวัสดุบางชนิด

| วัสดุ                | % ความสามารถในการกลึง (แมชชีนอภิติ %) |
|----------------------|---------------------------------------|
| AISI 1020            | 60                                    |
| AISI 1212            | 100(ref)                              |
| AISI 1330            | 60                                    |
| AISI 3250            | 45                                    |
| AISI 4130            | 65                                    |
| AISI 4340            | 45                                    |
| AISI 6130            | 55                                    |
| AISI 8630            | 60                                    |
| Cast Iron ( Soft )   | 60                                    |
| Cast Iron ( Hard )   | 20                                    |
| Grey Cast Iron       | 70                                    |
| Stainless Steel 301  | 55                                    |
| Stainless Steel 310  | 30                                    |
| Aluminium 108 Cast   | 145                                   |
| Aluminium 218-T Cast | 250                                   |
| Aluminium 2011 Wroug | 200                                   |

### 2.1.5 เหล็กหล่อ ( Cast Iron )

เหล็กหล่อที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้าจะมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ในช่วง 2.5 - 4 % นอกจากคาร์บอนแล้วในเหล็กหล่อยังมีธาตุผสมอื่นๆ อีก คือ ซิลิกอน 1.0 - 3.0 % แมงกานีส 0.4 - 1.0 % กำมะถัน 0.1 - 0.35 % ฟอสฟอรัส 0.5 - 1.0 % ซึ่งในเหล็กกล้าก็มีธาตุทั้ง 4 ชนิดนี้ผสมอยู่เช่นกัน

แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ผลของปริมาณคาร์บอนจำนวนมากที่ละลายปนอยู่ ทำให้เหล็กหล่อเปราะ

เหล็กหล่อมีความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ต่ำมากจึงไม่สามารถนำไปมีวน คึงยึด หรือปฏิบัติการทางกลอื่นๆที่อุณหภูมิห้อง เหล็กหล่อส่วนใหญ่ขาดความอ่อนตัว (Malleable) ไม่ ว่าที่อุณหภูมิใด ก่อนมันจะหลอมละลาย อย่างไรก็ตามเหล็กหล่อในสภาพของเหลว นั้นเหล็กจะมีความเหลวสูง สามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ดีจึงสามารถหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ซับซ้อนพิสดารแบบใดก็ได้แต่สุดท้ายต้องนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักรเพื่อให้ได้มิติตามต้องการก่อนนำไปใช้งาน ด้วยเหตุที่กรรมวิธีการหล่อเป็นขบวนการทางโลหะวิทยาประเภทเดียวที่สามารถกระทำกับเหล็กได้ดีจึงให้ชื่อโลหะผสมชนิดนี้ว่า "เหล็กหล่อ" (Cast - Iron) เหล็กหล่อทั่วไปจะมีความเปราะ มีความแข็งแรงต่ำกว่าเหล็กกล้าแทบทุกเกรด แต่มีราคาถูกกว่าชิ้นงานหล่อรูปพรรณ สามารถออกแบบให้ซับซ้อนได้มากกว่า และยังมีคุณสมบัติข้อดีอื่นๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป ถ้ามีการเติมธาตุผสมที่ถูกต้อง ควบคุมการหล่อให้รัดกุม ปฏิบัติการทางความร้อนด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสมจะสามารถสร้างผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปในช่วงกว้าง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อให้สูงขึ้น สามารถผลิตเหล็กหล่อจำนวนมากๆที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งแห่งหรือแตกต่างกันออกไปเป็นส่วนๆตามจุดประสงค์การใช้งาน

#### ชนิดของเหล็กหล่อ

วิธีการที่ดีที่สุดในการจัดแบ่งชนิดของเหล็กหล่อ คือ จัดแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาโดยพิจารณาถึงตัวแปร 4 ประการ ที่คอยควบคุมคุณสมบัติของเหล็กหล่ออันได้แก่

ตัวแปรที่ 1 ปริมาณธาตุคาร์บอนที่เข้าผสม

ตัวแปรที่ 2 ปริมาณโลหะผสมอื่นและสารเจือปน

ตัวแปรที่ 3 อัตราการเย็นตัวทั้งก่อนและหลังการแข็งตัวแล้ว

ตัวแปรที่ 4 การอบชุบด้วยความร้อนภายหลังการหล่อ

ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมโครงสร้างทางกายภาพของคาร์บอนที่เข้าผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก คาร์บอนอาจปรากฏอยู่ในรูปเหล็กคาร์ไบด์ ในรูปซิเมนไตท์หรือปรากฏอยู่ในรูปของคาร์บอนอิสระในรูปกราฟไฟต์รูปร่างและลักษณะการกระจายของอนุภาคคาร์บอนอิสระมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กหล่อโดยรวมเป็นอย่างมาก เราสามารถจัดแบ่งเหล็กหล่อออกได้เป็น 6 ชนิดดังนี้

2.1.5.1 เหล็กหล่อสีขาว (White Cast Irons) ในเหล็กหล่อแบบนี้คาร์บอนรวมตัวอยู่กับเนื้อเหล็กในลักษณะของสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ ซึ่งมีชื่อทางโลหะวิทยาว่า "ซิเมนไตท์"

2.1.5.2 เหล็กหล่อเหนียว (Malleable Cast Irons) เป็นเหล็กหล่อชนิดที่คาร์บอนละลายตัวออกจากโครงสร้างซีเมนไตท์ไปเป็นรูปผลึกมีคกลมที่เรียกว่า "Temper Carbon" ภายหลังจากผ่านการอบชุบเหล็กหล่อสีขาวในบรรยากาศพิเศษ

2.1.5.3 เหล็กหล่อสีเทา (Grey Cast Irons) คาร์บอนที่ปรากฏในเหล็กหล่อสีเทา จะอยู่ในรูปคาร์บอนอิสระที่เรียกว่า กราไฟต์เกล็ด (Graphite flakes)

2.1.5.4 เหล็กหล่อผิวแข็ง (Chilled Cast Irons) คือเหล็กหล่อสีขาวซึ่งบริเวณผิวกระทำปฏิกิริยากับเนื้อในซึ่งเป็นเหล็กสีเทา ทำให้เกิดเป็นเปลือกแข็งห่อหุ้ม

2.1.5.5 เหล็กหล่อกราไฟต์คกลม (Nodular Cast Irons) คือเหล็กหล่อสีเทาที่เติมธาตุผสม เช่น แมกนีเซียมลงไปในส่วนเหล็กเหลว ทำให้กราไฟต์คกลมเปลี่ยนเป็นมีคกลมเล็กๆ กระจายตัวอยู่ทั่วไป โครงสร้างแบบนี้แตกต่างจากเหล็กหล่อเหนียวตรงที่มีคกลม ของกราไฟต์ที่ได้ เกิดจากการแข็งตัวโดยตรงของน้ำเหล็กและมีคกราไฟต์มีลักษณะกลมสมบูรณ์กว่ากัน

2.1.5.6 เหล็กหล่อโลหะผสม (Alloy Cast Irons) คือเหล็กหล่อใดๆ ใน 5 แบบที่กล่าวถึงมาแล้วแต่มีการเติมธาตุอื่นลงไปผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษเฉพาะอย่าง เช่น ความต้านทานการสึกหรอ การกัดกร่อน การทนความร้อน เป็นต้น

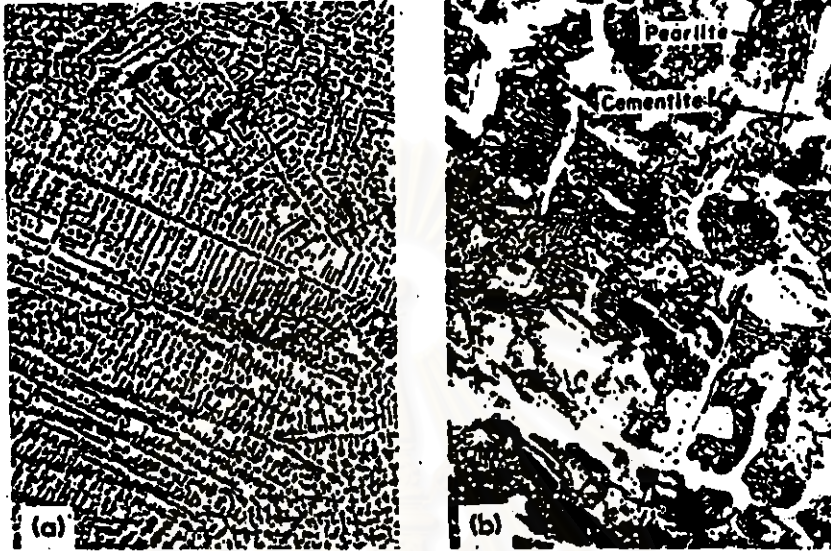
#### เหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Irons)

คือ เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมในช่วง 2.5 - 4.0 % เป็นกลุ่มเหล็กที่ถูกนำมาใช้ทางในทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ในการผลิตเหล็กหล่อสีเทาจะต้องทำการควบคุมส่วนผสมของธาตุผสมสำคัญและอัตราการเย็นตัวเพื่อให้คาร์บอนในโครงสร้างซีเมนไตท์คกลมเป็นกราไฟต์เกล็ด (Flake Type Graphite) เป็นอสเทนไนท์หรือเป็นเฟอร์ไรท์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้ง 3 อย่าง

พิจารณาการเย็นตัวของน้ำเหล็กในบริเวณไฮโปยูเทคคอย การแข็งตัวขั้นแรกจะเกิดโครงสร้างอสเทนไนท์ สารประกอบคาร์บอนที่ปรากฏครั้งแรกจะอยู่ในรูปซีเมนไตท์ ซึ่งได้จากปฏิกิริยาอุทกคติที่อุณหภูมิ 2065° F เราสามารถบังคับให้เกิดกราไฟต์ได้มากขึ้น โดยการยกอุณหภูมิให้สูงขึ้น เติมคาร์บอนและเติมสารช่วยเร่งปริมาณกราไฟต์ เช่น พวกซิลิกอนลงไป

ผลจากการทดลองพบว่า ถ้าเราสามารถควบคุมองค์ประกอบ 3 อย่างข้างบนได้อย่างเหมาะสม น้ำโลหะจะเย็นตัวอย่างมีเสถียรภาพตามแผนภาพอุณหภูมิของเหล็กกราไฟต์ ดังรูปที่ 2.24 เกิดของผสมยูเทคติกระหว่างอสเทนไนท์กับกราไฟต์ที่อุณหภูมิ 2075° F โครงสร้างซีเมนไตท์ซึ่งก่อตัวขึ้นครั้งแรกจะละลายตัวเป็นกราไฟต์อย่างรวดเร็ว กราไฟต์ที่เกิดจะมีรูปร่างหลายแบบ อาจมีรูปร่าง เป็นแผ่นโค้งคล้ายกลีบกุหลาบ ซึ่งเมื่อหักจะมองเห็นเนื้อโลหะสีเทาหรือสีค่อนข้างดำ ดังรูปที่ 2.25 จึงได้ชื่อว่า "เหล็กหล่อสีเทา" จริงๆ แล้วอนุภาคกราไฟต์นั้นมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ เป็นแผ่นโค้งบางๆ บางครั้งเป็นแผ่นอิสระ บางครั้งเชื่อมต่อกันคล้ายดอกกุหลาบ ดังรูปที่ 2.26

ในระหว่างที่น้ำเหล็กเย็นตัวต่อมา คาร์บอนก็ยังคงสลายตัวออกมาเนื่องจากความสามารถในการละลายได้ของคาร์บอนในโครงสร้างออสเทนไนท์ลดลง คาร์บอนพวกนี้จะตกผลึกเป็นกราไฟต์หรือก่อตัวใหม่เป็นโปรตุเกคคอยซิเมนไคท์ ซึ่งพร้อมที่จะสลายเป็นกราไฟต์ต่อไป



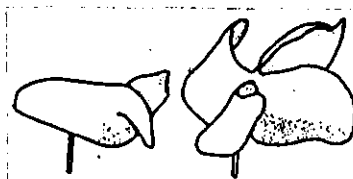
รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีขาว

(a) บริเวณรอยดำๆ คือ เซนไคท์ ที่ก่อตัวขึ้นต้นของออสเทนไนท์ เปลี่ยนรูป (เฟอไรต์) ซึ่งปรากฏอยู่ในโครงสร้างพื้นสีขาว ซึ่งเป็นโครงข่ายคาร์ไบด์ ภาพนี้ขยาย 20 เท่า

(b) เป็นภาพเดียวกับ(a) แต่ขยาย 250 เท่า จะเห็นเฟอไรต์สีดำ เซนไคท์สีขาว



รูปที่ 2.25 แสดงรูปร่างของเกล็ดกราไฟต์ในเหล็กหล่อสีขาวเมื่อขยาย 100 เท่า

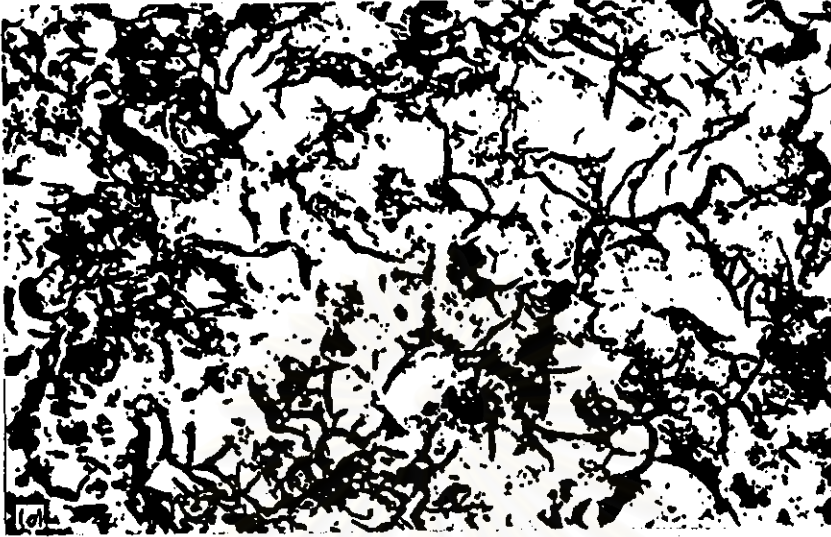


รูปที่ 2.26 แสดงหุ่นจำลองสามมิติของเกล็ดกราไฟต์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกลีบกุหลาบ

ความแข็งแรงของเหล็กหล่อตีเทาชี้ขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างพื้นที่กราไฟต์ฝังตัวอยู่ โครงสร้างพื้นส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาธาตุเทคคอตได้ซิเมนไคท์ออกมา ถ้าสัดส่วนผสมและอัตราเย็นตัวเหมาะสม ก็ให้โครงสร้างซิเมนไคท์กลายเป็นกราไฟต์ โครงสร้างพื้นทั้งหมดจะเป็นเพียไลต์หรือซูดได้อีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าไม่มีการก่อตัวเป็นกราไฟต์จากธาตุเทคคอตซิเมนไคท์ โครงสร้างพื้นทั้งหมดจะเป็นเพียไลต์ ด้วยเหตุดังกล่าวโครงสร้างพื้นที่เป็นไปได้จึงเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างเป็นเพียไลต์ทั้งหมด เป็นโครงสร้างผสมระหว่างเพียไลต์กับเฟอร์ไรต์ด้วยสัดส่วนต่างๆกัน จนกระทั่งเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมด โครงสร้างผสมระหว่างกราไฟต์ - เพียไลต์ เป็นโครงสร้างที่อ่อนและอ่อนแอที่สุดในบรรดาเหล็กหล่อตีเทาดังกล่าว ความแข็งและความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารประกอบคาร์บอนที่ปรากฏอยู่ ซึ่งเหล็กจะมีค่าความแข็งและความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเหล็กหล่อตีเทานั้นมีโครงสร้างเพียไลต์ปรากฏอยู่มากที่สุด ในรูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นโครงสร้างจุลภาพของเหล็กหล่อตีเทา ซึ่งมีโครงสร้างพื้นทั้งหมดเป็นเพียไลต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



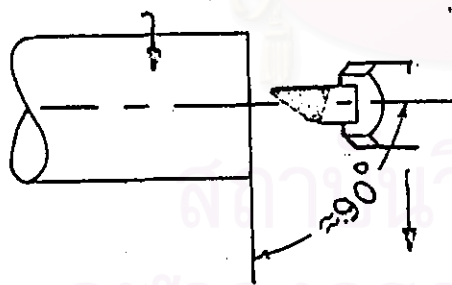
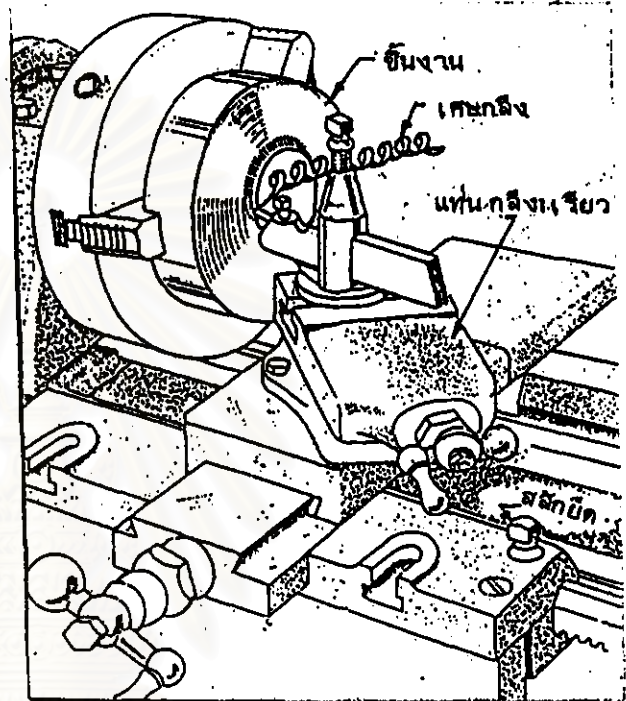
(b)

รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา จะมองเห็นเกิดกราฟไฟต์แทรกอยู่ทั่วไปในโครงสร้างพื้นเพอไรต์ โดยมีเม็ดกราฟไฟต์อิสระกระจายตัวอยู่ทั่วไป ภาพ (a) ขยาย 100 เท่า ส่วนภาพ (b) ขยาย 500 เท่า

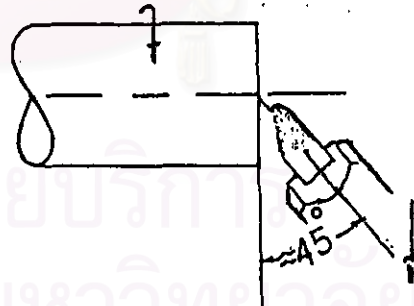
## 2.1.6 การกลึงปากหน้า

คือวิธีการทำให้ผิวด้านหน้าตัดของชิ้นงานถูกกลึงปากให้เรียบร้อย โดยป้อนมีดกลึงตั้งฉากหรือทำมุม 45 องศากับแนวแกนของชิ้นงาน ความต้องการในการกลึงปากหน้าเพื่อ ทำให้พื้นผิวหน้าตัดเรียบ ทำให้ขนาดของชิ้นงานยาวตามกำหนด และเพื่อให้เป็นขอบมาตรฐานเพื่อวัดความยาวไปยังตำแหน่งอื่นๆ

รูปที่ 2.28 การกลึงปากหน้า



ตั้งมีดกลึง 90 องศาผิวที่ได้  
มีความเรียบน้อย



ตั้งมีดกลึง 45 องศาผิวที่ได้  
มีความเรียบมาก

รูปที่ 2.29 วิธีตั้งมีดกลึงปากหน้า 2 แบบ

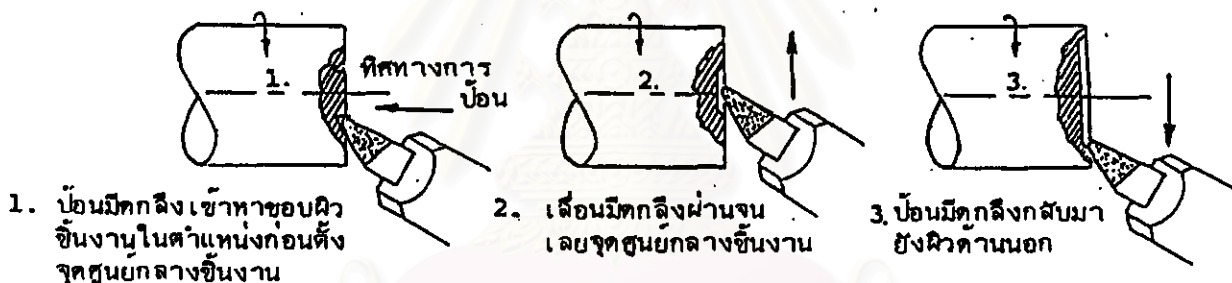
การกรัดปาดหน้าบนผิวชิ้นงาน ความเร็วจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ มุมคมตัดของมีดถึง การตั้งมุมมีดและอัตราการเคลื่อนที่ของมีดถึง มีดถึงเคลื่อนที่ช้าผิวจะเร็วกว่าการเคลื่อนที่เร็ว หรือป้อนมีดเคลื่อนที่ด้วยมือหมุนจะได้ผิวเรียบเนียนกว่าการป้อนตัดอัตโนมัติ

การกรัดปาดผิวหน้าตัดของชิ้นงาน มีดถึงถูกป้อนเข้าหาชิ้นงานได้ 2 วิธี

2.1.6.1 เคลื่อนมีดถึงจากใกล้จุดศูนย์กลางออกไปยังผิวด้านนอก เป็นวิธีการกรัดที่ถูกต้อง เนื่องจากขอบคมของมุมตัดมีดถึงตัดเฉือนผิวของวัสดุได้เต็มที่ ถ้าดัชนีชิ้นในการกรัดรูปประกอบที่ 2.30

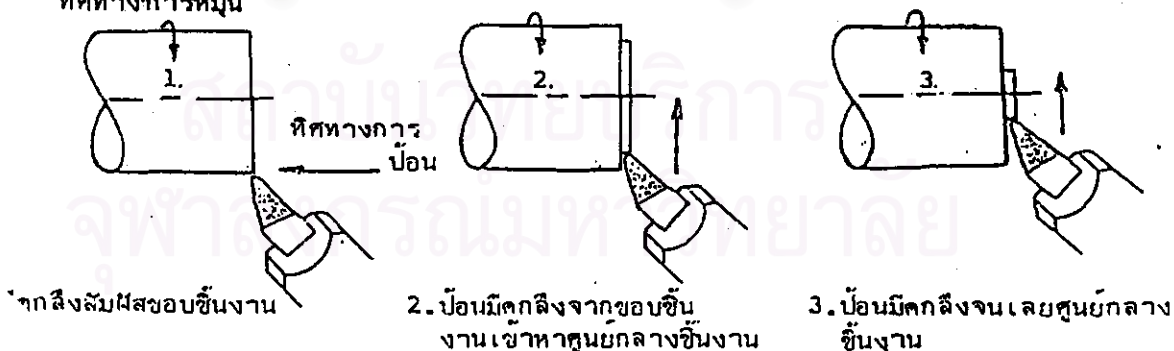
2.1.6.2 เคลื่อนมีดถึงจากผิวด้านนอกเข้าหาจุดศูนย์กลาง เป็นวิธีการกรัดอีกอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ต่อเนื่องกับการกรัดวิธีแรก คือเมื่อความยาวที่โค้งการยังไม่ได้ตามกำหนดเพื่อไม่ให้เสียเวลาในการป้อนมีดถึงกลับในตำแหน่งใกล้จุดศูนย์กลางเดิม ใช้วิธีเคลื่อนมีดถึงป้อนตัดจากผิวภายนอกเข้าหาจุดศูนย์กลาง แต่การกรัดวิธีนี้ไม่ถูกต้องนักเพราะคมที่ตัดเฉือนเป็นมุมหลบหลังซึ่งไม่ใช่มุมตัดที่แท้จริง ถ้าดัชนีชิ้นในการกรัดรูปประกอบที่ 2.31

ทิศทางการหมุน



รูปที่ 2.30 วิธีการปาดหน้าแบบเคลื่อนมีดถึงออกจากจุดศูนย์กลางชิ้นงาน

ทิศทางการหมุน



รูปที่ 2.31 วิธีการปาดหน้าแบบเคลื่อนมีดถึงเข้าหาจุดศูนย์กลางกลางชิ้นงาน

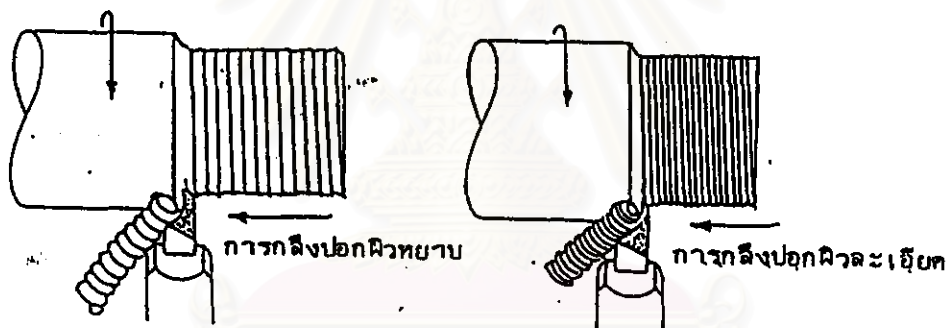


### 2.1.7 การกลึงปอกผิว

คือวิธีการทำให้ขนาดของชิ้นงานเล็กลง และทำให้พื้นผิวเรียบตามความต้องการ ในขั้นแรกชิ้นงานถูกจับยึดด้วยหน้างานที่พร้อม หรือพื้นอิสระแล้วหมุนรอบตัวเอง ส่วนมีดกลึงถูกจับแน่นอยู่บนแท่นมีด และเคลื่อนที่ตัดผิวขนานไปกับจุดศูนย์กลางชิ้นงานทำให้ขนาดชิ้นงานเล็กลงตามความต้องการ วิธีการกลึงปอกผิวมี 2 อย่างคือ

2.1.7.1 กลึงปอกผิวหยาบ คือการกลึงผิวชิ้นงานออกอย่างรวดเร็ว แต่พื้นผิวที่ได้มีความหยาบขรุขระ และมีมีดกลึงที่รวมทั้งชิ้นงานส่วนเร็ว ตัวอย่างการกลึงปอกผิวหยาบ .022 - .042 มม. / รอบ

2.1.7.2 กลึงปอกผิวละเอียด คือการกลึงผิวชิ้นงานออกครั้งละเล็กน้อย พื้นผิวที่ได้มีความละเอียดสวยงาม แต่ชิ้นงานส่วนเร็วช้าลง ตัวอย่างการกลึงปอกผิวละเอียด .003 - .006 มม. / รอบ



รูปที่ 2.32 วิธีการกลึงปอกผิว

2.1.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) คือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรผัน (Variation) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน (Montgomery, 1991)

ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูลอาจเขียนเป็นสมการได้เป็น

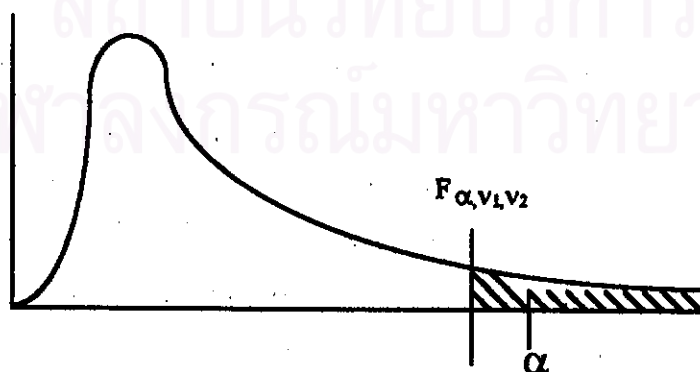
ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้น ไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติหรือที่เรียกว่า ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งเป็นข้อมูลที่เรารวบรวมหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่มีค่าเดียว แต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลอง (Treatment) กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ตัวแปรต่างๆ เพื่อหาค่าตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองจึงมักจะต้องการทำการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย ถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเจาะจง (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าการเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวม (In general) ของปัจจัย

หลักการทำ ANOVA เป็นการวัดความแปรปรวนมาวิเคราะห์ซึ่ง R.A. Fisher ได้ทำการวิเคราะห์ที่ความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของค่าความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย จากนั้นนำความแตกต่างย่อยนั้นมาเปรียบเทียบกับความแตกต่างใดมีค่ามากแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ข้อดีของการใช้ ANOVA เป็นการแก้ปัญหาการเพิ่มของ  $\alpha$  (Inflated risk)

ซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อกระบวนการนั้น อยู่ที่  $F_0$  ว่าตกอยู่ในพื้นที่แรงแจหรือไม่ หากตกอยู่ในพื้นที่แรงแจแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟการกระจายของ Fisher

### 2.1.8.1 รูปแบบการทดลอง

ในกรณี Single Factor มีรูปแบบการทดลอง

1. Complete Randomized Design (CRD) เหมาะสำหรับที่จะใช้กับ Uncontrollable Factor ที่มีขนาดไม่โตนัก และไม่มี noise factor การทดลองจะยึดหลักการทำแบบสุ่ม และการทำซ้ำ

2. Randomized Block Design (RBD) ต้องมีการทำสุ่มทุกครั้งทำซ้ำทุกการทดลอง และมีการทำบล็อก (blocking)

3. Latin Square Design (LSD)

ในกรณี Multi Factor มีรูปแบบการทดลอง

1. General Factorial ซึ่งใช้กับการทดลองที่มี 2 ปัจจัยขึ้นไป จึงทำให้เกิดผลของอิทธิพลร่วม (interaction effect) และอิทธิพลหลัก (main effect) ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยร่วมคือผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนไปแล้วทำให้อิทธิพล(effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย

2. Fractional Factorial Design

### 2.1.8.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจาก 2 ปัจจัย (Two Factors ANOVA)

สมมติว่ามีปัจจัยที่เราคาดว่าจะเป็นตัวเหตุของความแปรผันของข้อมูลอยู่ 2 ปัจจัย และการอยู่ร่วมกันของปัจจัยทั้งสองที่เวลาเดียวกันก็จะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลด้วย สมมติให้ปัจจัยทั้งสองคือ ปัจจัย A ซึ่งมี a ระดับและปัจจัย B ซึ่งมี b ระดับ เราอาจจัดเรียงตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองดังนี้

|   |   | B        |          |          |   |   |   |   |          |
|---|---|----------|----------|----------|---|---|---|---|----------|
|   |   | 1        | 2        | 3        | . | . | . | b |          |
| A | 1 |          |          |          |   |   |   |   | $A_{1.}$ |
|   | 2 |          |          |          |   |   |   |   | $A_{2.}$ |
|   | 3 |          |          |          |   |   |   |   | $A_{3.}$ |
|   | . |          |          |          |   |   |   |   | .        |
|   | . |          |          |          |   |   |   |   | .        |
|   | . |          |          |          |   |   |   |   | .        |
| a |   |          |          |          |   |   |   |   | $A_{.}$  |
|   |   | $B_{.1}$ | $B_{.2}$ | $B_{.3}$ | . | . | . | . | $B_{.b}$ |

โดยที่  $A_i =$  ผลบวกในแนวนอนแถวที่  $i = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk}$   
 $B_j =$  ผลบวกในแนวตั้งแถวที่  $j = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n X_{ijk}$   
ให้  $\bar{x}_{i.} =$  ค่าเฉลี่ยของแถวที่  $i$  ในแนวนอน  $= A_i/bn$   
 $\bar{x}_{.j} =$  ค่าเฉลี่ยของแถวที่  $j$  ในแนวตั้ง  $= B_j/an$   
 $\bar{x}_{ij} =$  ค่าเฉลี่ยในช่องที่ตัดกันระหว่างระดับ  $i$  กับ  $j = \sum_{k=1}^n X_{ijk}/n$   
 $\bar{x}_{...} =$  ค่าเฉลี่ยทั้งหมด  $= \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}/abn$

เนื่องจากความแปรผันของตัวแปรตาม  $X_{ijk}$  , เนื่องจาก 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมของปัจจัย เราอาจจะเขียนสมการแสดงความแปรผันของตัวแปรตามได้ดังนี้

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

โดยที่  $\alpha_i =$  อิทธิพลของปัจจัย A  
 $\beta_j =$  อิทธิพลของปัจจัย B  
 $(\alpha\beta)_{ij} =$  อิทธิพลร่วมของปัจจัย AB

สมมติฐานหลักที่จะทดสอบคือ

$$H_0: \alpha_i = 0 \quad \text{สำหรับทุก } i$$

$$H_0: \beta_j = 0 \quad \text{สำหรับทุก } j$$

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } i \text{ และ } j$$

โดยการจัดสรรค่าความแปรผันของตัวแปรตาม ตามหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน เราจะได้สมการผลบวกกำลังสองทั้งหมด,  $SS_T$  ดังนี้

$$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 = nb \sum_i (\bar{x}_{i.} - \bar{x}_{...})^2 + na \sum_j (\bar{x}_{.j} - \bar{x}_{...})^2$$

$$+ n \sum_i \sum_j (X_{ij.} - \bar{x}_{i.} - \bar{x}_{.j} + \bar{x}_{...})^2 + \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2$$

$$= SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$

จากการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็น จะได้

$$SS_A/\sigma^2 \sim \chi^2_{a-1} \quad \text{เมื่อ } H_0: \alpha_i = 0 \quad \text{เป็นจริง}$$

$$SS_B/\sigma^2 \sim \chi^2_{b-1} \quad \text{เมื่อ } H_0: \beta_j = 0 \quad \text{เป็นจริง}$$

$$SS_{AB}/\sigma^2 \sim \chi^2_{(a-1)(b-1)} \quad \text{เมื่อ } H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{เป็นจริง}$$

$$SS_E/\sigma^2 \sim \chi^2_{ab(a-1)}$$

หาค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง จะได้

$$MS_A = SS_A / (a-1)$$

$$MS_B = SS_B / (b-1)$$

$$MS_{AB} = SS_{AB} / (a-1)(b-1)$$

$$MS_E = SS_E / ab(n-1)$$

$$E(MS_E) = \sigma^2$$

ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สรุปได้ดังนี้

| แหล่งความแปรผัน    | ดีกรีของความอิสระ | ผลบวกกำลังสอง | ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง | $F_0$            |
|--------------------|-------------------|---------------|------------------------|------------------|
| ปัจจัย A           | a-1               | $SS_A$        | $MS_A$                 | $MS_A / MS_E$    |
| ปัจจัย B           | b-1               | $SS_B$        | $MS_B$                 | $MS_B / MS_E$    |
| ปัจจัย AB          | (a-1)(b-1)        | $SS_{AB}$     | $MS_{AB}$              | $MS_{AB} / MS_E$ |
| ความผิดพลาดแบบสุ่ม | ab(n-1)           | $SS_E$        | $MS_E$                 |                  |
| รวม                | abn - 1           | $SS_T$        |                        |                  |

|        |                               |     |  |
|--------|-------------------------------|-----|--|
| ยอมรับ | $H_0: \alpha_i = 0$           | ถ้า | $MS_A / MS_E < F_{\alpha, (a-1), ab(n-1)}$         |
| ยอมรับ | $H_0: \beta_j = 0$            | ถ้า | $MS_B / MS_E < F_{\alpha, (b-1), ab(n-1)}$         |
| ยอมรับ | $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ | ถ้า | $MS_{AB} / MS_E < F_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)}$ |

การคำนวณผลบวกกำลังสองอาจจะทำได้ง่ายขึ้นเมื่อใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}^2 - (\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk})^2 / nab$$

$$SS_A = \sum_i (\sum_j \sum_k X_{ijk})^2 / nb - (\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk})^2 / nab$$

$$SS_B = \sum_j (\sum_i \sum_k X_{ijk})^2 / na - (\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk})^2 / nab$$

$$SS_{AB} = \sum_i \sum_j (\sum_k X_{ijk})^2 / n - (\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk})^2 / nab$$

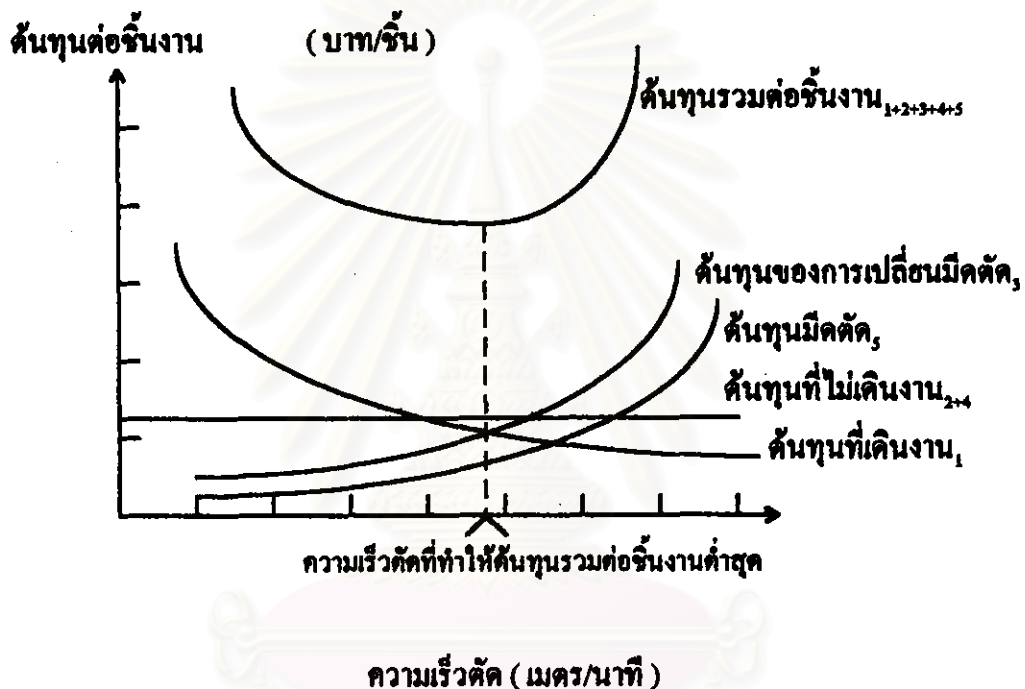
$$SS_{AB} = SS_T - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB}$$

### 2.1.9 เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการทางเครื่องจักรกล (Juneja and Sekhon, 1987)

ในการปฏิบัติการทางวิศวกรรมใดๆ เศรษฐศาสตร์หรือต้นทุนการปฏิบัติงานมีบทบาทสำคัญในการกำหนดอัตราหรือความเร็วในการปฏิบัติงาน ในการตัดโลหะก็เช่นกันขึ้นราคาตัด

วัสดุที่ไม่ต้องการ  $\omega$  ความเร็วที่ช้ามาก เวลาทั้งหมดในการปฏิบัติงานจะเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าเราไม่ได้ตัดแล้ว ต้นทุนแรงงาน ต้นทุนในการปฏิบัติงาน และค่าหุ้ยในการผลิตก็จะเพิ่มขึ้นและทำให้การปฏิบัติงานนั้นสิ้นเปลือง ถ้าการปฏิบัติงานเดียวกันนี้ถูกทำที่ความเร็วสูงมาก ความสึกหรอของเครื่องมือตัดจะถูกเร่ง ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเครื่องมือตัดบ่อยขึ้น ดังนั้นจึงต้องเจียรไนหรือลับเครื่องมือใหม่อีกครั้งและติดตั้งเครื่องมือบนเครื่องจักรบ่อย ผลกระทบของความเร็วที่มีต่อต้นทุนต่างๆแสดงในรูปที่ 2.34 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\omega$  ความเร็วบางความเร็วเท่านั้นการปฏิบัติงานจะประหยัดที่สุด



รูปที่ 2.34 แสดงผลกระทบของความเร็วที่มีต่อต้นทุนต่างๆ

ในส่วนนี้เราจะวิเคราะห์ต้นทุนต่างๆในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องจักรกล

#### 2.1.9.1 ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานทางเครื่องจักรกล

นอกเหนือไปจากต้นทุนของวัสดุที่ต้องใช้แล้ว ต้นทุนอื่นๆมีดังนี้

1. ต้นทุนแรงงานซึ่งถูกกำหนดในอัตราต่อหน่วยของเวลาในการที่แรงงานถูกใช้ไป
2. ต้นทุนการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องจักรกล ซึ่งรวมถึงดอกเบี้ยของราคาค่าเครื่องจักร ค่าเสื่อมราคา ค่าตั้งที่ใช้ได้ และต้นทุนการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพใช้งาน
3. ค่าโตะหุ้ย ซึ่งรวมถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการก่อตั้ง ซึ่งรวมถึงค่าอาคาร ที่ดิน ค่าใช้จ่ายในสำนักงานเช่า เงินเดือน

4. ต้นทุนการจัดการเกี่ยวกับงาน ต้นทุนชนิดนี้เกิดขึ้นเพราะว่าในระหว่างการทำงานนั้น เครื่องจักรจะถูกทิ้งไว้เปล่าๆ ไม่ได้ใช้ประโยชน์อะไรและต้องการแรงงาน ในบางกรณีเครื่องมือแบบพิเศษจะถูกนำมาใช้ด้วย

5. ต้นทุนของเครื่องมือซึ่งอาจรวมถึงต้นทุนของวัสดุของเครื่องจักรและต้นทุนในการลับเครื่องมือให้คมหลายๆ ครั้ง

### 2.1.9.2 สมการค่าใช้จ่ายในการกึ่งชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์

ต้นทุนในการกึ่งชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์คือชิ้นมาจาก

1. ต้นทุนขณะเดินเครื่องจักร เท่ากับ เวลาที่ใช้ในการกึ่งต่อชิ้นงาน ( $T_m$ ) \* ค่าแรงพนักงานบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงาน ( $R_m$ )
2. ต้นทุนรอเดินเครื่องจักร เท่ากับ เวลาที่หีบชิ้นงานใส่เครื่องบวกเวลาที่หีบชิ้นงานออกจากเครื่อง ( $T_i$ ) \* ค่าแรงพนักงานบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงานรอเดินเครื่องจักร ( $R_m$ )
3. ต้นทุนในการเปลี่ยนมีดตัด เท่ากับ เวลาถอดเปลี่ยนเครื่องมือตัด ( $T_c$ ) \* ค่าแรงพนักงานบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงานในการเปลี่ยนมีดตัด ( $R_m$ ) \* [ เวลาที่ใช้ในการกึ่งต่อชิ้นงาน ( $T_m$ ) / อายุเครื่องมือตัด ( $T$ ) ]
4. ต้นทุนในการติดตั้งเครื่องจักร เท่ากับ เวลาติดตั้ง ( $T_d$ ) \* ค่าแรงผู้ติดตั้งบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงาน ( $R_d$ ) \* จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อการติดตั้ง ( $N_d$ )
5. ต้นทุนค่าใช้จ่ายของมีดตัดต่อการกึ่งงาน เท่ากับ ราคาของมีดตัดต่อคมตัด ( $C_c$ ) \* [ เวลาที่ใช้ในการกึ่งต่อชิ้นงาน ( $T_m$ ) / อายุเครื่องมือตัด ( $T$ ) ]

ซึ่งจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของความเร็วในการตัดตั้งสมการต่อไปนี้

$$C_p = (T_i * R_m) + (T_m * R_m) + [T_c * R_m * (T_m / T)] + (T_d * R_d / N_d) + (C_c * T_m / T)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ค่าใช้จ่ายในการกึ่งชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์ต่อชิ้นงาน

$C_c$  คือ ราคาของมีดตัดต่อคมตัด

$T_i$  คือ เวลาที่หีบชิ้นงานใส่เครื่องบวกเวลาที่หีบชิ้นงานออกจากเครื่อง

$R_m$  คือ ค่าแรงพนักงานบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงาน

$T_m$  คือ เวลาที่ใช้ในการกึ่งต่อชิ้นงาน

$T_c$  คือ เวลาถอดเปลี่ยนเครื่องมือตัด

$T$  คือ อายุเครื่องมือตัด

$T_d$  คือ เวลาติดตั้ง

$R_d$  คือ ค่าแรงผู้ติดตั้งบวกค่าใช้จ่ายหน่วยงาน

$N_d$  คือ จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อการติดตั้ง

### 2.1.10 ความเร็วในการตัดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการกลึงชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์ต่ำสุด

ค่าใช้จ่ายในการกลึงชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์ต่อชิ้นงาน (Groover, 1996) มีสมการดังนี้

$$C_p = (T_1 \cdot R_m) + (T_m \cdot R_m) + [T_0 \cdot R_m \cdot (T_m / T)] + (T_1 \cdot R_s / N_s) + (C_s \cdot T_m / T) \dots (1)$$

$$\text{เมื่อ } T_m = (\pi \cdot D \cdot L) / (1000 \cdot f \cdot V)$$

ในที่นี้เราจะดูถึงกรณีของการเปลี่ยนความเร็วตัด ( $V$ ) ในขณะที่อัตราการป้อนตัด ( $f$ ) กำหนดให้เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้

$$T_m = K / V \dots (2)$$

$$\text{เมื่อ } K = (\pi \cdot D \cdot L) / (1000 \cdot f)$$

และเรายังมีความสัมพันธ์ของอายุของเครื่องมือตัดระหว่าง  $T$  และ  $V$  ของเทอร์เนอร์ดังนี้

$$V T^n = C$$

$$\text{หรือ } T = (C/V)^{1/n} \dots (3)$$

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนรูป  $T_m$  และ  $T$  ในสมการที่ (1) ด้วยการแทนค่าสมการที่ (2) และ (3) ลงในสมการที่ (1) เป็นดังนี้

$$C_p = (T_1 \cdot R_m) + [(K/V) \cdot R_m] + \{T_0 \cdot R_m \cdot [(K/V) / (C/V)^{1/n}]\} + (T_1 \cdot R_s / N_s) + [C_s \cdot (K/V) / (C/V)^{1/n}]$$

หาความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ต้นทุนต่ำสุดแทนด้วย  $V_{opt}$  จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์นี้

$$\partial C_p / \partial V = 0$$

ซึ่งจะได้สมการที่ (4) ดังข้างล่างนี้

$$\partial C_p / \partial V = R_m \cdot (-K/V^2) + [R_m \cdot (1/n - 1) \cdot K \cdot T_0 \cdot V^{1/n-2} / C^{1/n}] + [(1/n - 1) \cdot C_s \cdot K \cdot V^{1/n-2} / C^{1/n}] = 0 \dots (4)$$

แก้สมการที่ (4) ซึ่งวิธีการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก. จะได้ค่าความเร็วในการตัดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการกลึงชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์ต่ำสุด  $V_{opt}$  ดังนี้

$$V_{opt} = \frac{C}{[(1/n - 1) \cdot (T_0 + C_s/R_m)]^n}$$

$$\text{แต่ } V = \pi \cdot d \cdot N / 1000$$

$$N_{opt} = \frac{1000 \cdot C}{\pi \cdot d \cdot [(1/n - 1) \cdot (T_0 + C_s/R_m)]^n}$$



### 2.1.11 ความเร็วในการตัดที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์สูงสุด

สมการอัตราการผลิต (Groover,1996) จะมีสมการดังนี้

$$R_p = 1/T_p = 1/[T_m + T_i + (T_m * T_o / T)] \quad \text{.....(5)}$$

โดยที่  $R_p$  คือ อัตราการผลิตชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์  
ความสัมพันธ์ของอายุของเครื่องมือตัดระหว่าง  $T$  และ  $V$  ของเทอร์เนอร์ดังนี้

$$V T^n = C$$

หรือ

$$T = (C/V)^{1/n}$$

ดังนั้น  $R_p = 1/T_p = 1/\{(K/V) + T_i + [(K/V) * T_o / (C/V)^{1/n}]\}$  .....(6)

หาความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อัตราการผลิตที่สูงสุดแทนด้วย  $V_{opt}$  จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์นี้

$$\partial R_p / \partial V = 0$$

ซึ่งจะได้สมการที่(7) ดังข้างล่างนี้

$$\partial R_p / \partial V = -\{(-K/V^2) + [(1/n - 1) * K * T_o * V^{1/n-2} / C^{1/n}]\} = 0 \quad \text{.....(7)}$$

แก้สมการที่(7) ซึ่งวิธีการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก. จะได้ค่าความเร็วในการตัดที่ทำให้อัตราการผลิตชิ้นส่วนของปั๊มน้ำรถยนต์สูงสุด  $V_{opt}$  ดังนี้

$$V_{opt} = \frac{C}{[(1/n - 1) * T_o]^n}$$

แต่  $V = \pi * d * N / 1000$

$$N_{opt} = \frac{1000 * C}{\pi * d * [(1/n - 1) * T_o]^n}$$

โดยที่ค่า  $V_{opt}$  จะน้อยกว่า  $V_m$  เสมอเพราะ  $C/R_m$  จะเป็นบวกเสมอ