บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนสารสนเทศ

มีดตัดเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีสำคัญมากที่ใช้ในขบวนการตัดปาดโลหะ ความได้เปรียบหรือความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทางด้านการตัดปาดโลหะนั้น ขึ้นอยู่กับการใช้วัสดุมีดตัดมีความก้าวหน้าเช่นกัน คุณสมบัติที่ต้องของวัสดุมีดตัดคือ มีความแข็งที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปสูง มีความเหนียว มีความคงทนต่อภาวะทางเคมี มีคุณสมบัติด้านความร้อนที่ดี มีความแข็งแกร่งสูง และมีราคาไม่แพง ปัจจุบันนี้มีวัสดุหลายชนิดที่ใช้ทำมีดตัด เช่น เหล็กรอบสูง (HSS) ซีเมนต์คาร์ไบด์(Cemented Carbides) คาร์ไบด์หล่อ(Cast Carbides) ซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบ (Coated Cemented cabides) ซินเตอร์ คิวบิค โบรอน ไนเตรต(Sintered Cubic Boron nitrate) โฟลีคริสตอลไล ไดมอนด์(Polycrystalline Diamond) เป็นต้น ชนิดของมีดตัดและอายุการใช้งานที่ได้จะส่งผลสำคัญที่สุดต่อค่าใช้จ่ายในการผลิต อายุการใช้งานมีดตัดถูกจำกัดด้วยการเกิดขึ้นของขนาดการสึกหรอ อุณหภูมิ ความดันที่เกิดขึ้นสูง ร่วมทั้งความเร็วสัมผัสและปฏิกิริยาเคมี ระหว่างมีดตัดและวัสดุชิ้นงาน ที่จะนำไปสู่การเกิดคุณสมบัติทางกลที่ด้อยลงมา และการล้าตัวหรือการกระตุกต่อความร้อน ซึ่งผลเหล่านี้ทำให้ลดอายุใช้งานมีดตัดให้สั้นลง

จากการศึกษาของเทเลอร์ (Taylor) [1]เกี่ยวกับอายุการใช้งานของมีดตัด ทำให้สามารถกำหนดสมการความสัมพันธ์ของระหว่างความเร็วตัดกับอายุการใช้งานที่ถูกนำมาอ้างอิงอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัย[2,3] ได้ทำการหาพารามิเตอร์อื่นที่มีความสัมพันธ์ต่อการสึกหรอและอายุการใช้งาน แสดงในรูปสมการเพิ่มเติมจากการศึกษาของเทแลอร์ เทรนท์(Trent)[4] ได้ศึกษาพิจารณาต่อมาว่ามีตัวแปรอีกหลายตัวที่มีผลต่อการสึกหรอของมีดตัดซีเมนท์ที่ใช้ตัดปาดชิ้นงานที่เป็นเหล็ก และยังได้เสนอว่าการเกิดการสึกหรอแบบแอ่งหลุ่ม(Crater Wear)บนผิวคายเศษมีดตัดมีกลไกการเกิดที่แตกต่างจากการสึกหรอที่เกิดบนหลบด้านข้าง(Flank Wear), งานวิจัย Trigger และ Choa[5] ได้สังเกตว่าการสึกหรอแบบแอ่งหลุ่มบนมีดตัดซีเมนต์ คาร์ไบด์ จะเกิดเป็นระยะทางที่แน่นอนวัดจากขอบคมตัดมีดตัด, งานวิจัยของ Opitz และ Koning[6] กล่าวว่ากลไกจุลภาคการสึกหรอของมีดตัดคาร์ไบด์จากการตัดวัสดุจำพวกเหล็กพบว่าการเปลี่ยนแปลงทางกลไกการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วตัด, Kramer Suh[7] ศึกษากลไกลการควบคุมการสึกหรอแบบ

หลุ่มบนมีดตัดคาร์ไบด์เฟสเดี่ยวในการตัดเฉือนเหล็กด้วยความเร็วรอบสูง และได้พัฒนาสมการรูปแบบอย่างง่ายในอธิบายกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้น

การสั่นสะเทือนกระทบได้ถูกศึกษาเป็นครั้งแรกโดย Tlusty และ Polacek[8] โดยพบว่าแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนกระตุ้นด้วยตัวเองคือ พลศาสตร์โครงสร้างของเครื่องกลตัดเฉือน และผลย้อนกลับระหว่างการตัดที่เกิดขึ้นต่อมาบนผิวตัดเดิมที่ทำให้เกิดผิวการตัดรูปคลื่นบนผิวงานซึ่งทำให้ได้ความหนาเศษตัดหนาบางไม่เท่ากัน จากการศึกษาของ Chiou และคณะ[9] พบว่าขีดจำกัดการสั่นกระทบจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ความเร็วตัดต่ำ และทำให้อัตราการสึกเพิ่มขึ้นด้วย

การสั่นสะเทือน เป็นปรากฏการที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนเสมอ แหล่งที่มาของการสั่นสะเทือน เช่น โครงสร้างของเครื่องจักร ชนิดของมีดตัดที่ใช้ ชนิดวัสดุงาน ฯลฯ และโดยทั่วไปแล้วการแยกแยะถึงแหล่งที่ให้กำเนิดการสั่นสะเทือนเป็นเรื่องที่ซับซ้อน อย่างน้อยชนิดของการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรแบ่งได้เป็น การสั่นสะเทือนจากแรงที่กระทำ และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในของเครื่องจักรเอง การสั่นสะเทือนจากแรงที่มากระทำเป็นผลมาจากแรงที่กระทำต่อเครื่องจักรตามรอบระยะเวลา เช่นแรงที่เกิดจากการส่งกำลังในชุดเกียร์ที่ชำรุด ความไม่สมดุลของส่วนประกอบในตัวเครื่องจักรกล การไม่ได้แนวของเครื่องจักร เป็นต้น ส่วนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเองในเครื่องจักร ที่มีสาเหตุจากความสัมพันธ์ของเศษจากการตัดเฉือนและโครงสร้างของเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเองนี้มักทำให้เกิดตำหนิบนผิวงานสำเร็จที่เรียกว่า การกระทบ หรือ Chatter [10]

มีความพยายามที่หาความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับระดับการสึกหรอของมีดตัดที่ใช้ โดยพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถให้ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ดี [11]

2.2 ทฤษฎีการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

การเคลื่อนที่ไป-มาของระบบของเครื่องจักรกล จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และการเคลื่อนที่ดังกล่าวอาจมีรูปร่างที่แน่นอน หรืออาจไม่แน่นอน โดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนจะแบ่งออกเป็นสองแบบคือ การสั่นสะเทือนอิสระ(Free vibration) และการสั่นสะเทือนโดยแรง(Forced vibration) การสั่นสะเทืออิสระจะเกิดขึ้นในขณะที่ระบบเคลื่อนที่ไป-มา โดยที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบ ความถี่ของการเคลื่อนที่ไป-มา หรือการสั่นสะเทือนนี้เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ซึ่งอาจจะมีความถี่เดียวหรือหลายความถี่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนโดยแรงคือ การเคลื่อนที่ในขณะที่มีแรงภายนอกมากระทำที่ระบบและทำให้ระบบเคลื่อนที่ไป-มาเช่นเดียวกับแรงที่กระทำ หรือมีความถี่เท่ากับเท่ากับความถี่ของแรงที่

กระทำ ถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะเรียกระบบอยู่ในสภาพความถี่พร้อง(Resonance) คือจะมีการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก สำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนเครื่องกลตัดเฉือน(Machine Tool) เป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของงานเครื่องกลประเภทที่ใช้การหมุนรอบแกนขับเครื่องมือกลหรือหมุนขับชิ้นงาน เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือกล(Cutting tool) หรือมีดตัดกับวัสดุชิ้นงาน ทำให้เกิดการตัดเฉือนขึ้น เมื่อใช้อัตราป้อนตัด และป้อนกินลึกสูง มักจะมีข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากการกระทบ(Chatter) ซึ่งภาวะนี้เกิดจากการเคลื่อนตัวจากการสั่นสะเทือนที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานบางครั้งเรียกการสั่นสะเทือนแบบนี้ว่า (Self-excited vibration) จนเป็นผลทำให้เกิดผิวงานสำเร็จที่ไม่สม่ำเสมอผิดปรกติ เป็นที่ไม่ต้องการ ถึงแม่ว่าขนาดของการสั่นสะเทือนจะมีขนาดที่น้อยมาก แต่การสั่นสะเทือนนี้จะมีผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงานที่ได้ มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ขัดขวางต่อกระบวนการผลิต เสียค่าใช้จ่าย

เครื่องกลตัดเฉือน เครื่องมือกลและชิ้นงาน นับเป็นแหล่งต้นเหตุให้เกิดคุณลักษณะทางพลศาสตร์ที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะเรียนรู้ ทำความเข้าใจ กลไกการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมา เพื่อทำการออกแบบเพื่อขจัด หรือปรับปรุงคุณลักษณะด้านนี้ของเครื่องจักรกล การจำลองคุณลักษณะของเครื่องจักรกล มักประกอบไปด้วย ส่วนมวล(m) ส่วนสปริง(k) และส่วนตัวหน่วง(c) ในการอธิบายถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกล สมมติให้มีรูปแบบเป็นระบบ มวล-สปริงองศาอิสระเดียว(SDOF) ที่มีการหน่วงแบบหนืด

รูปแบบการสั่นสะเทือนโดยแรงที่ประกอบด้วยตังหน่วงชนิดหนืด(Force vibrations with viscous damping) แสดงแทนด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียล ของการเคลื่อนที่ของระบบ คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

เมื่อระบบถูกกระทำให้เบี่ยงเบนจากตำแหน่งสมดุลไป ระบบจะพยายามกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยการแกว่งเป็นคาบเวลาเฉพาะเรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ(Natural frequency) เมื่อสมมติการหน่วงมีค่าคงที่(c = 0) ความถี่ธรรมชาติหาได้จาก

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

อัตราส่วนการหน่วง(Damping ratio) กำหนดจาก สมการ $\zeta = c/2\sqrt{km}$ ที่โดยทั่วไปในโครงสร้างทางเครื่องกล มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง และในโครงสร้างที่เป็นโลหะอัตราส่วนการหน่วง $\zeta < 0.05$ หรือน้อยกว่า ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติระบบที่มีการหน่วงกำหนดได้จาก

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

เมื่อพิจารณามวลปราศจากการกระทำจากแรงภายนอก การสั่นสะเทือนอิสระอธิบายได้ด้วยสมการ

$$x(t) = x_o e^{-\zeta\omega_n t}\cos\omega_d t$$

ถ้าพิจารณาระบบที่มีแรงภายนอก $F(t)$ มากระทำ โดยแรงภายนอกมีค่าคงที่ $F(t)=F_o$ การเคลื่อนตัวของระบบจะแกว่งแบบชั่วขณะ(Transient) จนเข้าสู่ภาวะสมดุล แต่ถ้าระบบถูกแรงภายนอกแบบมีคาบความถี่มากระทำ ระบบจะถูกแทนด้วยสมการ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \sin(\omega t)$$

นั้นคือระบบจะเคลื่อนตัวสั่นสะเทือนตามคาบความถี่ของแรงที่มากระทำ ดังนั้นคำตอบของการเคลื่อนตัวกำหนดได้จาก

$$x(t) = X' e^{-\zeta\omega t}\sin(\omega_d t + \phi) + X\sin(\omega_f t - \phi)$$

หรือเขียนในรูป Complex harmonic function โดยที่ Harmonic Force, $F(t)=F_o e^{j\alpha} e^{j\omega t}$ ได้เป็น

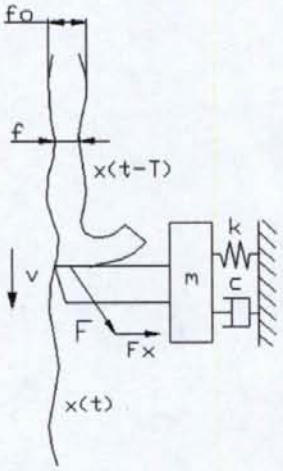
$$x(t) = X e^{j(\omega t+\phi)}$$

โดยขนาด(Amplitude)ของการเคลื่อนที่ และมุมเฟส(Phase angle) สามารถหาได้จากสมการ

$$X = \frac{F_o}{\sqrt{\left(k - m\omega_f^2\right)^2 + \left(c\omega_f\right)^2}} = \frac{F_o}{k\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega_f^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta\frac{\omega_f}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\tan\phi = \left(2\zeta\frac{\omega_d}{\omega_n}\right) \Big/ \left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_n^2}\right)$$

โดยทั่วไปมักแสดงความสัมพันธ์เส้นโค้งตอบสนองการสั่นสะเทือนในระบบด้วยอัตราส่วนขนาด $\left(\frac{X}{F_o/k}\right)$ กับอัตราส่วนความถี่ $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.1 รูปแบบกลพลศาสตร์ ในงานกลึง

เมื่อพิจารณาถึงพลศาสตร์ของการตัดเฉือนในงานเครื่องกล ในระบบการสั่นสะเทือนแบบอิสระดีกรีเดี่ยว ขนาดของการเคลื่อนที่จากการสั่นสะเทือนของมีดตัดและชิ้นงานในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการป้อนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่เรียกว่า Wave generating เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่นี้มีผลทำให้ความหนาเศษตัดก่อนการตัดเฉือน มุมคายเศษ มุมหลบ และมุมตัดเฉือนจะมีการเปลี่ยนแปลงด้วยแรงที่จะให้ค่าความถี่ที่เฉพาะ ขึ้นอยู่ของสภาวะที่ใช้ตัดเฉือนโดยสมมติว่าความคมของมีดตัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในสภาวะการตัดเฉือนนี้ ถ้าใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมวัดจะได้รูปแบบการสั่นสะเทือนขนาดหนึ่ง

ในขบวนการตัดเฉือนกำลังดำเนินอยู่แรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดและชิ้นงานจะมีขนาดแปรผันไปตามพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในระบบด้วย การเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของมีดตัดพลศาสตร์ของขบวนการตัดเฉือนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ต้องศึกษารูปแบบแรงตัดเฉือนในขบวนการควบคู่กันไป ข้อสมมติฐานตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแรงตัดเฉือนที่เกิดขึ้นคือ 1) รูปแบบการตัดเฉือน 2) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างมีดตัดและชิ้นงาน 3) คุณสมบัติวัสดุชิ้นงาน และรวมไปถึงผลที่เกิดจากความเสียดทาน ผลจากความร้อน

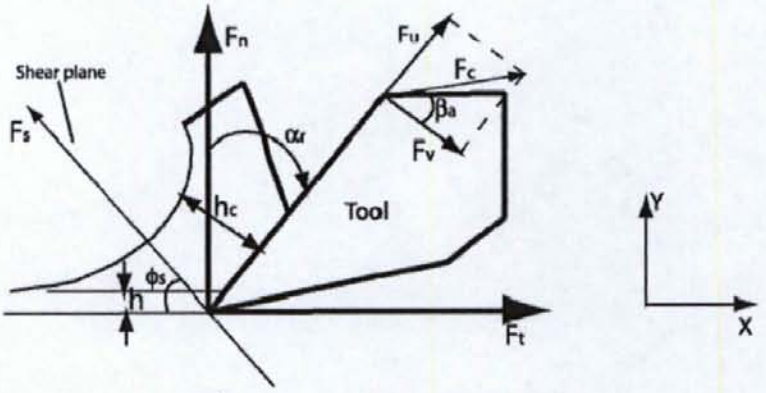
ดังนั้นจึงมีความพยายามมีผู้เสนอรูปแบบแรงตัดเฉือนอยู่ในรูปตัวแปรข้างต้น เช่น ระยะความลึกตั้งตัด อัตราการป้อนตัด เช่น

$$Fc(A) \approx Fc(A) + \frac{\partial Fc(A)}{\partial A}(A - Ao)$$

จากสมการข้างต้นรูปแบบแรงตัดเขียนอยู่ในเทอมของแรงสถิตศาสตร์รวมกับแรงพลศาสตร์ เมื่อแสดงรูปแบบแรงบนงานกลึง สามารถเขียนใหม่เป็น

$$Ft(A) \approx K_t bh + K_t b[y(t) - y(t-T)]$$

เมื่อกำหนดให้ Ao เป็นพื้นที่เศษตัดก่อนตัด , A เป็นพื้นที่เศษตัดหลังถูกตัดเฉือน, b เป็นระยะป้อนตัดลึก และ h เป็นความหนาเศษตัด จากสมการข้างต้นเห็นได้ว่าแรงตัดจะเป็นสัดส่วนตรงกับความดันตัด, Kt และพื้นที่เศษตัด Ao ถ้าสมมติว่าไม่เกิดแรงสั่นสะเทือนในส่วนของแรงสถิตศาสตร์แล้ว เทอมทางด้านพลศาสตร์จะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของมีดตัด ขณะเวลาใดๆ กับระยะทางเดินของมีดตัดในเที่ยวก่อนหน้า



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบแรง ในงานกลึง

พิจารณาการตัดเฉือนแบบตั้งฉาก แรงตัดลัพธ์ FC ทำเป็นมุม β_a ซึ่งอาจเรียกว่าเป็นมุมเสียดทานเฉลี่ย ระหว่างผิวคายเศษมีดตัดกับ เศษตัดที่ไหลผ่าน อัตราส่วนความหนาเศษตัด และ มุมเฉือนจากการตัด หาได้จากความสัมพันธ์

$$r_c = \frac{h}{h_c}$$

$$\phi_S = \tan^{-1} \frac{r_c \cos(\alpha_r)}{1 - r_c \sin(\alpha_r)}$$

เมื่อ α_r เป็นมุมคายมีดตัด

ในการตัดนี้สมมติว่ามีดตัดมีขอบตมตัดคม และการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นเป็นระนาบบางๆ จากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเราสามารถเขียนสมการแรงตัดลัพธ์ที่เกิดอยู่ในรูป

$$F_t = bh\left[\tau_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin(\phi_s)\cos(\phi_s + \beta_a - \alpha_r)}\right]$$

$$F_n = bh\left[\tau_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin(\phi_s)\cos(\phi_s + \beta_a - \alpha_r)}\right]$$

เมื่อ τ_s คือความเค้นเฉือนของวัสดุชิ้นงาน

$$\tau_s = Fc\left[\frac{\sin(\phi_s)\cos(\phi_s + \beta_a - \alpha_r)}{bh}\right]$$

แรงตัดเฉือนที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การตัด(cutting coefficients) ในรูป

$$K_t = \left[\tau_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin(\phi_s)\cos(\phi_s + \beta_a - \alpha_r)}\right]$$

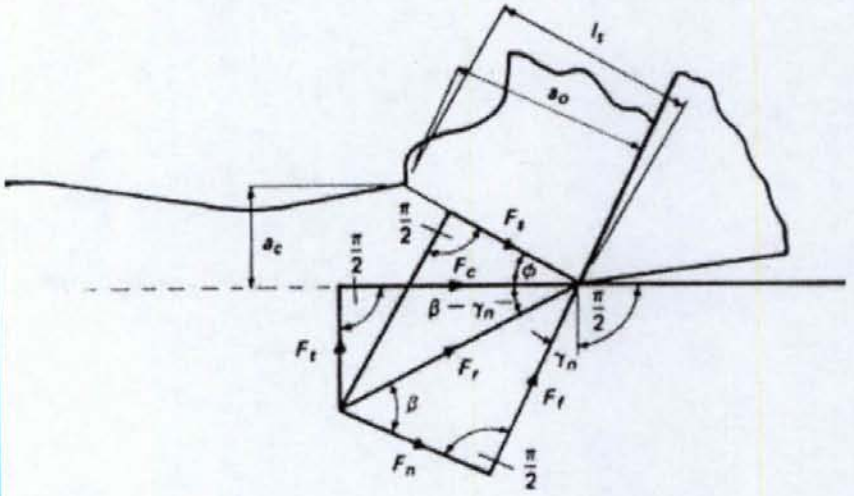
$$K_n = \left[\tau_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin(\phi_s)\cos(\phi_s + \beta_a - \alpha_r)}\right]$$

ในรูปสมการทั่วไป เขียนสมการแรงตัดอยู่ในรูป

$$F_t = K_t bh$$

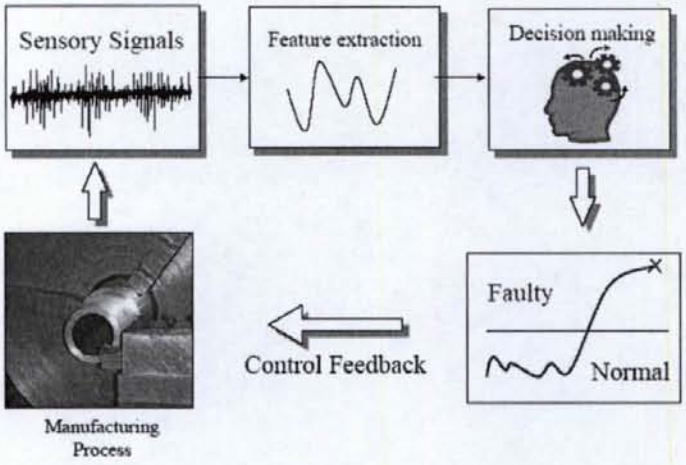
$$Fn = K_n bh$$

เมื่อมีดตัดเกิดการสึกหรอในระหว่างกระบวนการ เช่นการสึกหรอที่ผิวหลบ(Flank wear) หรือการสึกหรือที่ผิวคายเศษ (Crater wear) ที่ทำให้คมของมีดตัดหรือรูปร่างมีดตัดเปลี่ยนไป จนทำให้ทิศทางและขนาดแรงตัดเฉือนเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน และทำให้ได้รูปแบบการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบการสั่นสะเทือนเดิม จากหลักการวัดรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณการสั่นสะเทือน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเฝ้าติดตามสภาวะของการทำงานเครื่องหรือใช้ในการทำนายอายุการใช้งานมีดตัด



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบแรงกระทำบนมีดตัดขณะตัดปาดผิวงานที่ไม่สม่ำเสมอ

ระบบเฝ้าตรวจสอบงานเครื่องกลมีแนวคิดจากการ ใช้หลักการนำเอาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบเครื่องกล เช่น แรงตัดเฉือน อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน การกระทบ ฯลฯ ที่อยู่ในรูปสัญญาณจากการวัดโดยใช้ตัวตรวจวัดที่เหมาะสม มาเฝ้าตรวจสอบติดตามความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อตรวจสอบสภาพการทำงานในกระบวนการนั้นๆ นำมาแปลผล ตัดสินใจ หาสภาพการทำงานที่เหมาะสมหรือตรวจสอบสภาพการทำงานที่ไม่ปรกติ การเฝ้าตรวจสอบติดตามกระบวนการเป็นการวัดและประเมิน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ อาศัยสัญญาณจากตัวตรวจวัด(Sensors) ผ่านการวิเคราะห์เปลี่ยนรูปแบบสัญญาณให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิต การวัดสัญญาณโดยตัวตรวจวัดเพื่อให้ได้ตัวแปรวิกฤติในกระบวนการอาจทำได้โดยการวัดโดยตรง หรือวัดโดยอ้อม



ภาพที่ 2.4 แนวคิดระบบเฝ้าตรวจสอบติดตามในกระบวนการผลิต

2.3 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน เป็นอาการที่แสดงถึงการตอบสนองต่อแรงกระทำภายในหรือแรงกระทำจากภายนอก การตรวจสอบสัญญาณการสันสะเทือนสามารถตรวจสอบจากสิ่งที่วัดได้คือ ขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิด(Amplitude) เป็นสิ่งบ่งชี้ถึงระดับความรุนแรงของปัญหาที่เกิด ความถี่(Frequency) เป็นสิ่งบ่งชี้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด และ เฟส(Phase) เป็นสิ่งบ่งชี้ว่าการสั่นสะเทือนมีลักษณะเป็นอย่างไร

การแสดงผลค่าการสั่นสะเทือนทั่วไปแล้วสามารถแสดงได้หลายแบบคือ สัญญาณดิบ (Time Waveform) สำหรับการดูแนวโน้มและสาเหตุการสั่นสะเทือน สัญญาณแถบลื่อนความถี่ (FFT Spectrum) สำหรับดูแนวโน้มและวิเคราะห์สาเหตุการเกิดการสั่นสะเทือน

วิธีการตรวจสอบวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรกลมีหลายวิธีการเพื่อบ่งบอกถึงสภาพการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องจักร อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพของเครื่องจักร เช่นการตรวจวัดอุณหภูมิ ,ความดัน ,สภาพสารหล่อลื่นและการวัดค่าการสั่นสะเทือน ซึ่งวิธีการวัดค่าการสั่นสะเทือนจะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร เนื่องจากวิธีการนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง ดังนั้นในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร เมื่อทราบถึงค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบ จึงเป็นตัวแปรบ่งชี้แนวโน้มการชำรุดเสียหายเสื่อมสภาพของเครื่องจักรและยังสามารถกำหนดช่วงเวลาในการตรวจสอบซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้ การวัดค่าการสั่นเทือนส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะกระทำได้โดยใช้หัวตรวจวัดทรานส์ดิวเซอร์ (Transducer) อ่านค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน แล้วเก็บข้อมูลในรูปของโดเมนเวลา(Time Domain) จากนั้นทำการ

แปลงรูปของโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยผ่านขบวนการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโดยส่วนมากนิยมใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งโดเมนความถี่นี้จะบ่งบอกถึงอาการผิดปกติต่างๆ ขอเครื่องจักรที่เกิดขึ้นบนความถี่ที่แตกต่างกัน หากแต่วิธีการแปลงฟูเรียร์นั้นมีความเหมาะกับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นสัญญาณคงตัว (Stationary Signal) เท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในความสามารถเปลี่ยนความละเอียด(Resolution)และในสภาพความเป็นจริง สัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสัญญาณไม่คงตัว(Non – Stationary Signal) หรือ สัญญาณคงตัวเป็นช่วง (Quasi - Stationary Signal) ทำให้การแปลงฟูเรียร์ไม่เหมาะสมนัก การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ที่ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น (Short-Time Fourier Transform) ในระดับความละเอียดของการวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้น การตรวจวิเคราะห์สภาพเครื่องจักรกล จากการวัดค่าสั่นสะเทือนโดยใช้การแปลงเวฟเลตจึงน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน อีกวิธีหนึ่ง

สัญญาณการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรที่วัดได้นั้น จะเป็นตัวบอกถึงสภาพหรือความบกพร่องของเครื่องจักร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญของการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ซึ่งประกอบด้วย ความถี่ ขนาดของการสั่นสะเทือน และมุมเฟส

ความถี่(Frequency) เมื่อพิจารณาสัญญาณของการสั่นสะเทือนบนกราฟโดเมนของเวลา ความถี่ในที่นี้คือ จำนนรอบของการสั่นต่อหน่วยเวลา และหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น รอบต่อนาที (CPM) และในบางครั้งใช้เป็นรอบต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์(Hz) ความถี่นี้เป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงแหล่งที่มาของปัญหาหรือความบกพร่องของเครื่องจักร

ขนาดของการสั่นสะเทือน(Amplitude) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความรุนแรงของการสั่นสะเทือนในเครื่องจักร ถ้ากาสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ แสดงว่าเครื่องจักรเริ่มมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนนิยมใช้วัดมี 3 ชนิด คือ การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่(displacement) ความเร็ว(velocity) และความเร่ง(acceleration)

การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ หมายถึงระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือมวลจากจุดสมดุลเคลื่อนที่ไปสู่จุดสูงสุดแล้วเคลื่อนที่ไปสู่จุดต่ำสุด(peak to peak) ซึ่งเป็นระยะทางทั้งหมดที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดต่ำสุดไปสู่จุดสูงสุดในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นๆ

ความเร็วของการสั่นสะเทือนหมายถึงความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุ ที่จะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุด และมีความเร็วสูงสุดขณะเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ซึ่งค่าการขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการ

$$v = dx/dt$$

ความเร่งของการสั่นสะเทือน หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในขณะที่คลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุลตามสมการ $a = dv/dt = d^2x/dt^2$

มุมเฟสของการสั่นสะเทือน หมายถึงความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนหรือวัตถุที่มีการสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกชิ้นหนึ่ง

เมื่อพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนแล้ว สัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา การบอกขนาดการสั่นสะเทือนจะบอกในลักษณะการสั่นสะเทือนแบบรวม ที่ใช้ทั่วไปจะประกอบไปด้วย

ค่ายอดคลื่นสูงสุด(Peak) จะบอกระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิงโดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ส่วนมากจะใช้วัดกาสรสั่นในช่วงเวลาสั้นๆ

ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม(Peak to Peak) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นกับจุดต่ำสุดของคลื่น

ค่าเฉลี่ย(Average) เป็นค่าเฉลี่ยของขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งการสั่นสะเทือนนี้จะมีทั้งค่าบวกและค่าลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

ค่า rms (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนเวลา ในช่วงเวลาหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบเวลาและถอดรากที่สองออกมาตามสมการ $X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t X^2(t)dt}$

กราฟโดเมนเวลา(Time Domain Plot) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลา โดยแกนนอนเป็นแกนของเวลา ส่วนในแกนตั้งเป็นแกนของขนาดการสั่นสะเทือน

กราฟสเปกตรัม(Spectrum Plot) เป็นกราฟแสดงขนาดของการสั่นสะเทือนบนแกนของความถี่ แกนตั้งแสดงถึงขนาดของการสั่นสะเทือน ในแกนนอนแสดงความถี่

กราฟแนวโน้ม(Trend Plot) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลา โดยการเปรียบเทียบค่าขนาดการสั่นสะเทือนจากการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ กัน สำหรับนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดการสั่นสะเทือนท่เกิดขึ้น

กราฟออบิต(Obit Plot) เป็นกราฟแสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางเพลาที่เคลื่อนที่ ณ ความเร็วรอบของการหมุนที่รอบต่างๆ

การแปลงแบบฟูเรียร์

การแปลงฟูเรียร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ในสาขาการประมวลผลสัญญาณนิยมนำการแปลงฟูเรียร์มาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพราะการแปลงฟูเรียร์จะมีสัญญาณไซน์และโคไซน์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสัญญาณทั้งสองจะมีความสำคัญมากเพราะเป็นสัญญาณพื้นฐานสำหรับการพิจารณาสัญญาณอื่นๆ

การแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง(Discrete Fourier Transform) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิตอลซึ่งอยู่ในโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณที่อยู่ในโดเมนความถี่ โดยการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่องนี้มีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนมีจำนวนครั้งและเวลาในการคำนวณมาก ต่อมาเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาวิธีการแปลงให้เร็วขึ้น(Fast Fourier Transform) ซึ่งจะทำให้การคำนวณ DFT ใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง N $\log_2$ N ครั้งเท่านั้นหรือทำให้จำนวนครั้งในการคูณตัวเลขลดลงไปถึง N/ ($\log_2$ N) เท่า โดยการแปลงแบบเร็วนี้มีวิธีการแปลงที่คล้ายกับการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วย แต่จะมีวิธีการในการจัดแบ่งข้อมูลแล้วทำการคำนวณซึ่งจำนวนที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่า 2n โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มบวก ดังนั้นจึงทำให้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วนี้ลดเวลาในการคำนวณลง การแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่องและการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมีขบวนการในการคำนวณสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$f(n) \rightarrow F(k)$$
$$F(k) = FFT\{f(n)\}$$
$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j2\pi nk/N} \qquad ,k = 0,1,....,N-1$$

เมื่อทำการเลื่อนค่า n ไปค่าหนึ่งโดยเริ่มที่ค่า n-1 จะมีสมการผลลัพธ์ดังสมการ

$$F(k) = \sum_{n=1}^{N} f(n)e^{-j2\pi(k-1)(\frac{n-1}{N})} \qquad ,k = 1,2,....,N$$
$$f(n) \leftarrow F(k)$$
$$f(n) = FFT^{-1}\{F(k)\}$$

เมื่อทำการแปงกลับจะได้

$$f(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N-1} F(k)e^{j2\pi(k-1)(\frac{n-1}{N})} \qquad ,n = 1,2,....,N$$

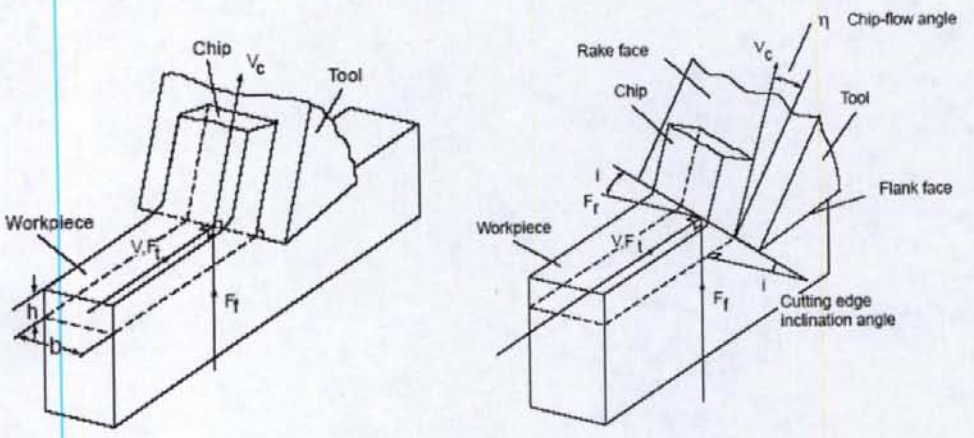
2.4 การตัดเฉือนโลหะ

การตัดเฉือนโลหะเป็นขบวนการที่ใช้กันแพร่หลายในการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งขนาด รูปร่าง และคุณภาพของชิ้นงาน การตัดเฉือนทำได้หลายวิธีการ เช่น การกลึง และการกัด ที่นิยมใช้กันมาก ในขบวนการตัดเฉือนโลหะนั้น ตัวแปรที่มีความสำคัญและวิกฤติก็คือ อายุการใช้งานของมีดตัด เมื่อตัดสินตามแง่ของเศรษฐศาสตร์ การเลือกใช้มีดตัดที่มีทนต่อการสึกหรอจะเป็นตัวตัดสินต่อคุณภาพผิวงานและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น

รูปแบบการเสียที่เกิดบนมีดตัดระหว่างการตัดเฉือนจะเรียกว่า การสึกหรอมีดตัด ถ้าวัดขนาดของการสึกหรอที่เกิดขึ้นถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้เทียบกับระยะเวลาที่ใช้งานตัดเฉือนแล้ว สามารถนำไปสู่การหาค่า อายุการใช้งานของมีดตัดนั้นได้ โดยอายุการใช้งานมีดตัดนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญในขบวนการตัดเฉือนโลหะที่ส่งผลต่อยังค่าใช้จ่ายและความสามารถในการผลิต

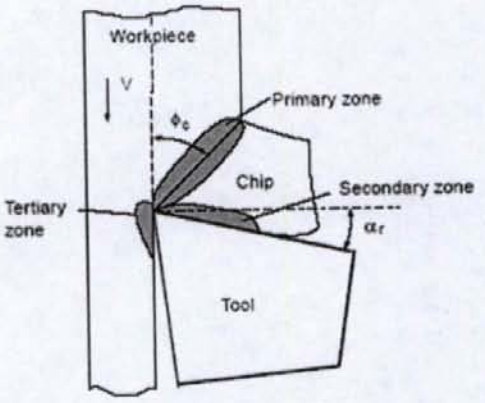
มีข้อปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอและอายุการใช้งานได้ถูกสืบสวนขึ้น จนความรู้ความเข้าใจในกลไกการเกิดการสึกหรอของวัสดุหลายๆ ชนิดกับหลายๆ ขบวนการผลิตที่ใช้ โดยเฉพาะจากงานวิจัยของ เทเลอร์(F. W. Taylor, 1907) จากความรู้ที่ได้นี้เป็นพื้นฐานนำมาสู่การปรับปรุงพัฒนาคุณสมบัติมีดตัดและเพิ่มความสามารถในการผลิตให้สูงขึ้น เช่นเดียวกับการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระหว่างขบวนการตัดเฉือนนี้ การสั่นสะเทือน การกระทบ ก็เป็นสิ่งสำคัญที่เกิดขึ้นด้วย หนึ่งในภาวะที่เร่งการเกิดการสึกหรอคือ การสั่นสะเทือนกระทบ

การตัดเฉือนโลหะเป็นขบวนการปอกเอาเนื้อโลหะที่ไม่ต้องการออกจากโลหะก้อนเป็นเศษตัดโดยการใช้มีดตัดที่มีความแข็งกว่าวัสดุชิ้นงานภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของมีดตัดและชิ้นงาน กลไกของการตัดเฉือนโลหะจะมีลักษณะที่คล้ายกัน แม้ว่าจะมีรูปร่างมีดตัดที่ต่างกันหรือใช้ขบวนการตัดที่ต่างกัน รูปแบบของการตัดเฉือนโลหะการตัดทั่วไปแบ่งเป็น สองรูปแบบคือ การตัดแบบ การตัดแบบตั้งฉาก(Orthogonal Cutting) และการตัดแบบสามมิติ (Oblique Cutting) การตัดเฉือนแบบตั้งฉาก วัสดุจะถูกตัดเฉือนด้วยคมตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตั้งฉาก ส่วนการตัดแบบออบลีคจะมีกลไกตัดที่ซับซ้อนกว่าเนื่องจากมีลักษณะการตัดที่เกิดในสามมิติ



ภาพที่ 2.5 แสดงการตัดเฉือนแบบคมตัดตั้งฉากและการตัดเฉือนแบบคมตัดเอียง

รูปแบบกลไกขบวนการตัดนำไปสู่การทำนายพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตัดเฉือน การตัดแบบตั้งฉากนั้นจะสมมติว่าการตัดเกิดแบบสม่ำเสมอตลอดคมตัด ฉะนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าขบวนการเปลี่ยนภาพที่เกิดขึ้นเป็นแบบระนาบ สองมิติ โดยปราศจากการเปลี่ยนรูปในด้านข้าง ในขบวนการตัดเฉือนถือว่าเป็นขบวนการพื้นฐานของเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation) ในบริเวณขอบเขตการตัดเฉือน จะมีบริเวณหลักของการเกิดการเปลี่ยนรูปคือ บริเวณที่เนื้อวัสดุถูกเปลี่ยนรูปจากการตัดเฉือนที่หนึ่ง(Primary Deformation Zone) เกิดเป็นเศษตัด(Chips) เมื่อคมตัดมีดเคลื่อนที่ตัดลงในเนื้อวัสดุ การไหลตัวของเศษตัดที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านผิวหลบด้านบนบริเวณเศษตัดไหลผ่านมีดตัด ซึ่งทำให้เกิดบริเวณการเปลี่ยนภาพที่สอง(Secondary Deformation Zone) เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้น บริเวณสุดท้ายที่เกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสระหว่างผิวหลบด้านข้างกับเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนแล้วเรียกว่า บริเวณการเปลี่ยนภาพที่สาม(Tertiary Deformation Zone) ในกรณีของการตัดเฉือนแบบสามมิตินั้น การไหลตัวของเศษตัดบนผิวคายเศษของมีดตัดนั้น มีทิศทางการไหลที่ต่างกันกับทิศทางการตัดเฉือน โดยจะถูกกำหนดเป็นทิศทางการไหลตัวเศษตัด(Chip Flow angle) ระนาบการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นก็จะมีทิศทางที่ทำมุมกับขอบคมตัดของมีดตัดซึ่งต้องใช้การการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนทางด้านกลไกและพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น

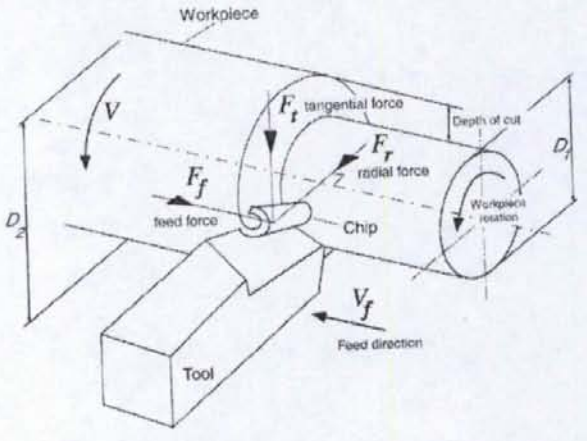


ภาพที่ 2.6 แสดงบริเวณขอบเขตการเปลี่ยนรูปขณะการตัดเฉือน

2.5 กลไกในขบวนการกลึง

งานกลึงเป็นการทำงานพื้นฐานของการตัดเฉือนโลหะและเป็นเครื่องกลการผลิตใช้กันอย่างทั่วไปในขบวนการตัดปาด ปกติแล้วจะใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่ถูกจับด้วยหัวจับที่หมุน การตัดเฉือนเริ่มจากมีดตัดที่มีดตัดต้องถูกจับยึดอยู่บนป้อมมีดจะถูกป้อนให้เคลื่อนที่ขนานกับแกนกลางของหัวจับชิ้นงาน เข้าตัดจิกบนเนื้อของวัสดุงานทำให้เกิดเปลี่ยนรูปได้เป็นเศษตัดและเนื้อวัสดุชิ้นงานผิวใหม่ แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขบวนการกลึง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสุดในขบวนการกลึงคือ ความเร็วตัด(V) อัตราการป้อน(f) และระยะตั้งกินลึก(a) โดยที่ความเร็วตัดเป็นอัตราระยะทางของการตัดเฉือนกับช่วงเวลาที่ใช้ ส่วนอัตราการป้อนจะเป็นระยะทางของมีดตัดที่เคลื่อนในทิศทางแนวแกนต่อการหมุนหนึ่งรอบของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบแรงในขบวนการกลึง

2.6 การสึกหรอของมีดตัด

อายุการใช้งานของมีดตัดนับเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ที่ต้องพิจารณาเมื่อต้องการผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งอายุการใช้งานจะอยู่ในรูปฟังก์ชันของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วตัด อัตราการป้อน มุมคายมีด และอื่นๆ ซึ่งถ้ามีการตั้งสภาวะของตัวแปรเหล่านี้อย่างเหมาะสมแล้ว การใช้งานมีดตัดก็จะให้ผลทางด้านดีด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการหาสภาวะ การตัดที่เหมาะสมนี้เป็นสิ่งที่ทำได้ไม่ยากนัก แต่ถ้าเราตั้งภาวการณ์ตัดยังไม่เหมาะสมแล้วอาจทำให้ เช่น การตั้งความเร็วตัดทีสูงเกินไป ก็จะได้อายุการใช้งานมีดตัดสั้นลง ซึ่งนับว่าเป็นผลเสีย เพราะต้องมีการสับคมมีดตัดหรือเปลี่ยนมีดตัดบ่อยครั้ง ที่เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย หรือตั้งความเร็วตัด ตั้งอัตราการป้อนตัดที่ต่ำเกินไป ก็จะได้อัตราการผลิตที่ต่ำ ดังนั้นการศึกษาถึงธรรมชาติของการสึกหรอมีดตัดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ลักษณะการสึกหรอในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ โดยทั่วไปเกิดใน 2 ลักษณะคือ

1. การสึกหรอที่ค่อยๆ เพิ่มขนาดขึ้น เฉพาะบริเวณ เช่นที่ ผิวด้านมุมคายมีด ผิวด้านมุมหลบมีด
2. การเสียหายที่เกิดขึ้นบนมีดตัดก่อนเวลาอันควร เช่น การแตกหัก การกะเทาะ

การสึกหรอมีดตัดสามารถเกิดได้หลายแบบ ภายใต้สภาวะที่ต่างกันออกไป ชนิดหลักของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุคือ การสึกหรอจาการขัดสี(Abrasion wear) การสึกหรอจากการเกาะยึด (Adhesion wear) และการสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion wear)

การสึกหรอแบบแอ่งหลุ่ม(Crater wear)เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าด้านมุมคายมีด บริเวณที่มีการสัมผัสระหว่างเศษตัดกับผิวหน้ามีดตัด และรวมไปถึงบริเวณที่มีการเกิดการพอกตัวของเศษตัด(Buildup chip) บนผิวมีดตัดด้วย ในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ อุณหภูมิจะเกิดขึ้นสูงมากที่มีดตัด ที่การใช้ความเร็วตัดสูงๆ อาจมีความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิระดับนี้มีดตัดรอบสูง จะเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว เพราะเป็นวัสดุมีดตัดที่มีคุณสมบัติด้อยทางด้านความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง สำหรับในมีดตัดคาร์ไบด์ แม้จะมีคุณสมบัติเด่นด้านคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง แต่แพร่ของอะตอมเกิดขึ้นได้ทำให้เกิดการสึกหรอเช่นเดียวกัน

การสึกหรอแบบแอ่งหลุมนี้เป็นปัจจัยที่กำหนดอายุการใช้งานมีดตัด เพราะแอ่งหลุมที่เกิดนี้ทำให้ขอบตัดมีดอ่อนแอลงเสียงต่อการแตกหักได้ง่าย

การสึกหรอด้านข้างคมตัด(Flank wear)

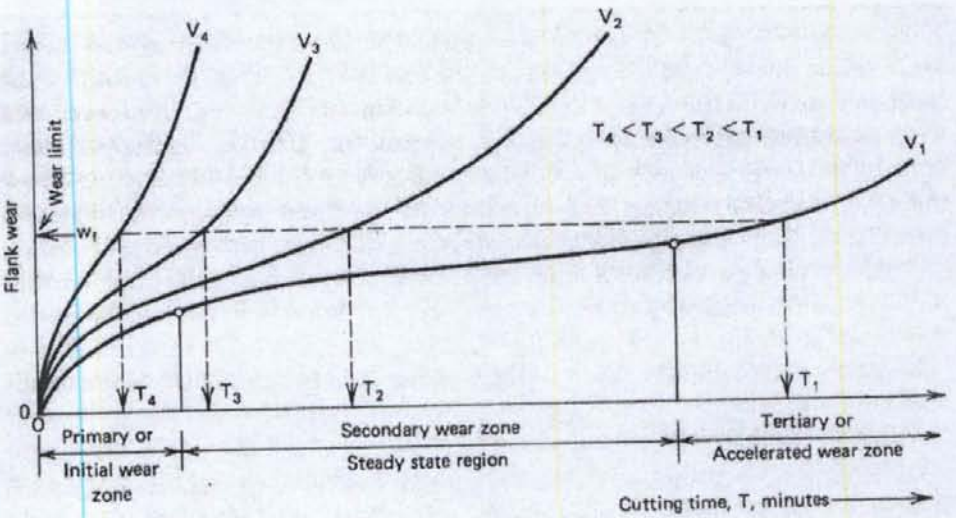
เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างผิวชิ้นงานกับพื้นที่ด้านข้างของมีดตัด เมื่อผิวของเศษตัดชิ้นงานที่มีอนุภาคของแข็งขัดสีอยู่ตลอดเวลากับผิวหน้ามีด จึงทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นเป็น

ลักษณะแถบพื้นที่สึกหรอที่ขนานไปกับทิศทางการตัด ความกว้างแถบสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้เมื่อสังเกตแล้วจะมีลักษณะการเกิดเป็น 3 ช่วง จากภาพที่ 6.1 คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ขอบคมมีดตัดสึกหรออย่างรวดเร็ว

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงการเกิดอัตราการสึกหรอสม่ำเสมอ

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงการสึกหรอรุนแรง



ภาพที่ 2.8 กราฟแนวโน้มอัตราการสึกหรอมีดตัด

ทั่วไปแล้วการวัดค่าอายุการใช้งานมีดตัดมักวัดจากอายุเวลาของมีดตัด ที่ยังคงสภาพคมตัดที่สมบูรณ์ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด และสิ่งที่เป็นตัวควบคุมอายุใช้งานมีดตัดในขณะใช้งานคือ การสึกหรอที่เกิดขึ้นบนมีดตัด ประเภทของการสึกหรอที่เกิดขึ้นแยกออกได้เป็น

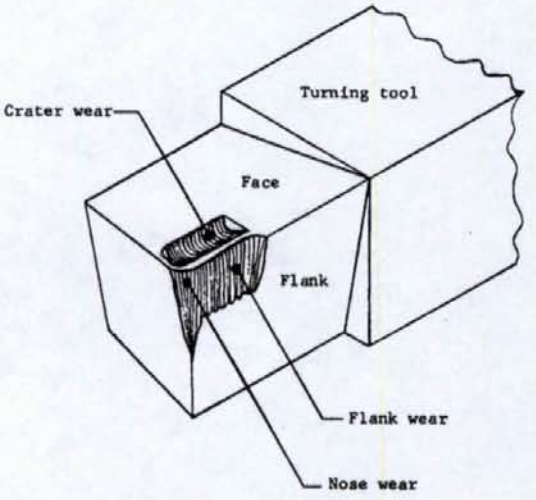
1. การสึกหรือจากการขัดสี(Abrasive Wear)
2. การสึกหรือจากการยึดติด(Adhesion Wear)
3. การสึกหรือจากการแพร่(Diffusion Wear)
4. การสึกหรือจากปฏิกิริยาทางเคมี(Chemical & electrolytic Wear)
5. การสึกหรือจากการเติมออกซิเจน(Oxidation Wear)

ชนิดของการสึกหรอของมีดตัด แบ่งตามบริเวณที่เกิดการสึกหรอมีดังนี้คือ การสึกหรอที่เกิดบริเวณผิวด้วยมุมหลบมีด(Relief Face) เรียกว่า Flank wear การสึกหรอจากการขัดสี เกิดขึ้นจากอนุภาคแข็งที่เกิดบนเศษตัดขัดสีไปกับผิวคายเศษมีดตัดในระหว่างเกิดกระบวนการตัดเฉือน ที่ทำให้มีส่วนของมีดตัดหลุดออกไปเกิดการสึกหรอขึ้นถ้าเกิดขึ้นมากจะเห็นเป็นแถบของการสึกหรอ

(Wear land) เมื่อมีการเสียดสีกับผิวชิ้นงานแล้วทำให้ชิ้นงานขาดความถูกต้องทางด้านขนาด ใช้แรงในการตัดสูงขึ้น ทั่วไปแล้วอัตราการสึกหรือแบบ Flank wear มีรูปแบบดังแสดงภาพที่ 6.2

การสึกหรือมีดตัดบริเวณผิวด้านมุมคายมีด(Rake face) เรียกว่า Crater wear เกิดเป็นลักษณะหลุม การสึกหรอจากการเกาะยึด เกิดจากการแตกหักของการเชื่อมติดกันระหว่างโลหะสองชนิด ในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ การเชื่อมติดเกิดขึ้นระหว่างเศษตัดกับมีดตัด ที่มักเกิดจากกลไกของความเสียดทาน ซึ่งเมื่อรอยเชื่อมติดนี้ถูกดึงให้หลุดไป ก็จะมีส่วนหนึ่งของเนื้อมีดตัดถูกดึงติดไปด้วย ทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งมักไม่มีผลต่ออายุใช้งานมีดตัดนัก แต่เป็นการเพิ่มมุมคายมีดให้มากขึ้นจึงช่วยลดแรงตัดให้ต่ำลง ถ้าการสึกหรอนี้เกิดขึ้นมากแล้วทำให้คมตัดมีดขาดความแข็งแรงแล้วจะนำไปสู่การเปลี่ยนรูปและการแตกหักได้

การสึกหรอจากการแพร่ เกิดขึ้นเมื่ออะตอมในโครงสร้างผลึกของโลหะเคลื่อนย้ายตำแหน่งจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ในกระบวนการตัดเฉือนโลหะและการแพร่เกิดในสภาพของแข็งและที่อุณหภูมิสูง การเคลื่อนที่ของอะตอมของวัสดุมีดตัดย้ายตำแหน่งมายังวัสดุงาน ซึ่งเป็นผลให้โครงสร้างของวัสดุมีดตัดที่มีการเคลื่อนที่ของอะตอมอ่อนแอลง เกิดการสึกหรอได้ง่าย



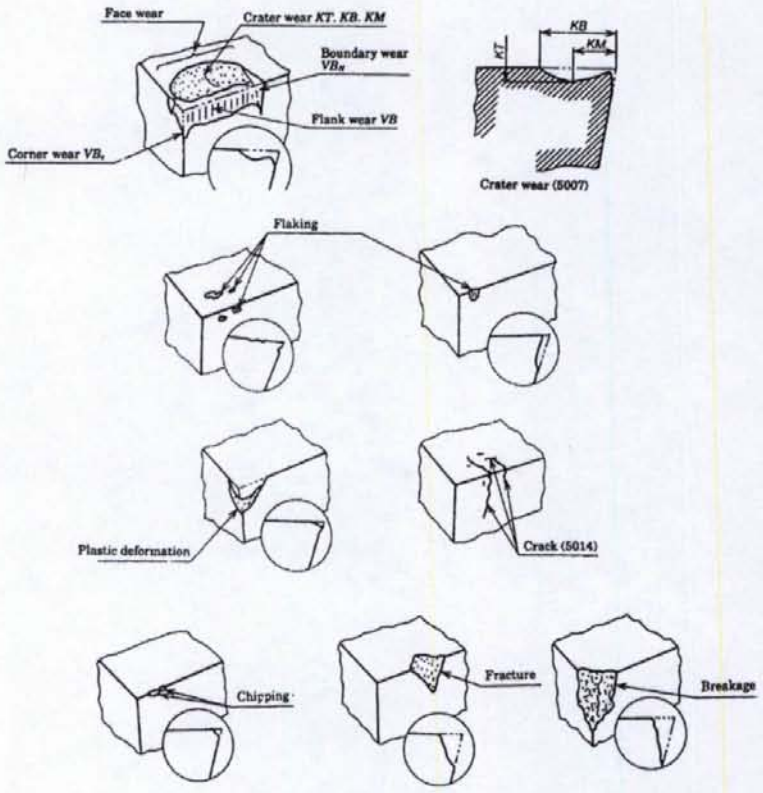
ภาพที่ 2.9 บริเวณการเกิดสึกหรอบนมีดตัด

ในงานกลึงมักพบการสึกหรอ บริเวณจุดที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับส่วนของชิ้นงานที่ไม่ต้องการตัดเฉือนขึ้น ซึ่งการสึกหรอนี้มักเกิดจากการขัดสี และจะเกิดกับการตัดชิ้นงานที่มีชั้นผิวแข็งหรือวัสดุที่เกิด Work hardening เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าผสมนิกเกิล และในบางกรณีการ

สึกหรอแบบนี้เกิดจาก การเติมออกซิเจนจากการใช้น้ำหล่อเย็น หรือโดยปฏิกิริยาทางเคมี การสึกหรอแบบนี้เรียกว่า Notch wear

การสึกหรอที่เกิดบนบริเวณรัศมีมนปลายมีด บนขอบที่ชิดกับผิวหลบมีด เรียกการสึกหรอนี้ว่า Nose radius wear การสึกหรอนี้เหมือนกับเป็นการรวมกันของการสึกหรอแบบ flank และ notch ถ้าเกิดการสึกหรอนี้แล้วทำให้ผิวงานมีคุณภาพลดลง

การแตกหักจากแรงทางกลและจากอุณหภูมิ การแตกหักแบบนี้ มักเกิดจากแรงที่กระทำบนมีดตัดแบบซ้ำๆ จากการตัดแบบไม่สม่ำเสมอเป็นจังหวะ(Interrupted) หรือการตัดที่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงเป็นจังหวะ ถ้าการแตกร้าวที่เกิดขึ้นถ้ามีลักษณะร้าวตั้งฉากกับขอบคมตัด จะเกิดจากอุณหภูมิร้อน ถ้าลักษณะการแตกร้าวเกิดขนานกับขอบคมตัด จะเป็นผลมาจากแรงที่กระทำแบบซ้ำๆ การร้าวทั้งสองแบบนี้ จะนำไปสู่การแตกหรือกะเทาะต่อไป เรียกการแตกแบบนี้ว่า Thermal and mechanical wear



ภาพที่ 2.10 รูปแบบความเสียหายที่เกิดบนมีดตัด

ในการตัดเฉือนวัสดุอ่อน เช่น อะลูมิเนียมผสมที่ความเร็วตัดต่ำ มักเกิดการเกาะพอกตัวของเศษตัดบนผิวของมีดตัดเรียกว่า Edge buildup ซึ่งเป็นผลจากการเกาะตัวแน่นของเศษตัดนี้ จะทำให้เกิดความไม่เสถียรในระหว่างการตัด ทำให้เกิดการกะเทาะบนมีดตัดได้ การหลีกเลี่ยงการเกิดเศษพอกนี้ทำได้โดย เพิ่มมุมคายให้สูงขึ้น เพิ่มความราบเรียบของผิวมีดตัด (< 5-10 μm) ใช้สารหล่อลื่นระหว่างการตัด ลดอุณหภูมิโดยใช้สารหล่อเย็น เพิ่มความดันฉีดสารหล่อเย็น เพิ่มความเร็วตัด

2.7 อายุการใช้งานมีดตัด

การจัดการเกี่ยวกับสภาวะในการตัดเฉือนให้เหมาะสมนั้น นับว่าเป็นสิ่งเบื้องต้นที่นำมาเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในขบวนการตัดเฉือน ในแง่ของผู้ผลิตแล้ว เป้าหมายที่ต้องการในการผลิตคือ ผลิตชิ้นงานให้ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า และก่อให้เกิดผลประโยชน์มากสุดในการค้า นั้นคือต้องผลิตสินค้าให้ได้ตามความต้องการและต้องประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตให้มากที่สุด

เพื่อที่จะทำให้การผลิตสินค้าได้ตามต้องการข้างต้นในกรณีของการตัดเฉือน(Machining) ดังนั้น การใช้เครื่องจักร การใช้มีดตัดต้องมีการตรวจวิเคราะห์อย่างละเอียด ถ้าการวิเคราะห์สำเร็จแล้วเราจะได้สมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายในการผลิตและอัตราการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

สภาวะของการทำงานที่ก่อให้เกิดผลประโยชน์มากสุด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การผลิต ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางเทคนิคในการผลิตให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เราสามารถเพิ่มอัตรากรผลิตให้สูงขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของมีดตัด หรือการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักร หรือเปลี่ยนแปลงภาวะของการตัด เช่นให้มีการหล่อเย็น เป็นต้น ในกรณีที่ให้มีการเปลี่ยนเครื่องจักรคงทำได้ลำบาก เนื่องจากมีต้นทุนสูง จึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปัจจัยอื่นๆ เช่นเปลี่ยนชนิดมีดตัด พิจารณาว่าถ้ามีดตัดที่ใช้ในการผลิตไม่มีการสึกหรอ การที่จะเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ต่ำลง สามารถทำได้อย่างง่ายดาย โดยเพิ่มความเร็วในการทำงานของเครื่องจักรให้เพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ได้จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาเพิ่มมากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อหน่วยชิ้นงานลดต่ำลงด้วย แต่อย่างก็ตามในความเป็นจริงแล้วมีดตัดทุกชนิดต้องมีการสึกหรอ อัตราในการสึกหรอของมีดตัดจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับว่าชนิดของมีดตัดนั้นๆ และขึ้นอยู่กับความเร็วตัดที่ใช้ด้วย คือถ้าใช้ความเร็วตัดสูงอัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย แต่ถ้าใช้ความเร็วตัดที่ต่ำ อัตราการสึกหรอที่เกิดก็จะต่ำไปด้วยและยังเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตขึ้นด้วย ด้วยเหตุผลที่กล่าวนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอและภาวะของการผลิตที่ต้องการ

อายุการใช้งานมีดตัด เป็นการวัดความสามารถของมีดตัดที่ยังคงสภาพการตัดเฉือนงานได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งสามารถกำหนดได้จาก

- อายุเวลาของมีดตัด
- อายุจากระยะทางของเศษตัดที่ตัดได้
- อายุจากปริมาตรของเศษตัดที่ตัดได้
- อายุจากจำนวนของมีดตัดที่ใช้

ตามมาตรฐาน ISO ได้กำหนดเกณฑ์สภาพการตัดเฉือนด้วยขนาดของการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนมีดตัด แต่ในความเป็นจริงแล้วขนาดของการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ จะมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ จึงมีความจำเป็นที่ต้องกำหนดตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอด้วย เช่นตำแหน่งของการเกิดการสึกหรอแบบแอ่งหลุม

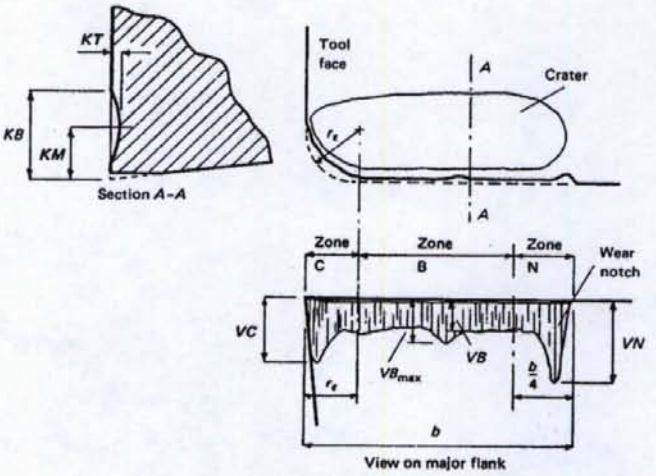
สำหรับการสึกหรอด้านข้างผิวหลบ ตำแหน่งการสึกหรอแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเกิดขึ้นบริเวณมุมปลายมีดที่เกิดการสึกหรอสูง ช่วงกลางเป็นการสึกหรอเป็นแบบสม่ำเสมอ และช่วงสุดท้ายเป็นการสึกหรอแบบ Notch

ข้อกำหนดของ ISO สำหรับมีดตัดรอบสูงหรือ มีดตัดเซรามิค
ขนาดของการสึกหรอที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดอายุใช้งานมีดตัด มีเกณฑ์ดังนี้คือ

1. มีดตัดเกิดการแตกหัก
2. ขนาดการสึกหรอในช่วงกลาง VB = 0.3 มม. เมื่อการสึกหรอเป็นแบบสม่ำเสมอ
3. ขนาดการสึกหรอในช่วงกลาง VB_{max} = 0.6 มม. เมื่อการสึกหรอเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ

ข้อกำหนดของ ISO สำหรับมีดตัดคาร์ไบด์
ขนาดของการสึกหรอที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดอายุใช้งานมีดตัด มีเกณฑ์ดังนี้คือ

1. ขนาดการสึกหรอในช่วงกลาง VB = 0.3 มม. เมื่อการสึกหรอเป็นแบบสม่ำเสมอ
2. ขนาดการสึกหรอในช่วงกลาง VB_{max} = 0.6 มม. เมื่อการสึกหรอเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ
3. ขนาดความลึกสูงสุดของการสึกหรอแบบแอ่งหลุม KT = 0.06 + 0.3f ,เมื่อ f คืออัตราการป้อน



ภาพที่ 2.11 การสึกหรอบนมีดตัดตามเกณฑ์ของ ISO

จากการศึกษาของ เทเลอร์(F. W. Taylor) ได้ความสัมพันธ์ของอายุการใช้งานกับความเร็วตัดที่ใช้ อยู่ในรูปสมการ

$$V \cdot T^n = C$$

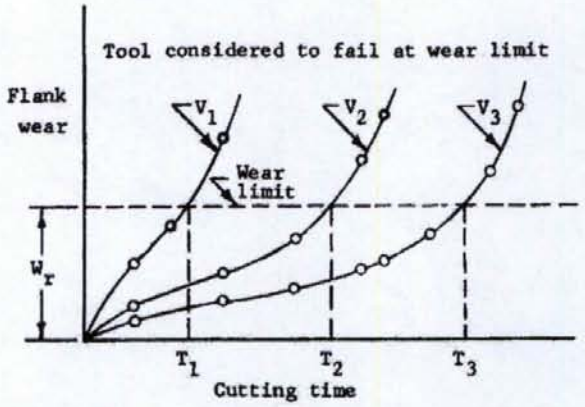
เมื่อ V คือ ความเร็วตัด

T คือ อายุใช้งานมีดตัดที่วัดจากเวลาที่ใช้ตัดเฉือนวัสดุจนการสึกหรอถึงเกณฑ์ที่กำหนด

n คือ ตัวเลขยกกำลังสภาวะการตัด

C คือ ค่าคงที่

การตัดเฉือนวัสดุงานโดยใช้มีดตัด จะได้ค่า คงที่ และตัวเลขยกกำลังสภาวะการตัดที่เฉพาะ เมื่อการตัดมีการเปลี่ยนวัสดุงาน หรือเปลี่ยนมีดตัด ก็จะได้ค่าเหล่านี้มีขนาดต่างกันออกไป ยกตัวอย่างในการทดลองเพื่อหาค่าต่างๆ ในสมการอายุใช้งานของเทเลอร์ โดยใช้มีดตัดรอบสูงกลึงตัดวัสดุงานเหล็กคาร์บอนปานกลาง โดยกำหนดให้ใช้อัตราป้อน และความลึกตัดคงที่ ข้อมูลที่ได้จากการวัดขนาดของการสึกหรอด้านข้างผิวหน้ามุมหลบ กับเวลาที่ใช้ในการตัดกลึง และในทดลองมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความเร็วตัดที่ใช้ให้แตกต่างกันออกไป จะได้ข้อมูลลักษณะเดียวกับในภาพที่ 6.4



ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงข้อมูลทดลองตัดกลึงหาความสัมพันธ์อายุการใช้งานและความเร็วตัดจากการตั้งความเร็วตัด 3 ค่า

สมมติการทดลอง ใช้ความตัดที่ต่างกันไป 3 ค่า โดยที่ $V_1 > V_2 > V_3$ จะได้อายุใช้งานที่สอดคล้องกับค่าความเร็วตัดที่ใช้ เช่นเมื่อใช้ความเร็วตัดสูง จะได้อายุการใช้งานสั้น ถ้าใช้ค่าความเร็วตัดต่ำ ก็จะได้อายุการใช้งานยาวกว่า จากสมการ (6.1) สามารถเขียนใหม่ในรูป

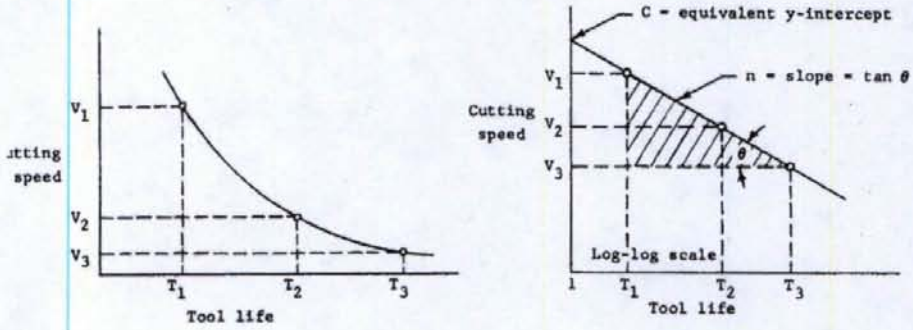
$$V_1(T_1)^n = V_2(T_2)^n = V_3(T_3)^n = C$$

เมื่อนำข้อมูลความเร็วตัดและอายุการใช้งานที่ได้จากการทดลอง ไปเขียนในกราฟ จะได้ความสัมพันธ์ลักษณะ Exponential และเมื่อนำไปเขียนในกราฟ ล๊อก-ล๊อก (Log-Log) จะได้ความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์นี้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เป็น

$$y = m \cdot x + b$$

เมื่อ b คือ จุดตัดของเส้นตรงบนแกน y

m คือ ความชันของเส้นตรง



รูป 2.13 แสดงข้อมูลทดลองหาสมการอายุการใช้งาน

จากข้อมูลที่เขียนในสเกลล็อก นำมาแสดงในสมการเส้นตรง ได้เป็น

$$\log y = m\log x + \log b$$

หรือ $$\log V = n\log T + \log C$$

ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปสมการอายุการใช้งาน $V \times T^n = C$

เมื่อ n คือค่าความชันเส้นตรงบนกราฟล็อก-ล็อก และ C คือจุดตัดเส้นตรงบนแกนความเร็วตัด จากภาพที่5.3 สมการความชันเส้นตรงเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$n = \tan\theta = \frac{\log V_1 - \log V_3}{\log T_3 - \log T_1}$$

และจุดตัดเส้นตรงบนแกน y หาได้จากสมการที่ (6.3) เมื่อให้ log T = 0 ซึ่งก็คือ T=1 นั้นเอง แทนค่าในสมการ 6.5

$$\log V = n(0) + \log C$$

จะได้ $$V = C$$

สรุปได้ว่า ค่า C คือค่าความเร็วตัดที่ใช้แล้วทำให้มีดตัดมีอายุการใช้งานเท่ากับ 1 พอดี

การหาค่าต่างๆ ในสมการอายุใช้งานของเทเลอร์ สามารถหาได้โดยวิธีกราฟ จากรูป 6.8 ลากเส้นตรงต่อไปตัดแกน y อ่านค่าจะได้ค่า C ได้ และความชันของเส้นตรงได้จากการวัดมุม θ แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่กล่าวมา

สำหรับในกรณีที่คิดผลที่เกิดจากตัวแปรอื่นๆ เช่น ความหนาเศษตัด ความลึกตั้งตัด รูปแบบสมการอายุการใช้งานจะเปลี่ยนอยู่ในรูป

$$V \cdot T^n d^x f^y = C$$

เมื่อ f คืออัตราการป้อนตัด, d คือความลึกตั้งตัด และ C, x, y คือค่าคงที่จากการทดลอง