

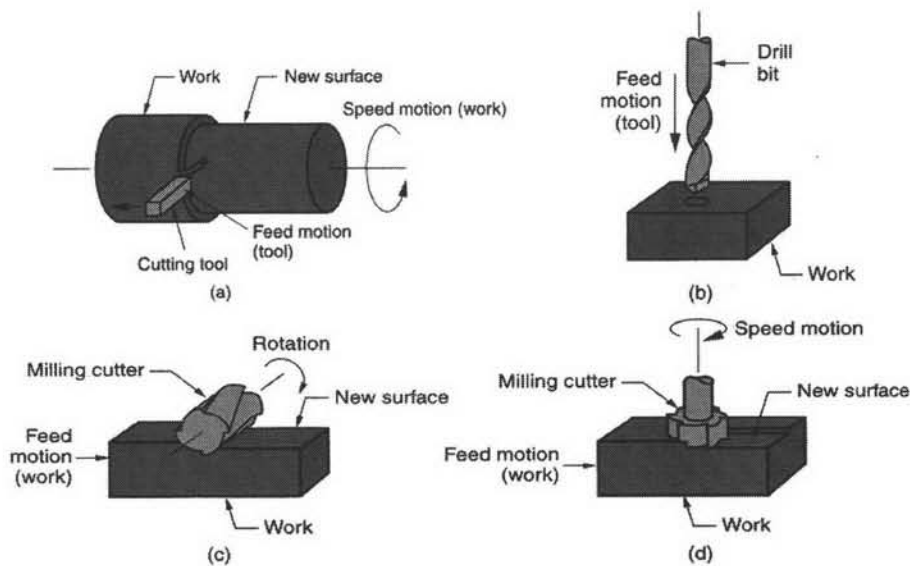
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1. กระบวนการตัด (Machining Process) ^[2]

กระบวนการตัดหมายถึงการกำจัดเนื้อวัสดุออก การกำจัดเศษโลหะออก การใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยีเนื่องจากมีข้อดีคือ ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท สร้างชิ้นงานขนาดและรูปร่างต่างๆ ได้ มีความแม่นยำสูง และผิวชิ้นงานสำเร็จมีคุณภาพดี แต่มีข้อเสียคือ มีเศษวัสดุที่ต้องทิ้งเยอะ และใช้เวลาปฏิบัติการนาน รูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการตัดที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ 3 อย่างคือ การกลึง การเจาะ และการกัด

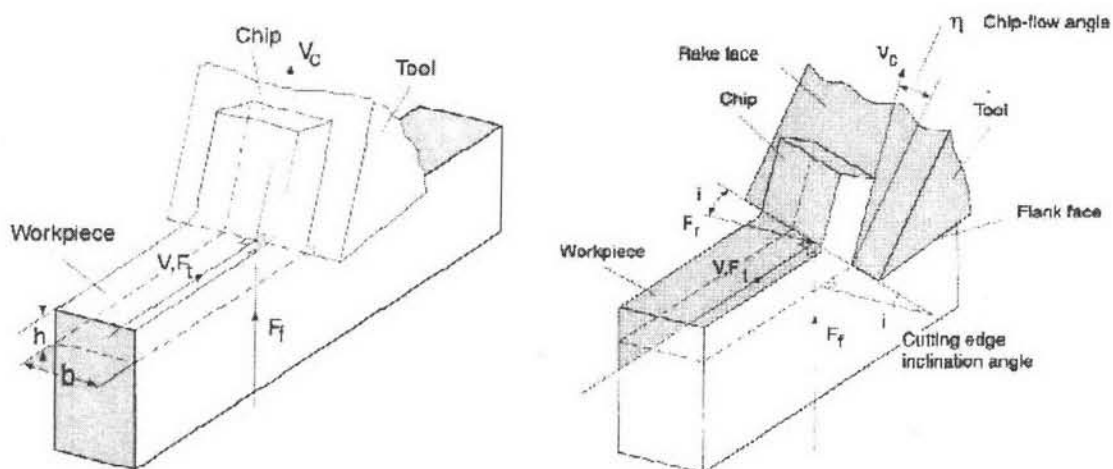


รูปที่ 2.1. กระบวนการการตัดต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ ^[2]

2.1.2. ทฤษฎีการเกิดเศษโลหะในการตัดโลหะ (Theory of Chip Formation) ^{[2], [3]}

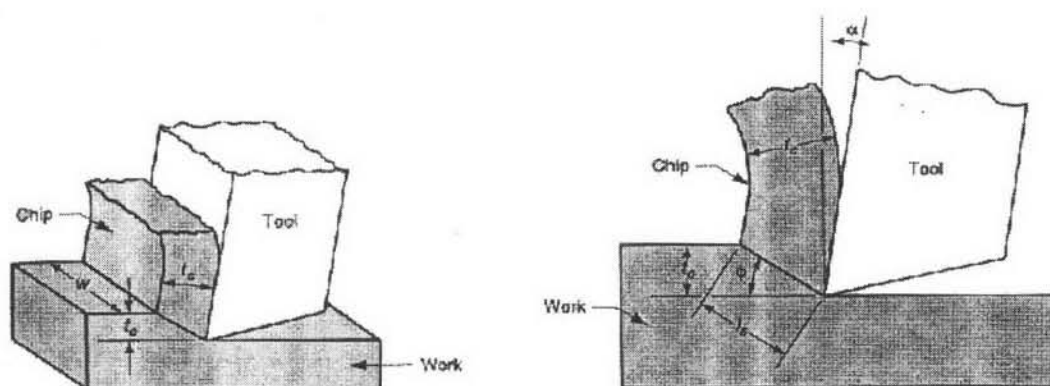
ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงกระบวนการตัดโลหะจะเป็นรูปแบบมุมเอียง (Oblique Cutting) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งซับซ้อนต่อการวิเคราะห์ แต่เราก็สามารถใช้รูปแบบการตัดแบบมุมตั้งฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์ได้ ซึ่งจะทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นมาก ถ้าคมตัดของ

เครื่องมือตัดฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่การป้อนจะทำให้สามารถลดการวิเคราะห์จาก 3 มิติมาเป็นสองมิติได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2. แสดงการตัดโลหะแบบมุมเอียง และมุมตั้งฉาก [2]

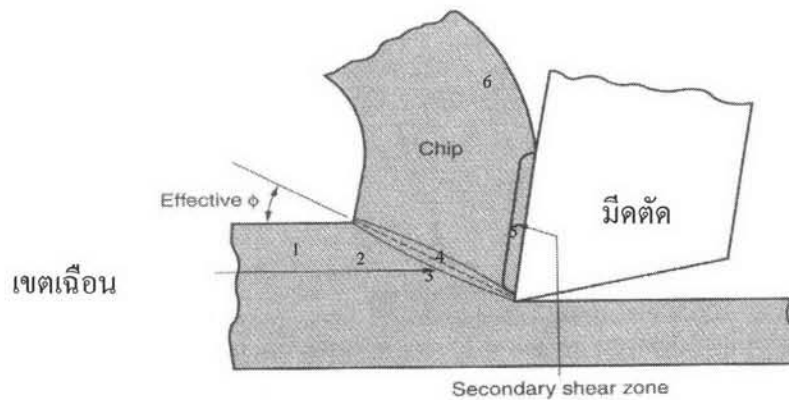
โดยนิยามแล้ว รูปแบบการตัดมุมตั้งฉาก จะหมายถึงการใช้คมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด เครื่องมือตัดจะเฉือนเข้าไปในวัสดุชิ้นงานและทำให้เกิดเศษโลหะตามระนาบเฉือน (Shear Plane) และทำมุมกับระนาบของผิวชิ้นงานเป็นมุมเฉือน (Shear angle) บริเวณระนาบเฉือนจะเป็นบริเวณที่พลังงานเชิงกลส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการตัด และทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น



รูปที่ 2.3. แสดงภาพ 3 มิติของการตัดแบบมุมตั้งฉาก ซึ่งมองลดมิติลงเหลือ 2 มิติ [2]

สำหรับรูปแบบการตัดแบบมุมตั้งฉาก รูปร่างของเครื่องมือตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุม คือ มุมคาย (Rake angle) และ มุมหลบ (Clearance angle) มุมคายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความหนาของเศษโลหะ (t_0) ในขณะที่เศษกลึงโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะลดลงเป็น t_c อัตราส่วนระหว่าง t_0 กับ t_c เรียกว่า Chip thickness ratio หรือ Chip ratio อัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

ในการเกิดเศษโลหะจริงในการตัดจะแตกต่างจากการตัดแบบมุมตั้งฉาก เพราะว่กระบวนการการเปลี่ยนรูปจะไม่ได้เกิดบนระนาบเท่านั้น แต่จะเกิดเป็นบริเวณ (Zone) รูปแบบการเกิดเศษโลหะที่เกิดขึ้นจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4. การเกิดเศษโลหะที่เกิดขึ้นจริงในการตัด ^[2]











นอกจากการเฉือนที่เกิดในเนื้อวัสดุแล้ว ยังมีการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณอื่นอีกด้วย เป็นบริเวณการเฉือนระหว่างผิวกาย (Rake face) และเศษกลึงโลหะ ในรูปที่ 2.4 ได้แสดงให้เห็นถึงบริเวณเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด ซึ่งเรียกว่า บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 (Primary shear zone) และ บริเวณการเฉือนลำดับที่ 2 (Secondary shear zone)

ลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตัด สภาพในการตัดต่างๆ รูปแบบการเกิดของเศษโลหะสามารถแยกได้เป็น 3 แบบคือ

- 1) เศษโลหะเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก เกิดกับวัสดุที่เปราะและแตกง่าย ความเร็วในการตัดต่ำ ความร้อนที่เกิดต่ำ ผิวชิ้นงานไม่ดี อายุเครื่องมือตัดนาน

- 2) เศษโลหะยาว ม้วนเป็นเส้น เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายมาก ความเร็วในการตัดสูงกว่าแบบแรก ผิวชิ้นงานที่ได้เรียบ ใช้แรงตัดต่ำ
- 3) เศษโลหะเกิดการหลอมติดกับเครื่องมือตัดหรือชิ้นงาน เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายน้อย ความเร็วในการตัดต่ำ ผิวชิ้นงานที่ได้ไม่เรียบ ใช้แรงตัดสูง

นอกจากนี้เศษโลหะที่เกิดอาจแบ่งได้ตามรูปร่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ribbon chips	tangled chips	corkscrew chips	helical chips	long tubular chips	short tubular chips	spiral tubular chips	spiral chips	long comma chips	short comma chips
					good				
					acceptable				
unfavourable									

รูปที่ 2.5. ประเภทของเศษโลหะที่เกิดขึ้นแบ่งตามรูปร่าง ^[3]

2.1.3. วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Material) ^[3]

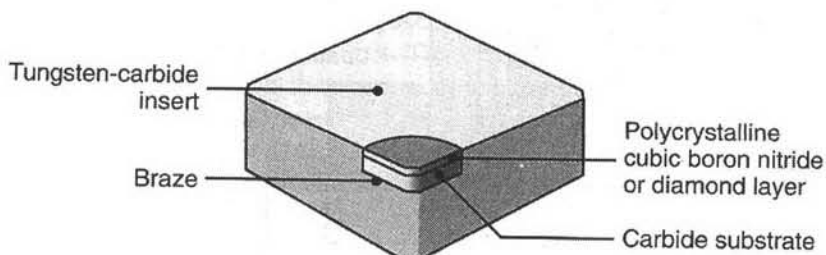
เครื่องมือตัด (Cutting tool) ในอุดมคติจะต้องมีความแข็งแรงสูง รับแรงกระแทกได้ดี ทนต่อปฏิกิริยาเคมี แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในเครื่องมือตัดชนิดเดียว

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels) เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ตลับ เครื่องมือตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุเครื่องมือตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกแล้ว กลับให้คมได้ง่าย แต่ด้วยความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง

เครื่องมือตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำเหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels) ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของเครื่องมือตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือน ได้ดี โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งสูง (58-64 HRC) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุที่ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

- 2) คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide) มีความแข็งสูงทุกๆอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่น และนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น เครื่องมือตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้
- 3) โคตต์ ทูล (Coated tools) ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงาน อายุเครื่องมือตัดนานกว่าเครื่องมือตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า วัสดุที่ใช้เคลือบมักจะเป็นพวกไทเทเนียมไนไตรด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ความหนาชั้นเคลือบประมาณ 5-10 ไมครอน
- 4) เซรามิก (Silicon-Nitride-Based Ceramics)^[1] ได้ถูกพัฒนาขึ้นในยุค 1970 เครื่องมือตัดชนิดนี้เป็นส่วนผสมของ ซิลิกอนไนไตรด์กับส่วนผสมหลายๆชนิดของอลูมิเนียมออกไซด์ อิตเทรียมออกไซด์ (yttrium oxide) และ ไทเทเนียมออกไซด์ เครื่องมือตัดชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ มีความทนทาน แข็ง และ ทนต่ออุณหภูมิ ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดชนิดนี้คือ SIALON ซึ่งมาจากคำย่อของธาตุต่างๆที่นำมารวมกัน คือ ซิลิกอน อลูมิเนียม ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ซึ่งวัสดุชนิดนี้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้สูงกว่าซิลิกอนไนไตรด์ เหมาะสำหรับการตัดชิ้นงานประเภทเหล็กหล่อ และ โลหะอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของนิกเกิล ๓ ความเร็วตัดปานกลาง อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตัดที่มีส่วนผสมของซิลิกอนไนไตรด์ไม่เหมาะสำหรับการตัดวัสดุประเภทเหล็กกล้าผสมคาร์บอน เพราะมีปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุชนิดนี้กับเหล็กเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง
- 5) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride-cBN)^[1] ในขณะนี้ cBN เป็นวัสดุที่มีความแข็งรองลงมาจากเพชร วัสดุชนิดนี้ถูกแนะนำขึ้นในปี 1962 ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Borazon คิวบิกโบรอนไนไตรด์สร้างขึ้นโดยการเชื่อมชั้น ผลึกคิวบิกโบรอนไนไตรด์ผสม (polycrystalline cubic boron nitride) ที่มีความหนาขนาด 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร เข้ากับ ชั้นสารตั้งต้นคาร์ไบด์ โดยกระบวนการซินเตอร์ริง (sintering) ภายใต้ความดันสูงและอุณหภูมิ

สูง ในขณะที่ชั้นวัสดุคาร์ไบด์นั้นทำให้เกิดคุณสมบัติที่มีความต้านทานต่อแรงกระแทก ชั้น cBN ก็จะทำให้เกิดความต้านทานการสึกหรอสูง และความแข็งแรงของคมเครื่องมือตัด เครื่องมือตัดคิวบิกโบรอนไนไตรด์นั้น ยังได้มีการผลิตขึ้นแบบขนาดเล็กโดยไม่มีชั้นของสารตั้งต้นคาร์ไบด์อีกด้วย



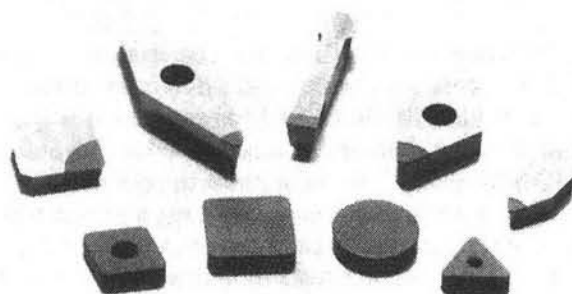
รูปที่ 2.6. ส่วนประกอบชั้นต่างๆของเครื่องมือตัดคิวบิกโบรอนไนไตรด์^[1]

ที่อุณหภูมิสูง cBN จะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเหล็กและนิเกิล มีความต้านทานในการออกซิเดชันสูง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการตัดเหล็กชนิดแข็งและอัลลอยด์อุณหภูมิสูง ควรหลีกเลี่ยงกระบวนการตัดที่มีความสั่นสะเทือนมากๆเพราะเครื่องมือตัด cBN มีความเปราะและยิ่งไปกว่านั้น การที่จะหลีกเลี่ยงการแตกหักของเครื่องมือตัดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วควรที่จะเลือกใช้สารหล่อเย็นในขณะที่ทำการตัดด้วย

- 6) ไดมอนด์ (Diamond)^[1] เป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุดเท่าที่รู้จักกัน ในแง่ของการทำเป็นเครื่องมือตัดนั้น มีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ อาทิเช่น มีแรงเสียดสีต่ำ มีความต้านทานการสึกหรอสูง และมีความสามารถในการคงไว้ซึ่งความคมของคมตัด เครื่องมือตัดไดมอนด์นั้น จะใช้เมื่อผิวสำเร็จของชิ้นงานมีความเรียบสูงอยู่แล้ว และเมื่อต้องการมิติชิ้นงานที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กับวัสดุประเภท อัลลอยด์ไร้เหล็กชนิดอ่อน วัสดุที่ไม่ใช่โลหะที่ขัดได้ และวัสดุที่เป็นโลหะ (โดยเฉพาะ อลูมิเนียม ซิลิกอน อัลลอยด์บางชนิด) ปัจจุบันได้มีการใช้เพชรสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลาย เพราะเพชรธรรมชาตินั้นมีข้อบกพร่องบางประการ และไม่สามารถคาดเดาประสิทธิภาพของมันได้

เครื่องมือตัดเพชรผลึกเดี่ยวที่น้ำหนักต่างๆนั้น ใช้สำหรับงานชนิดพิเศษ อย่างไรก็ตาม ได้มีการแทนที่โดยเครื่องมือตัดแบบผลึกไดมอนด์ผสม (Polycrystalline diamond-PCD) ซึ่งเครื่องมือตัดประเภทนี้ประกอบด้วยผลึกเพชรสังเคราะห์หลอมเหลวโดยความดันสูงและอุณหภูมิสูง ผ่านกระบวนการให้มีความหนาประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร เชื่อมเข้ากับชั้นสารตั้งต้นคาร์ไบด์

เครื่องมือตัดนี้มีลักษณะคล้ายกับเครื่องมือตัดแบบคิวบิกโบรอนไนไตรด์ การเรียงตัวกันอย่างสุ่มของผลึกเพชรเป็นโครงสร้างป้องกันการแตกร้าวของเครื่องมือตัด เป็นการเพิ่มความทนทานของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 2.7. เครื่องมือตัดแบบผลึกโคมอนด์ผสม ^[1]

รูปร่างและความคมของเครื่องมือตัดนั้นมีความสำคัญ แต่เนื่องจากเพชรมีความเปราะ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้มุมคายตัด (Rake angles) เพื่อให้ได้คมตัดที่มีความแข็งแรง ต้องติดตั้งเครื่องมือตัดอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ได้ซึ่งอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่เหมาะสมที่สุด การสึกหรอของเครื่องมือตัดอาจเกิดขึ้นจากการร่อนออกเป็นเศษเล็กๆ (สาเหตุจากความเครียดของอุณหภูมิ และการออกซิไดเซชัน) และจากการเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอน (สาเหตุจากความร้อนขณะตัด) เครื่องมือตัดโคมอนด์นั้นสามารถใช้ได้เกือบทุกๆ ความเร็วตัด แต่เหมาะกับความเร็วต่ำมากที่สุด ในกรณีที่ต้องการให้เครื่องมือตัดโคมอนด์ผลึกเดี่ยวมีการแตกร้าวน้อยที่สุดนั้น จะต้องทำการลับคมเมื่อเครื่องมือตัดที่อ โดยเร็ว และเนื่องจากเครื่องมือตัดโคมอนด์มีการดึงดูตทางเคมีเป็นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการตัด เหล็กผสมคาร์บอน นิกเกิล และ อัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์

2.1.4. ความสามารถในการตัด (Machinability)

ความสามารถในการกลึงของวัสดุ สามารถนิยามได้ด้วยปัจจัย 3 อย่างคือ

- 1) ความเรียบผิวสุดท้าย และความสมบูรณ์ของชิ้นงาน
- 2) อายุของเครื่องมือตัด
- 3) แรงและกำลังที่ใช้ในการตัด

ความสามารถในการตัดที่ดีบ่งบอกได้ด้วยปัจจัยดังกล่าว สำหรับการควบคุมเศษโลหะ ถ้าเศษโลหะไม่เกิดการแตกหัก เกิดเศษโลหะที่ม้วนยาว ก็จะทำให้เกี่ยวข้องกับชิ้นงาน กระบวนการตัดเป็นเรื่องที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงทำให้ยากที่จะหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณในการกำหนดความสามารถในการตัดของแต่ละวัสดุได้ โดยทั่วไปแล้ว มักจะใช้อายุของเครื่องมือตัดและความเรียบผิวเป็นดัชนีที่บอกถึงความสามารถในการตัด

2.1.5. ผิวสำเร็จ (Surface Finish) ^[4]

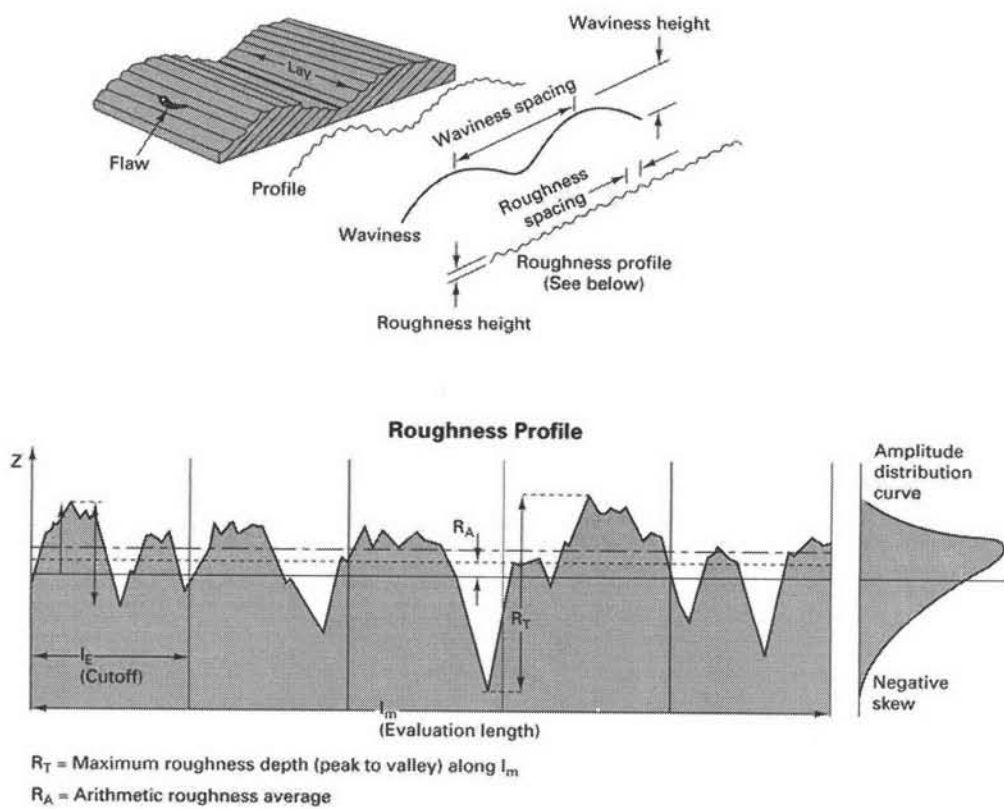
ลักษณะของผิวสำเร็จ (Surface finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

- 1) ความหยาบ (Roughness): จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ซิดกันหลายๆ ช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำดำเนินด้วย cutting tool ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัด โดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า “cut-off length” หรือ “roughness sampling length”
- 2) รอยคลื่น (Waviness): ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยดำเนินบนชิ้นงานหรือ เครื่องมือตัดที่เกิดจากรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด
- 3) รอยดำหนียว (Lay): เป็นรอยดำหนียวที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและเครื่องมือตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและ tool
- 4) รอยดำหนิมุ่ม (Surface Flaw): เป็นรอยดำหนิมุ่มที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจาก รอยดำหนิมุ่มที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ
- 5) ผิวสำเร็จ (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำดำเนินเข้าช่วย บางครั้งก็ใช้เป็นลักษณะกาชหรือของไหลไหลผ่าน บางครั้งก็ใช้สายดาตูโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางครั้งก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง

ผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของเครื่องมือตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุของชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด

โดยทั่วไปแล้วความหยาบควรจะมีค่าน้อย (หรือมีความเรียบผิวชิ้นงานดี) เมื่อมีรอยดำหนิมุ่มเนื่องจากภาระในการตัดและการสั่นสะเทือนมีค่าน้อย เครื่องมือตัดไม่แหลมมาก เครื่องมือตัดและชิ้นงานมีฐานที่มั่นคง วัสดุของชิ้นงานดี ไม่มีรอยดำหนิมุ่ม รอยร้าว ฟองอากาศ

มาจากก่อนหน้า การตัดได้ศูนย์ ขอบตัดของเครื่องมือตัดไม่มีการแตกหัก การเกิดทำให้เกิดเศษ โลหะหลอมติดเครื่องมือตัด ผลจากพารามิเตอร์ต่างๆนี้ดังนี้ คือ รูปทรงของเครื่องมือตัด มุมหลบคมตัดข้าง และ คมตัดท้าย



รูปที่ 2.8. รายละเอียดของผิวชิ้นงาน [5]

2.1.6. การออกแบบการทดลอง

2.1.6.1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล [6]

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง นั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เปรสิเคต (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในการทดลองบางอย่าง เราอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายความว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆนั่นเอง และเราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

กำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับเรพลิเคตที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้งถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้น การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomize design)

ตารางที่ 1.1. รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	⋮				
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{ann}$

ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถว (Row) ของปัจจัย $A: \beta_j$ หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ของปัจจัย $B: (\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j และ ε_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกัน สมมติว่าผลที่เกิดจาก อันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรพลิเคต n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A และ B มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นเราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } \beta_j \neq 0$$

นอกจากนั้นแล้ว เรายังสนใจผลที่จะทราบว่า อันตรกิริยาที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$\left. \begin{array}{l} H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \\ H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \end{array} \right\} \text{for all } i, j$$

การอธิบายถึงการทดสอบสมมติฐานเหล่านี้ใช้จะการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัย

2.1.6.2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) คือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรผัน (Variance) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน (Montgomery, 1991)

ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูลอาจเขียนเป็นสมการได้เป็น ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้น ไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆปัจจัยที่ทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่างตัวแปรตาม ซึ่งเป็นข้อมูลที่เรารวผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่มีค่าเดียวแต่จะมีหลายๆค่าซึ่งเรียกว่าระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามจริงๆแต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลอง (Treatment) กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ตัวแปรต่างๆเพื่อหาค่าตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองจึงมักจะต้องการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย ถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเจาะจง (Fixed effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าการเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

หลักการทำ ANOVA เป็นการใช้ความแปรปรวนมาวิเคราะห์ซึ่ง R.A. Fisher ได้ทำการวิเคราะห์ความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของค่าความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย จากนั้นนำความแตกต่างย่อยๆนั้นมาเปรียบเทียบ ถ้าความแตกต่างใดๆมีค่ามากแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ข้อดีของการใช้ ANOVA เป็นการแก้ปัญหาการเพื่อของความเสี่ยง (Inflated risk)

ในกรณีของ Single Factor มีรูปแบบการทดลองดังนี้

- 1) Complete Randomized Design (CRD) เหมาะสำหรับที่จะใช้กับ Uncontrollable Factor ที่มีขนาดไม่โตนัก และไม่มี noise factor การทดลองจะยึดหลักการทำให้แบบสุ่ม และการทำซ้ำ
- 2) Randomized Block Design (RBD) ต้องมีการทำสุ่มทุกครั้ง ทำซ้ำทุกการทดลองและมีการทำบล็อก
- 3) Latin Square Design (LSD)

ในกรณี Multi Factor มีรูปแบบการทดลองดังนี้

- 1) General Factorial ซึ่งใช้กับการทดลองที่มี 2 ปัจจัยขึ้นไป จึงทำให้เกิดผลของอิทธิพลร่วม (interaction effect) และอิทธิพลหลัก (main effect) ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยร่วมคือผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนไปแล้วทำให้อิทธิพล (effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย
- 2) Fractional Factorial Design

2.1.7. ทฤษฎีการตัดแบบสั้นตามแนวแกนสองแกนพร้อมกัน ¹⁶⁾

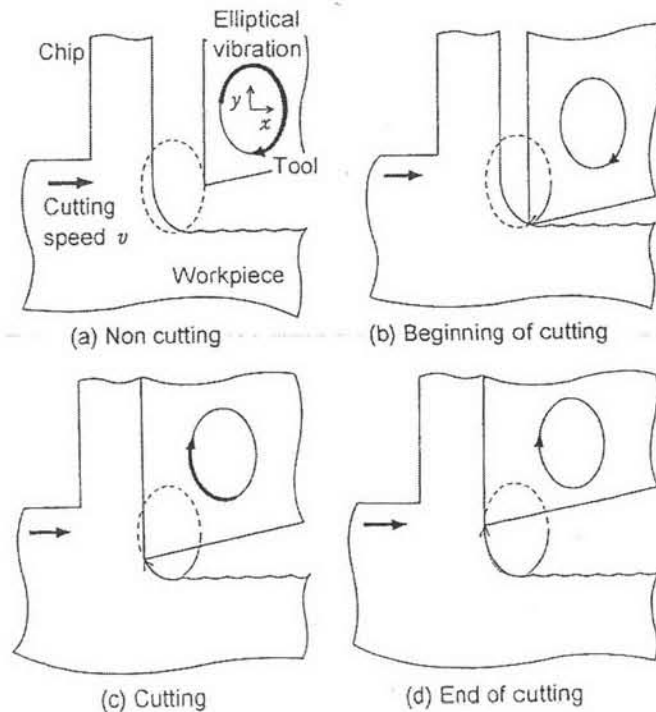
กลไกของการตัดแบบสั้นตามแนวแกนสองแกนพร้อมกันสามารถอธิบายได้ดังนี้

เริ่มต้น เครื่องมือตัดจะอยู่ทางด้านขวา โดยที่ยังไม่ได้ทำการตัด เส้นประในรูปแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด ดังรูปที่ 2.9 (a) ในเวลาถัดมา เครื่องมือตัดเริ่มทำการตัด ดังรูปที่ 2.9 (b) หลังจากเครื่องมือตัดทำการตัดและเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ดังแสดงในรูป 2.9 (c) เครื่องมือตัดได้แยกตัวออกจากเศษวัสดุเมื่อความเร็วในการสั้นในแนวอนเริ่มเปลี่ยนทิศทางเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วตัด ดังแสดงให้เห็นในรูป 2.9 (d)

ในช่วงเวลาที่เริ่มต้นทำการตัด ความเร็วในการสั้นแนวตั้งมีทิศทางเป็นลบเมื่อเทียบกับความเร็วในการไหลของเศษวัสดุ ดังนั้น เครื่องมือตัดจะกดลงโดยแรงเสียดทานจากเศษวัสดุที่กดลงบนหน้ามุมคาย ในช่วงเวลานี้ลักษณะแรงกดที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม ในเวลาต่อมา เมื่อความเร็วการสั้นในแนวตั้งผ่านจุดต่ำสุดเพราะความเร็วในการสั้นมีลักษณะเป็นคาบ ความเร็วการสั้นในแนวตั้งจะเริ่มกลับมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วในการไหลของเศษวัสดุ ปรากฏการณ์จะเกิดขึ้นในทางกลับกัน คือเศษวัสดุจะถูกดึงโดยแรงเสียดทานจากหน้าเครื่องมือตัด (Rake face) เมื่อความเร็วในการสั้นแนวตั้งเข้าใกล้กับความเร็วในการไหลของเศษวัสดุ

แรงดึงเศษวัสดุนี้สามารถทำให้แรงตัดเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าศูนย์ การลดลงของแรงเสียดทานเช่นนี้ไม่สามารถทำได้โดยวิธีการตัดแบบดั้งเดิมถึงแม้ว่าจะใช้ เครื่องมือตัดแบบหมุนรอบเพลา

(Rotary tool) หรือโดยการใช้สารหล่อเย็นแบบใดๆก็ตาม ปรากฏการณ์หล่อลื่นเสมือน (Virtual lubrication effect) ที่เกิดจากการตัดแบบสั่นตามแนวสองแกนพร้อมกันนั้น จะเพิ่มมุมเฉือนขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถลดแรงตัดให้น้อยลงได้อีกด้วย



รูปที่ 2.9. การเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเมื่อทำการตัดแบบสั่นในหนึ่งคาบเวลา ^[7]

การสั่นของเครื่องมือตัดสองแกนพร้อมกันในแต่ละคาบ เริ่มตั้งแต่เมื่อเครื่องมือตัดเริ่มตัดเนื้องานจนกระทั่งเครื่องมือตัดสิ้นสุดการตัดเนื้องาน ทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานตามทิศทางการตัด มีลักษณะเป็นคลื่นเล็กน้อยดังรูปที่ 2.9

เมื่อทิศทางของเครื่องมือตัดในการตัดแบบฉบับพลันทันทีที่มีลักษณะไม่คงที่ มุมหลบของเครื่องมือตัดก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในขณะที่เครื่องมือตัดเริ่มทำการกินเนื้อชิ้นงานนั้น มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเงื่อนไขในการตัดควรจะกำหนดให้มุมหลบมีค่าเป็นบวก เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดผลกระทบจากมุมหลบของเครื่องมือตัดบนพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงานทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานด้อยคุณภาพลง

ความหยาบผิวทางทฤษฎีและค่าที่น้อยที่สุดของมุมหลบสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x = a \cos(\omega t), y = b \cos(\omega t + \phi) \quad -- (1)$$

เมื่อ a, b, t, ω และ ϕ คือ ค่าสูงสุดของการเคลื่อนที่แนวนอน ค่าสูงสุดของการเคลื่อนที่แนวตั้ง เวลา ความเร็วเชิงมุม และ ค่าความต่างเฟส ตามลำดับ

เวลา t_1 และ t_2 ที่กล่าวถึงต่อไป มีค่านิยามดังนี้ เวลา t_1 คือเวลาเมื่อเครื่องมือตัดเริ่มกินเนื้อชิ้นงาน และ เวลา t_2 คือเวลาเมื่อเครื่องมือตัดผ่านจุดสูงสุดจุดถัดไปของผิวชิ้นงานสำเร็จที่เหลืออยู่หลังจากทำการตัดเสร็จสิ้นใน 1 คาบเวลา ดังนั้นช่วงระหว่างจุดสูงสุดทั้งสองของคลื่นที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานสำเร็จจึงเท่ากับระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่สัมผัสของเครื่องมือตัด ณ เวลา t_1 และ t_2 และการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในทิศทางการตัด ณ เวลา t_1 ถึง t_2 ดังสมการ

$$a \cos(\omega t_1) - a \cos(\omega t_2) + v(t_2 - t_1) = 2\pi v / \omega \quad -- (2)$$

เมื่อ v คือความเร็วตัด นอกจากนี้ ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวตั้งที่เวลา t_1 และ t_2 จะมีค่าเท่ากัน

$$b \cos(\omega t_1 + \phi) = b \cos(\omega t_2 + \phi) \quad -- (3)$$

เวลา t_1 และ t_2 สามารถหาค่าได้จากสมการ (2) และ สมการ (3) โดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

ณ เวลา t_3 ในขณะตำแหน่งแนวตั้ง y มีค่าน้อยที่สุด y จะมีค่าเท่ากับ $-b$

$$b \cos(\omega t_3 + \phi) = -b \therefore t_3 = (\pi - \phi) / \omega \quad -- (4)$$

จากค่า t_1 และ t_3 ที่ได้มานั้น สามารถคำนวณค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีได้จากสมการ

$$R_{th} = b \cos(\omega t_1 + \phi) - b \cos(\omega t_3 + \phi) \quad -- (5)$$

ส่วนประกอบของค่าการเคลื่อนที่ทางแนวตั้งและแนวนอนกับความเร็วสัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน คือ $-b \sin(\omega t + \phi)$ และ $-a \sin(\omega t) - v$ ตามลำดับ ดังนี้ ถ้าวิถีตัดของทิศทางการตัด θ_1 ซึ่งหมายถึง มุมระหว่างทิศทางการตัดแบบฉับพลันทันที (Instantaneous cutting direction) กับทิศทางการตัดแบบปกติ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{b \sin(\omega t_1 + \phi)}{a \sin(\omega t_1) + v} \quad -- (6)$$

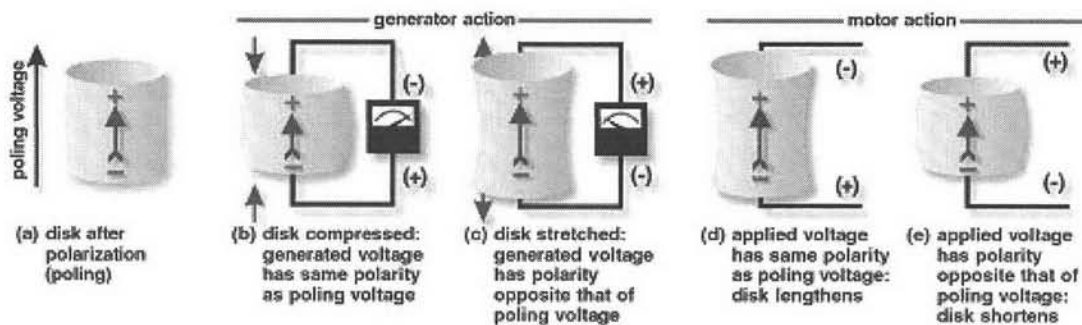
จากสมการดังกล่าว ทำให้ต้องคำนึงถึงมุมหลบปกคิควรรจะมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติของทิศทางในการตัด โดยคำนึงถึงสมการข้างต้น

อนึ่ง เงื่อนไขที่จำเป็นของการตัดแบบไม่ต่อเนื่องนั้นสามารถคำนวณได้จากเงื่อนไข ความเร็วในการสั่นในแนวนอนต้องมากกว่าความเร็วตัด หรือตามสมการ

$$a\omega > v \quad -- (7)$$

2.1.8. ปราบกฎการแผ่ไอโซอิเล็กทริก¹⁷¹

การให้แรงกดหรือแรงดึงและการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่โพลแล้วจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและสนามไฟฟ้าในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ซึ่งเกิดขึ้นตามสมบัติของโครงสร้างวัสดุแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) กล่าวคือ ถ้าให้แรงกดกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกแล้ว จะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับขั้วของเซรามิก ดังรูปที่ 2.10. (b) แต่ถ้าให้แรงดึงกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก จะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับขั้วของเซรามิกได้ดังรูปที่ 2.10. (c) เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct piezoelectric effect) ในทางกลับกัน ถ้าให้สนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก จะทำให้ขนาดของเซรามิกหดสั้นลงดังรูปที่ 2.10. (e) แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าตรงกันข้ามกับขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก จะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีขนาดของรูปร่างยาวขึ้นดังรูปที่ 2.10. (d) เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ (converse piezoelectric effect) ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้



รูปที่ 2.10. ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก^[8]

- ขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกหลังจากการโพล
- เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับขั้วของเซรามิกขณะให้แรงกด
- เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับขั้วของเซรามิกขณะให้แรงดึง
- การยืดตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะให้สนามไฟฟ้าทิศทางตรงข้ามกับขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
- การหดตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะให้สนามไฟฟ้าทิศทางตรงกันข้ามกับขั้วของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Toshimichi Moriwaki, Eiji Shamoto, Kenji Inoue (ปี 1992)^[9] ได้ร่วมกันทำการวิจัยการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่ระดับอัลตราโซนิกในการสั่นด้ามจับเครื่องมือตัดไดมอนด์ โดยการติดตั้ง Bolted Langevin-type Transducer (BLT) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสั่นด้ามจับเครื่องมือตัดเข้ากับปลายอีกด้านหนึ่งของด้ามจับเครื่องมือตัด และนำไปติดตั้งบนเครื่องกลึง เพื่อใช้ในการทดลองหาความลึกตัดวิกฤต (Critical depth) ของวัสดุประเภทแก้ว และทดลองกลึงปาดหน้าชิ้นงานโดยใช้วิธีการดังกล่าว ในการทดลองนี้ ใช้ความถี่ในการสั่น 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ทิศทางในการสั่นเป็นทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการตัด (Cutting direction) จากการทดลองพบว่า ความลึกวิกฤตซึ่งหมายความว่า ค่าความลึกค่าหนึ่งที่ทำให้การตัดเปลี่ยนจากโหมดการตัดแบบเหนียว (Ductile mode) เป็นการตัดแบบเปราะ (Brittle mode) ของการตัดแบบสั่นนั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีการใช้วิธีการตัดแบบดั้งเดิม ความเรียบผิวของชิ้นงานที่ได้จากการปาดหน้าแผ่นแก้วรูปวงกลมที่ได้จากงานวิจัยนี้นั้น มีความหยาบผิวเพียง 0.03 ไมโครเมตร R_{max} ซึ่งมีคุณภาพดีเทียบเท่า

กับความหยาบของวัสดุที่เป็นโลหะ ดังนั้น จากงานวิจัยนี้ สามารถแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการตัดแบบสั่นที่มีความถี่สูง เหมาะสมกับการตัดวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะได้เป็นอย่างดี

ต่อมา Eiji Shamoto, Kenji Inoue (ปี 1994)^[7] ได้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดเนื้อวัสดุแบบใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า การตัดแบบสั่นรูปวงรี (Elliptical Vibration Cutting) เป็นการทำให้ด้ามจับเครื่องมือตัดมีการสั่นตามแนวแกนสองแกนพร้อมกัน ในทิศทางของการตัด และ ทิศทางของการไหลออกของเศษวัสดุ โดยการติดตั้ง ตัวกระตุ้นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric actuator) 2 ชั้นเข้ากับแต่ละแกนตามทิศทางที่ต้องการให้เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ และป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างเฟส 90 องศา เพื่อกระตุ้นให้ตัวกระตุ้นเพียโซอิเล็กทริกมีการสั่นเป็นคาบ การสั่นพร้อมกันทั้งสองแกนนี้เอง บังคับให้เครื่องมือตัดที่ติดอยู่ตรงปลายเคลื่อนที่เป็นรูปวงรี เมื่อเครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการไหลออกของเศษวัสดุ เศษวัสดุจะถูกดึงออกโดยเครื่องมือตัด ทำให้แรงตัดลดลง หลังจากนั้นเครื่องมือตัดจะเคลื่อนที่กลับจุดเริ่มต้นในแต่ละรอบของการสั่น การเคลื่อนไหวแบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆเป็นคาบ ซึ่งในแต่ละคาบจะมีเวลาที่เครื่องมือตัดที่ไม่ได้ตัดเนื้อวัสดุด้วย การทดลองนี้ใช้ความถี่ในการสั่น 0.12 0.4 1.2 และ 6 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับจากการทดลองตัดวัสดุโลหะทองแดง (Oxygen free Copper) และส่งด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในการเริ่มต้นการทดลองตัด จะทำการตัดโดยไม่มีสั่น แต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่งแล้วจึงทดลองป้อนความถี่เพื่อให้เครื่องมือตัดมีการเคลื่อนไหวเป็นรูปวงรี พบว่า ความหนาของเศษวัสดุที่ผ่านการตัดโดยการตัดแบบสั่นรูปวงรีนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม รวมไปถึงแรงตัดที่ลดลงด้วยเช่นกัน

Eiji Shamoto, Chun-xiang Ma and Toshimichi Moriwaki (ปี 2000)^[10] ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการตัดแบบสั่นรูปวงรีในกลึงปาดหน้าชิ้นงานที่เป็นแก้ว (soda-lime glass) รูปทรงกระบอก โดยออกแบบด้ามจับเครื่องมือตัดเป็นลักษณะแท่งรูปทรงแปดเหลี่ยมตรงกลาง ติดตั้งแผ่น piezoelectric ceramic จำนวน 4 แผ่น เข้าตรงกลางด้ามจับเครื่องมือตัด โดยแต่ละแผ่นจะติดตั้งห่างกันเป็นมุม 90 องศา แผ่น piezoelectric ceramic จำนวน 2 แผ่นที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าเฟสเดียวกันจะติดตั้งตรงข้ามกัน จากนั้นจึงป้อนสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 19 กิโลเฮิร์ตซ์ จาก สัญญาณ 2 แหล่งที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ในการกระตุ้นด้ามจับเครื่องมือตัดจะกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติของด้ามเครื่องมือจับที่คำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนทางด้านปลายของด้ามจับนั้นติดตั้งเครื่องมือตัด ไคมอนด์ จากการทดลองพบว่าการใช้วิธีการตัดแบบสั่นรูปวงรีที่ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วในการสั่นต่อความเร็วตัด 60.5 เท่า ที่เงื่อนไขในการตัดเดียวกันทุกการทดลอง ความลึกวิกฤติเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม 15.5 เท่า ส่วนวิธีการตัดแบบสั่นในแกนเดียวนั้น ทำให้ค่าความลึกวิกฤติเพิ่มขึ้นเพียง 8.5 เท่าของวิธีการตัดแบบดั้งเดิม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การตัดแบบสั่นรูปวงรีนั้นทำให้สามารถกลึงปาดหน้าชิ้นงานได้ความลึกวิกฤติมากกว่า

การตัดแบบสั้นในแกนเดียว คุณภาพผิวของชิ้นงานที่เป็นแก้ว (soda-lime และ quartz) จะมีความโปร่งใสเมื่อผ่านการกลึงปาดหน้า และมีความหยาบผิวต่ำกว่า 0.03 ไมโครเมตร Ry อีกด้วย

Eiji Shamoto, Toshimichi Moriwaki, Makoto Matsuo (ปี 1997)^[11] ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการตัดแบบสั้นรูปวงรีในกลึงปาดหน้าชิ้นงานที่เป็นเหล็กหล่อแข็ง (die steel) ทรงกระบอกครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 27 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้ความถี่ในการสั้น 22 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อสั้นด้ามซึ่งติดตั้งเครื่องมือตัดไคมอนด์ดั่งที่ได้ออกแบบเอาไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า ในการตัดแบบดั้งเดิมนั้น เครื่องมือตัดไคมอนด์ไม่เหมาะสำหรับการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กหล่อแข็งเนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อมีความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัดเหล็กหล่อแข็งและจะทำให้เครื่องมือตัดไคมอนด์สึกหรออย่างรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำประโยชน์ของวิธีการตัดแบบสั้นรูปวงรีในการลดความสึกหรอของเครื่องมือตัดไคมอนด์ การทดลองจะใช้เครื่องมือตัดชนิดเดียวกัน แต่เงื่อนไขในการตัดและวัสดุที่เป็นชิ้นงานแตกต่างกัน ชิ้นงาน Stainless die steel (SUS420J2) ที่มีค่าความแข็ง 39 HRC จะใช้อัตราป้อน 6 ไมโครเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 5 ไมโครเมตร ความเร็วตัด 0.9 ถึง 4.1 เมตรต่อนาที ชิ้นงาน Stainless steel (SUS440C) ที่มีค่าความแข็ง 57 HRC จะใช้อัตราป้อน 6 ไมโครเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 2 ไมโครเมตร ความเร็วตัด 0.7 ถึง 3.0 เมตรต่อนาที และชิ้นงาน Tool steel (SKD11) ที่มีค่าความแข็ง 63 HRC จะใช้อัตราป้อน 10 ไมโครเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 2 ไมโครเมตร ความเร็วตัด 0.9 ถึง 3.0 เมตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน Stainless die steel (SUS420J2) จะได้ผิวชิ้นงานของเหล็กหล่อแข็งที่มีผิวสำเร็จคุณภาพสูงลักษณะคล้ายกระจกเงา ที่มีค่าความหยาบน้อยถึง 0.03 ไมโครเมตร Ry และเมื่อตัดชิ้นงานต่อเนื่องไปเป็นระยะทาง 1200 เมตรค่าความหยาบจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.04 ไมโครเมตร Ry การที่ความหยาบของผิวชิ้นงานได้เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากการสึกหรอของเครื่องมือตัดซึ่งเมื่อนำไปสำรวจผ่านกล้องจุลทรรศน์จะพบว่า มีขนาดเพียง 3 ไมโครเมตรเท่านั้น ส่วนชิ้นงาน Stainless steel (SUS440C) และ Tool steel (SKD11) จะใช้ความลึกตัดน้อยกว่า เพราะวัสดุมีความแข็งมากกว่าให้ค่าความหยาบประมาณ 0.025 ไมโครเมตร Ry และ 0.08 ไมโครเมตร Ry ตามลำดับ การที่ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูงนั้น ช่วยลดขั้นตอนการขัดเงาสำหรับการทำชิ้นงานเพื่อใช้เป็นแบบพิมพ์ขึ้นรูป ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า เมื่อนำการตัดแบบสั้นรูปวงรีมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัด อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดไคมอนด์จะสูงถึง 1200 เมตร และคุณภาพของผิวหน้าของชิ้นงานยังคงดีอยู่เมื่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัดมากกว่า 1200 เมตร