

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประยุกต์ใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุพันธะเอียงในกระบวนการตัดขอบ

วิชัย พุ่มจันทร์* และ คมกริช ละวรรณวงษ์

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล
ถนนเพชรเกษม อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 9 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืดอายุพันธะในกระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) ด้วยเทคโนโลยีการเคลือบผิว กระบวนการวิจัยประกอบไปด้วยการทดลองสองส่วน ในส่วนแรกการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้วยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-disk) บนเครื่องไทรบอมิเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำบอลคือเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS ทำการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 ± 2 HRC เคลือบผิวโดยกรรมวิธี PVD ด้วยฟิล์ม AlCrN และ TiAlN แผ่นจานคือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน JIS หนา 2 มิลลิเมตร ส่วนที่สองคือการทดสอบการสึกหรอด้วยแม่พิมพ์ตัดขอบโดยใช้พันธะตรงและพันธะเอียง 45 องศา แบบไม่เคลือบผิว และพันธะเอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์ม AlCrN และ TiAlN วัสดุชิ้นงานคือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในงานวิจัยได้มีการจำลองการตัดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่ออธิบายถึงกลไกการขาดของชิ้นงาน แม้ว่าการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ได้เคลือบผิว แต่ก็สามารถยืดอายุการใช้งานของพันธะได้ ผลของการจำลองการตัดพบว่า พันธะเอียง 45 องศา สามารถสร้างชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้โดยมีรอยตัดฉีกยาวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการตัดด้วยพันธะตรง เนื่องจากความเค้นภายในเนื้อวัสดุชิ้นงานไม่เกิดการเชื่อมต่อจากพันธะสุดท้ายทำให้การแตกหักช้าลงไปด้วย และพันธะเอียง 45 องศาที่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม TiAlN มีความทนทานสูงสุดสามารถตัดชิ้นงานได้มากถึง 5,000 ครั้ง

คำสำคัญ : การเคลือบผิว; ฟิล์มแข็งเคลือบผิว; แม่พิมพ์ตัดขอบ; การสึกหรอ; เหล็กแผ่นรีดเย็น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 2899 3153, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: wichai.poo@rmutr.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Application of Hard Film Coating for Extension Tool Life on Inclined Punch in the Trimming Process

Wichai Pumchan* and Komgrit Lawanwong

Production Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wong Klai Kang Won Campus
Petchkasem Road, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110

Received 9 November 2020; Revised 14 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

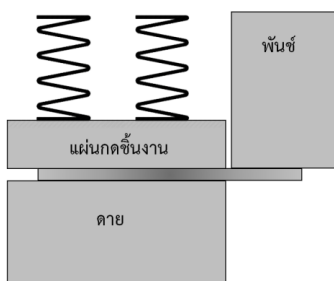
The objective of this research is to increase the tool life of trimming process by surface coating technology. The procedure of this research consists of two sections. In the first section, the friction coefficient was investigated with the ball on disk technique by using a tribometer. Steel ball was produced from cold work tool steel grade SKD11 (JIS) hardened to 60 ± 2 HRC. Two types of surface coating, namely AlCrN and TiAlN, were conducted by PVD technique. Disk material used in this experiment was made by stainless steel JIS; SUS 304 of 2 mm thickness. For the second section, the wear tests of trimming die were performed by using flat punch and inclined punch 45 degrees without surface coating as well as the inclined punch 45 degrees coated with AlCrN and TiAlN (PVD). Workpiece material used for the wear test was stainless steel JIS; SUS 304 of 2 mm thickness. Additionally, the finite element analysis was carried out for explanation the deformation of the workpiece during trimming operation. Although the friction coefficient of the surface coating was higher than non-coating, it could be extended the tool life ostensibly. As the result of FEM, the inclined punch 45 degrees could be generated the long sheared surface more than the flat punch. This is due to the internal stress of workpiece that did not connect from the punch to the die, so the crack propagation would be delayed. The inclined punch 45 degrees coated TiAlN has a highly durable which can be used up to 5,000 strokes.

Keywords : Coating; Hard Film Coating; Trimming Die; Wear; Cold Rolled Steel Sheet

* Corresponding Author. Tel.: +668 2899 3153, E-mail Address: wichai.poo@rmutr.ac.th

1. บทนำ

กระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) เป็นกระบวนการตัดพิเศษที่เพิ่มเข้ามาในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ได้ขอบตัดที่มีคุณภาพสูง (รอยตัดเนียนยาวและไม่มีครีบ) ดังรูปที่ 1 เมื่อต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มกระบวนการตัดขอบเข้าไปในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งาน ในหลายปีที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลายฉบับที่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงโดยอาศัยแม่พิมพ์ตัด อาทิ ในงานวิจัย [1]-[4] ทำการศึกษาคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน การเจาะรูขนาดเล็ก การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมต่าง ๆ ในระหว่างการตัดชิ้นงาน K. Mori et al. [5] นำเสนอการสร้างรัศมีขนาดเล็กบริเวณคมตัดของพันธ์ร่วมกับการใช้ระยะเคลียแรนซ์ที่แคบมาก ๆ ในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ผลที่ได้รับคือสามารถเพิ่มความยาวของรอยตัดเนียนได้



รูปที่ 1 กระบวนการตัดขอบ (Trimming Process)

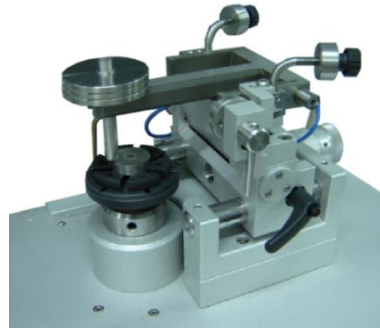
P. Chumrum et al. [6] ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น ระยะเคลียแรนซ์และมุมเน้นพลังงานที่ใช้ในการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง L. Komgrit และ L. Pongsakorn [7] นำเสนอการเอียงพันธ์ในกระบวนการตัดขอบซึ่งสามารถเพิ่มรอยตัดเนียนได้ S.-H. Song et al. [8] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วในการตัดชิ้นงานบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อย่างไรก็ตามการที่จะได้มาซึ่งชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรง

สูงไม่ใช่ความต้องการหลักเพียงอย่างเดียวหากแต่ว่าพันธ์ที่ใช้ตัดชิ้นงานต้องทนทานสามารถทำงานได้อย่างยาวนานอีกด้วย ซึ่งการเพิ่มความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสี สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกใช้วัสดุทำพันธ์ที่มีความแข็งแรงสูง หรือชุบด้วยสารชุบแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง โดยการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนั้นเป็นการเพิ่มสมบัติความทนทานของผิวแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม การเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งนั้น มีผลกระทบในด้านต้นทุนในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้ชนิดของฟิล์มแข็งต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เนื่องจากอุตสาหกรรมการเคลือบผิวภายในประเทศไทยมีความสามารถในการเคลือบด้วยสารต่าง ๆ ด้วยกรรมวิธีไอเคมี (CVD) และไอกายภาพ (PVD) ซึ่งในแต่ละกรรมวิธีนั้นจะมีต้นทุนและสมบัติภายหลังการเคลือบแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ชนิดของฟิล์มที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยจากหลายประเทศนิยมใช้เทคโนโลยีการเคลือบผิวมาแก้ปัญหาเฉพาะด้านต่าง ๆ เช่น P. Pesch et al. [9] ทดสอบความสามารถของฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงานดึง (Strip-drawing-test) ทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ต่างชนิดและกรรมวิธีการเคลือบ คือ PVD-TiN, PVD-TiAlN, PVD-TiCN, TiN-sputterd และ TiN-arc ซึ่งสำหรับฟิล์มเคลือบ TiN-sputtered นั้นเหมาะสมกับการใช้งานแม้ว่าจะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะสูงกว่าชนิดอื่น แต่พบว่าไม่มีสิ่งกะสี้ที่เคลือบอยู่บนแผ่นเหล็กหลุดมาเกาะติดที่แม่พิมพ์ K. Lawanwong et al. [10] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านไดรบอลอย์ของฟิล์มแข็งเคลือบผิวชนิด TiAlN, TiN และ TiCN-CVD ภายใต้สภาวะไม่ใช่สารหล่อลื่น คู่สัมผัส คือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ทำการทดสอบความเสียดทานและปริมาณการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบไดรบอลิเตอร์ Ö. N. Cora et al. [11] นำเสนอการป้องกันการสึกหรอด้วยการ

เคลือบผิวแบบ PVD, CVD และ TD โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของวัสดุพื้น (Substrate) จากนั้นใช้เครื่องจักร CNC ขุดผิวบนชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งพบว่าชนิดของวัสดุพื้นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอเนื่องจากการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดลงบนวัสดุพื้นที่แตกต่างกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวแตกต่างกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า การเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนั้นยังคงน่าสนใจ ยิ่งไปกว่านั้นการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด ไม่ว่าจะเป็นงานแบบลงค้ำ (Blanking) เพียสซิง (Piercing) แม่พิมพ์ตัดขอบอุตสาหกรรมการผลิตให้มีความสำคัญอยู่เสมอ ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการตัดขอบโดยทำการเอียงพื้น 45 องศา ซึ่งผลจากการตัดสามารถเพิ่มรอยตัดเฉือนได้ แต่พบการสึกหรออย่างรุนแรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งเพื่อยืดอายุของพื้นผิว การตรวจสอบถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายบนเครื่องไทรบอมิเตอร์ จากนั้นทดสอบแบบทำลายด้วยการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาด 2 มิลลิเมตร เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีสมบัติการยึดติดกับเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 12 และเป็นที่ยอมรับใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และกลไกของการเพิ่มขึ้นของรอยตัดเฉือนถูกอธิบายด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

2. อุปกรณ์และวิธีทดสอบการสึกหรอ

เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบชนิดต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่สัมผัสด้วยวิธี Ball-on-disk ตามมาตรฐาน (ASTM G133-95) [10] ดังรูปที่ 2 ควบคู่ไปกับการบ่มตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking die)



รูปที่ 2 เครื่องไทรบอมิเตอร์สำหรับทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

2.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายด้วยเทคนิค Ball-on-disk

เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์การตัดชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กำหนดให้ ป้อนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวสัมผัสด้วยเทคนิค Ball-on-disk บนเครื่องไทรบอมิเตอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ไม่ซับซ้อนและมีความแม่นยำ โดยกำหนดคู่สัมผัสคือบอล (Ball) และแผ่นจาน (Disk) ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดเงื่อนไขในการสร้างบอลและจานดังนี้

- บอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ผลิตจากเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชุบแข็ง 60 ± 2 HRC
- แผ่นจานผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานคือ 25 มิลลิเมตร

ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำหนักกด 10 นิวตัน ความเร็วเชิงเส้นคงที่ตลอดการทดลอง 10 เซนติเมตรต่อวินาที ระยะทำการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหาย 200 เมตร บอลเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง 2 ชนิด คือ AlCrN-PVD (Double Layer) และ TiAlN-PVD (Multilayer) จากนั้นติดตั้งบอลและแผ่นจานบนเครื่องไทรบอมิเตอร์ ดังรูปที่ 2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

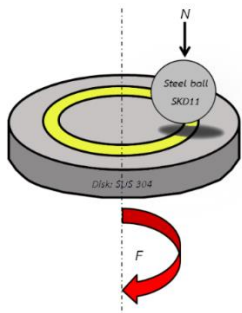
โดยที่

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

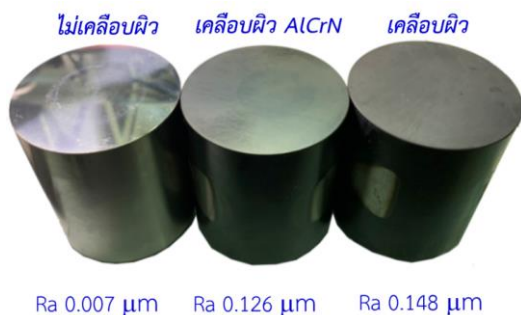
F คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่

N คือ แรงตั้งฉากหรือแรงกดวัตถุสัมผัสเข้าหากัน

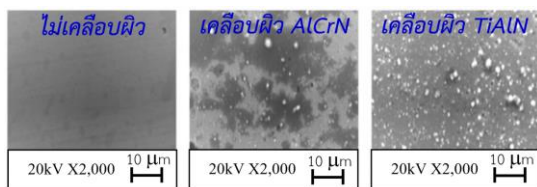
หลักการทำงานของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หลักการของการทดสอบแบบ Ball-on-disk



(ก) ชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง (Dummy)

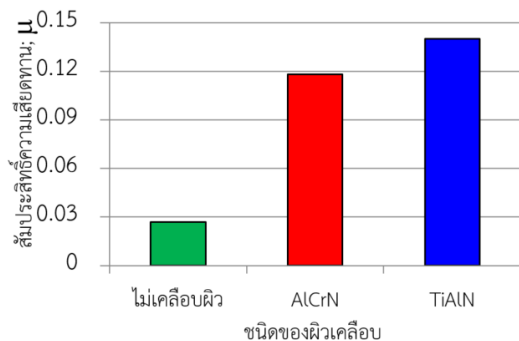


(ข) พื้นผิวของชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง

รูปที่ 4 ชิ้นงานเคลือบผิวจำลองสำหรับการทดสอบ
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การเคลือบผิวของงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้าง
ชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง (Dummy) ดังรูปที่ 4 (ก)

เพื่อนำเข้าเตาเคลือบผิวพร้อมกับพันธ์และบอล จากนั้น
นำชิ้นงานเคลือบผิวจำลองที่ผ่านการเคลือบผิวไป
ตรวจสอบสมบัติอื่น ๆ ซึ่งก่อนทำการเคลือบผิวมี
ข้อกำหนดที่สำคัญมากคือต้องเตรียมผิวที่จะเคลือบให้
เรียบที่สุด ดังนั้นชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวจึงต้องผ่านการ
ขัดผิวแบบละเอียด (Lapping) จนได้ความละเอียดสูงสุด
ดังรูปที่ 4 (ก) และยืนยันด้วยรูปถ่ายพื้นผิวด้วยกล้อง
SEM ดังรูปที่ 4 (ข) พบว่ามีความหยาบผิวต่ำที่สุด (มีค่า
ความหยาบผิวที่ 0.007 ไมโครเมตร) เมื่อนำไปทดสอบ
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจึงได้ค่าที่ต่ำสุด ดังรูปที่ 5

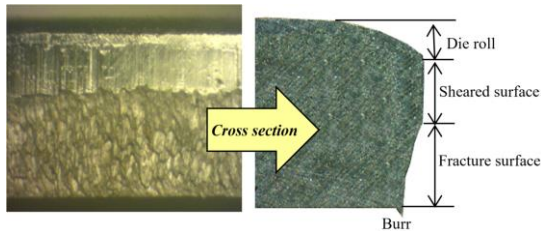


รูปที่ 5 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ในส่วนของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิว
เคลือบนั้นพบว่ามีการเคลือบปกคลุมอยู่บนพื้นผิว ดังรูป
ที่ 4 (ข) โดย TiAlN ผิวหยาบสุดคือ 0.148 ไมโครเมตร
จึงมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด รองลงมาคือ บอล
ที่เคลือบด้วย AlCrN ซึ่งมีความหยาบผิวที่ 0.126
ไมโครเมตร

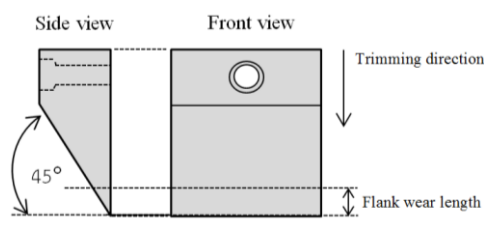
2.2 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัดขอบและข้อกำหนด ในการตัดชิ้นงาน

การกำหนดคุณภาพของชิ้นงานสำหรับงานแบลงค์
กึ่งและเพียสซึ่งนั้นสามารถกำหนดได้จากรอย ตัดเฉือน
ขอบตัดของชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก
ได้แก่ ส่วนโค้งมน (Die Roll) รอยตัดเฉือน (Sheared
Surface) รอยฉีกขาด (Fracture Surface) และครีป
(Burr) แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วย
แม่พิมพ์แบบลงค้ำ

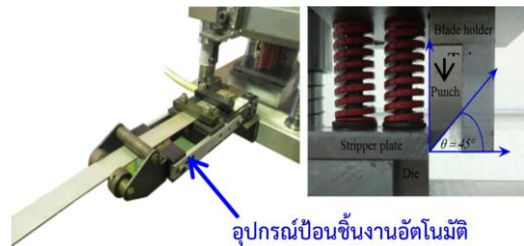
ในงานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบกับกระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) ซึ่งเป็นกระบวนการเก็บผิวในขั้นตอนสุดท้าย จึงใช้ระยะเคลือบแรนซ์แคบ ส่งผลให้เกิดการเสียดสีอย่างรุนแรงเนื่องจากเป็นขั้นตอนเก็บผิวสุดท้าย ทำให้ขอบตัดที่ได้จะมีผิวมันและครีบบางเล็กน้อยเท่านั้น โดยวัสดุชิ้นงานสำหรับการตัดนั้นเป็นวัสดุเดียวกันกับการทดสอบสมบัติความเสียหาย คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาด 2 มิลลิเมตร และเพื่อให้ได้รอยตัดเฉือนที่ดียาวที่สุด จึงนำเสนอพันธ์เอียงทำมุม 45 องศา ดังรูปที่ 7 พันธุ์และฉายผลิตจากเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ชุบแข็ง ที่ระดับความแข็งคงที่เท่ากับ 60 ± 2 HRC เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง TiAlN (สีม่วงเทา) และ AlCrN (สีเทาสว่าง) ดังรูปที่ 8 จากนั้นติดตั้งพันธ์บนแม่พิมพ์ตัดขอบพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ ดังรูปที่ 9 ทำการทดสอบความทนทานของพันธ์ด้วยการตัดชิ้นงานโดยให้แรงตัดคงที่จากเครื่องเพรสแบบเพลาช้อเหวี่ยงขนาด 60 ตัน ดังรูปที่ 10 จำนวนครั้งในการตัดต่อนาที (Stroke per Minute; SPM) คือ 30 และไม่มีการใช้สารหล่อลื่นในการทดสอบ ทำการวัดระยะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนคมตัดพันธ์เป็นช่วง ๆ



รูปที่ 7 พันธุ์สำหรับกระบวนการตัดขอบ



รูปที่ 8 พันธุ์เคลือบผิวสำหรับกระบวนการตัดขอบ



รูปที่ 9 ชุดแม่พิมพ์ตัดขอบและอุปกรณ์ป้อนชิ้นงาน
อัตโนมัติ



รูปที่ 10 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัดขอบบนเครื่องเพรส

2.3 การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์

เอลิเมนต์

ส่วนประกอบที่สำคัญของงานวิจัยนี้คือ การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานขณะตัดได้เป็นอย่างดี เพื่อให้ผลการจำลองถูกต้อง ในการสร้างแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

ชิ้นงานก่อน โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง ด้วยมาตรฐาน JIS B13 พร้อมติดตั้งสตรนเกจเพื่อนำไปคำนวณความเค้นจริง-ความเครียดจริง ดังรูปที่ 11 จากนั้นติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 12 ผลการทดสอบแรงดึง และสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 แสดงดังรูปที่ 13 และตารางที่ 1 ตามลำดับ

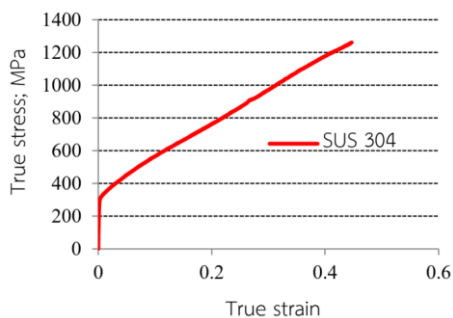
ในงานวิจัยนี้ แบบการจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้การจำลองแบบ 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 14 และมีรายละเอียดของเงื่อนไขในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 11 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง JIS B13



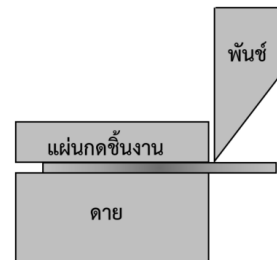
รูปที่ 12 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine



รูปที่ 13 ความเค้น-ความเครียดจริงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

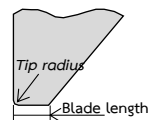
สมบัติทางกลของวัสดุสแตนเลสเกรด JIS; 304	
ความเค้นคราก (MPa)	310
ค่าความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	806
ค่าความเค้นจริง; K (MPa)	1650
สัมประสิทธิ์ค่าความเครียดแข็ง; n	0.44
Critical damage value (Cockroft & Latham)	1.19



รูปที่ 14 แบบจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 2 รายละเอียดของการจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รายละเอียดการจำลองการตัดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	
สมบัติของชิ้นส่วนแม่พิมพ์	พunch, ด้าย และแผ่นปดชิ้นงาน เป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid body)
สมบัติของวัสดุชิ้นงาน	ชิ้นงานเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ความหนาชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร
รัศมีที่ปลายพunch	0.02 มิลลิเมตร
ระยะตรงของใบมีด (BL)	0.1 มิลลิเมตร
ชนิดของวัสดุชิ้นงาน	สแตนเลส 304
ระยะเคลียร์แรนซ์	2%
จำนวนเอลิเมนต์	5,000
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย	ตามการทดสอบ Ball-on-disk

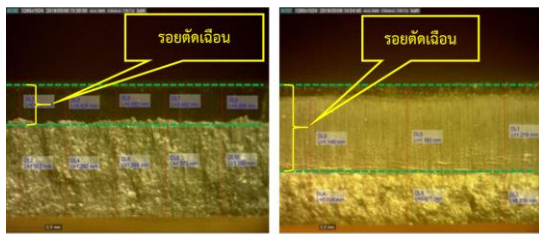


3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตัดชิ้นงานด้วยการใช้พunchที่มีมุมเอียง 45 องศา

รูปที่ 15 แสดงความแตกต่างของขอบตัดชิ้นงาน ที่ผ่านการตัดด้วยพunchตรงและพunchเอียง จากผลการทดลองพบว่ารอยตัดเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วย

พื้นที่ตรงมีรอยตัดเฉือนเพียงร้อยละ 20 ของความหนาเท่านั้น เมื่อเปลี่ยนมาใช้พื้นที่เฉียง 45 องศา ตัดชิ้นงานพบว่าสามารถวัดรอยตัดเฉือนเฉลี่ยได้ประมาณร้อยละ 55 ของความหนา จากผลดังกล่าว ในส่วนของการทดลองการสึกหรอและการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนี้ จึงขอเสนอผลเฉพาะพื้นที่เฉียง 45 องศาเท่านั้น สำหรับสาเหตุที่รอยตัดเฉือนยาวมากขึ้นเมื่อใช้พื้นที่เฉียงนั้นจะได้อธิบายด้วยวิธีการ FE-simulation ในลำดับต่อไป



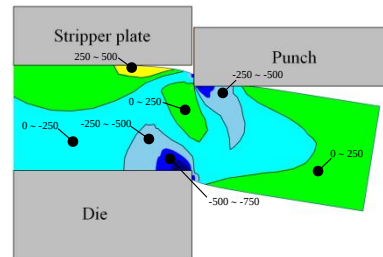
(ก) รอยตัดพื้นที่ตรง (ข) รอยตัดพื้นที่เฉียง 45 องศา

รูปที่ 15 ขอบตัดที่ผ่านการตัดด้วยพื้นที่ตรงและพื้นที่เฉียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

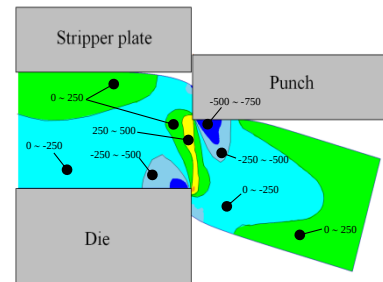
3.2 ผลการวิเคราะห์รอยตัดเฉือนด้วย FE-Simulation

จากการที่รอยตัดเฉือนยาวขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย FE-simulation ในหัวข้อนี้จึงอธิบายถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงขอบตัด เมื่อตัดด้วยพื้นที่ตรงและพื้นที่เฉียง 45 องศา ในรูปที่ 16 (ก) – (ค) แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนชิ้นงานเมื่อใช้พื้นที่ตรงตัดชิ้นงานที่ระยะความลึกต่างกันคือ ร้อยละ 20, 40 และ 60 ของความหนาชิ้นงาน ผลการตรวจสอบที่ระยะความลึกร้อยละ 20 ดังรูปที่ 16 (ก) พบว่าได้คมตัดของพื้นที่และเนื้อคมตัดของตาย พบความเค้นอัด -250 ~ -500 เมกะปาสกาล และบริเวณกลางชิ้นงานพบการกระจายตัวของความเค้นดึงที่มีค่าประมาณ 250 เมกะปาสกาล และเมื่อพื้นที่ตัดชิ้นงานลึกลงไปเรื่อย ๆ ถึงระดับร้อยละ 40 ของความหนา ความเค้นดึงสูงขึ้นที่

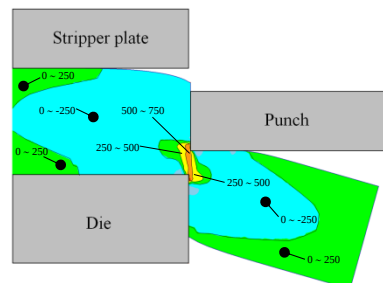
ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นในบริเวณกว้างจากใต้คมตัดพื้นที่รอบรอบไปถึงเนื้อคมตัดตาย ดังรูปที่ 16 (ข) จนกระทั่งที่ระยะกตร้อยละ 60 ความเค้นดึงเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล ทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 16 (ค)



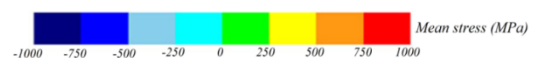
(ก) ระยะกตร้อยละ 20



(ข) ระยะกตร้อยละ 40



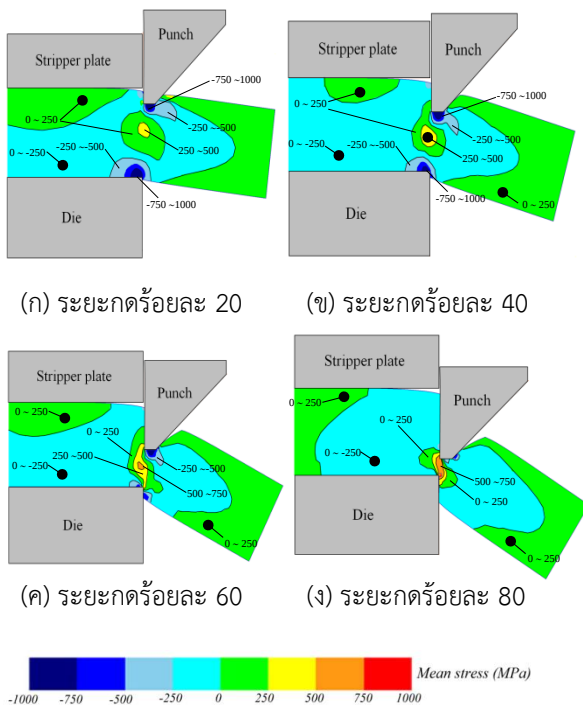
(ค) ระยะกตร้อยละ 60



รูปที่ 16 การกระจายตัวของความเค้นเมื่อใช้ตัดชิ้นงานด้วยพื้นที่ตรงที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

ในกรณีตัดชิ้นงานด้วยพื้นที่เฉียง 45 องศา รูปที่ 17 (ก)-(ง) ที่ระยะกตร้อยละ 20 พบว่าได้คมตัดของพื้นที่และเนื้อคมตัดของตาย มีความเค้นอัดที่ระดับ

-250 ~ -500 เมกะปาสกาล กระจ่ายตัวในบริเวณที่ไม่กว้างนักและความเค้นดึงที่ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ดังรูปที่ 17 (ก) เมื่อเพิ่มระยะกดลึกที่ร้อยละ 40 ของความหนา พบว่าความเค้นอัดที่ระดับ -250 ~ -500 เมกะปาสกาล ยังคงเกิดขึ้นที่ได้คมตัดของฟันซ์และเหนือคมตัดของตายและความเค้นดึงที่ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 17 (ข)



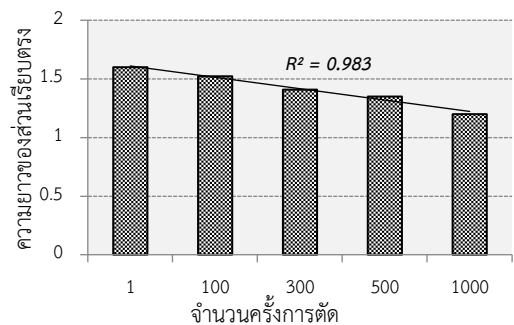
รูปที่ 17 การกระจายตัวของความเค้นเมื่อตัดด้วยฟันซ์เอียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

จากนั้นที่ระยะกดลึกร้อยละ 60 ความเค้นดึงเพิ่มขึ้นที่ระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล แต่ยังอยู่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานและเมื่อกดลึกจนถึงระยะร้อยละ 80 ดังรูปที่ 17 (ง) ความเค้นดึงที่ระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล เชื่อมต่อจากฝั่งฟันซ์ไปยังฝั่งตายทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดด้วยฟันซ์ตรงแล้วสังเกตได้ว่า การเชื่อมต่อกันของความเค้น

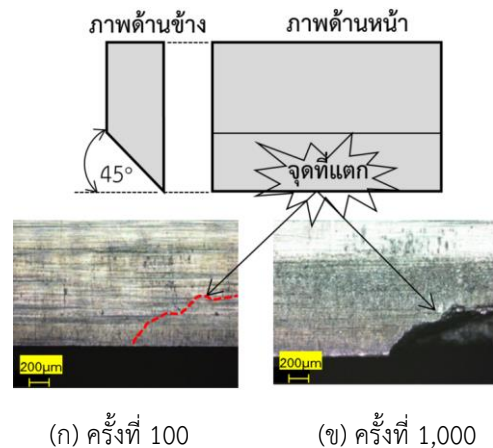
ดิ่งนั้นจะเกิดขึ้นในระยะกดลึกร้อยละ 60 แต่เมื่อใช้ฟันซ์เอียง 45 องศา ต้องกดลึกถึงระดับร้อยละ 80 ความเค้นดึงจึงเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างฝั่งฟันซ์และตาย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รอยตัดเฉือนของการตัดชิ้นงานด้วยฟันซ์เอียง 45 องศา ยาวกว่าการตัดด้วยฟันซ์ตรง

3.3 การสึกหรอที่เกิดขึ้นบนคมตัดฟันซ์

การสึกหรอที่เกิดขึ้นบนฟันซ์เอียง 45 องศา ภายหลังการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ระยะเคลือบแรนซ์ร้อยละ 2 ในกรณีที่ไม่มีการเคลือบผิว สามารถสังเกตการสึกหรอได้จากการวัดรอยตัดเฉือนที่ชิ้นงาน ข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนของชิ้นงานที่ตัดด้วยฟันซ์เอียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2



รูปที่ 19 ความเสียหายของฟันซ์เอียง 45 องศาที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

จากรูปที่ 18 พบว่า เมื่อทำการตัดชิ้นงานมากขึ้น ส่วนเรียบตรงจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งการตัดครั้งที่ 1,000 พบว่า คมตัดของพันธ์เกิดการแตกหักเสียหายไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ดังรูปที่ 19 การแตกหักเสียหายของพันธ์นั้นเกิดขึ้นในลักษณะการแตกหักเฉพาะบริเวณ (Chipping) ที่คมตัด เนื่องจากเป็นมุมแหลม พันธุ์รับแรงน้อยและเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด

การตัดชิ้นงานด้วยพันธ์เอียง 45 องศา ทำให้รอยตัดเฉือนของชิ้นงานยาวกว่าพันธ์ตรง แต่การใช้พันธ์เอียงที่มีมุมแหลมกลับพบอุปสรรคในด้านของอายุการใช้งานที่สั้นมาก

3.4 การใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุการใช้งานพันธ์

จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้าได้กล่าวถึงความสำเร็จในการตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงด้วยพันธ์เอียง 45 องศา แต่อายุของพันธ์นั้นค่อนข้างสั้นเนื่องจากชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีความแข็งแรงสูงและมีความหนาถึง 2 มิลลิเมตร อีกทั้งชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีส่วนผสมของโครเมียมสูงถึงร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเกาะติด (Adhesion) เนื่องจากสมบัติเข้ากันได้ทางเคมี (Compatibility) [12] ของเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11(พันธ์) ซึ่งมีปริมาณโครเมียมสูงเช่นกัน เมื่อโลหะที่มีธาตุโครเมียมสูงทั้งคู่สัมผัสกันทำให้เกิดการเหนียวแน่นขึ้นที่พื้นผิวนำไปสู่การสึกหรออย่างรุนแรงในที่สุด ดังนั้นการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งจึงเป็นทางออกในการแก้ไขปัญหานี้ได้และสามารถยืดอายุพันธ์ได้อีกด้วย

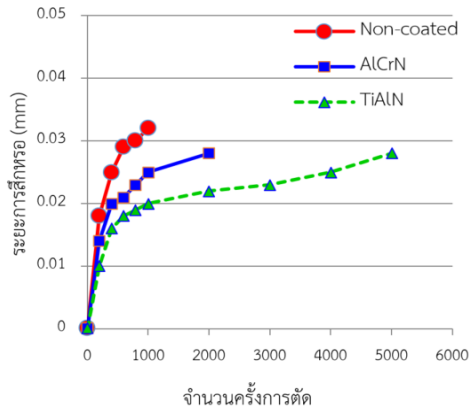
งานวิจัยนี้เลือกใช้สารเคลือบสองชนิด คือ อลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) และไททาเนียมไนไตรด์ (TiAlN) บนพื้นฐานของกรรมวิธีเคลือบผิวแบบ PVD ลงบนพันธ์ เนื่องจากคมตัดของพันธ์มีความเอียงและปลายแหลม ทำให้การเคลือบผิวแบบ PVD ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ CVD สามารถ

ป้องกันการบิดงอและแตกร้าวในขณะที่ทำการเคลือบผิว นอกจากนี้ฟิล์มทั้งสองชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์อีกด้วย เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์นั้น ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองการตัดขอบคือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน JIS ความหนา 2 มิลลิเมตร เคลียแรนซ์ร้อยละ 2 ของความหนา ผลการทดลองในรูปที่ 20 แสดงระยะการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับพันธ์เอียง 45 องศา หลังผ่านการตัดชิ้นงานในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการตรวจสอบพบว่าการสึกหรอของพันธ์เอียง 45 องศา (เคลือบผิวและไม่เคลือบผิว) ในช่วงแรก (ชิ้นที่ 1-500) การสึกหรอที่เกิดขึ้นที่พันธ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงการตัดในครั้งที่ 1,000 พันธุ์ที่ถูกเคลือบผิวเริ่มมีอัตราการสึกหรอที่ช้าลงจนมีแนวโน้มเกือบที่จะคงที่ เนื่องจากการที่ระยะช่องว่างแม่พิมพ์แต่ละตัวถูกขยายใหญ่ขึ้นและคมตัดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นรัศมี พันธุ์ที่เคลือบด้วยสาร TiAlN สามารถตัดชิ้นงานได้ถึง 5,000 ครั้ง รองลงมาคือ พันธุ์ที่เคลือบด้วย AlCrN ตัดชิ้นงานได้ถึง 2,000 ครั้ง ในขณะที่พันธ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวเกิดการแตกหักเสียหายขึ้นในการตัดครั้งที่ 1,000 ทำให้ไม่สามารถทดลองตัดชิ้นงานต่อไปได้ จากผลดังกล่าวจึงสรุปประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวได้ดังนี้

- พันธุ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย AlCrN ความหนาเป็น 2 เท่าของพันธ์ไม่เคลือบผิว
- พันธุ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย TiAlN ความหนาเป็น 5 เท่าของพันธ์ไม่เคลือบผิว

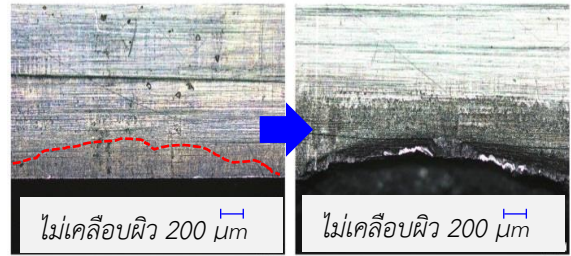
จากผลการสึกหรอในรูปที่ 21 พบว่าการเคลือบผิวสามารถยืดอายุพันธ์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีความแข็งที่ผิวสูงมากดังค่าความแข็ง (ตรวจสอบจากบริษัทผู้ผลิตด้วย HV Hardness Tester) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 22 เมื่อความแข็งมากขึ้นส่งผลให้อายุการใช้งานพันธ์เอียง 45 องศา ยาวนานขึ้นอย่างชัดเจน อิทธิพลของความแข็งนั้นสัมพันธ์กับปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ พันธุ์ที่เคลือบผิวด้วย TiAlN มี

ความทนทานมากที่สุด รองลงมาคือ พันซ์ที่เคลือบผิวด้วย AlCrN และ พันซ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว เป็นอันดับสุดท้าย



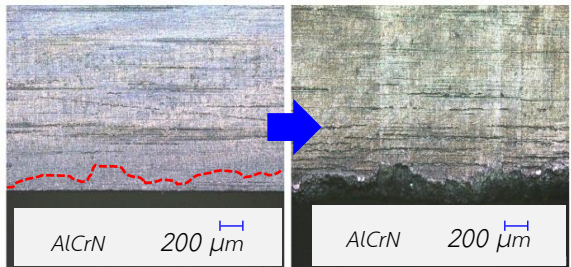
รูปที่ 20 ระยะการสึกหรอบนพันธ์เอียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

ในรูปที่ 23 (ก) – (จ) แสดงการเปลี่ยนแปลงของส่วนเรียบตรงของชิ้นงานที่ตัดด้วยพันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มเคลือบต่างชนิดกัน ทำการบันทึกในครั้งแรกของการตัดและครั้งสุดท้ายเมื่อพันธ์ไม่สามารถตัดชิ้นงานได้อีกต่อไป ในการตัดครั้งแรกของทุกพันธ์พบรอยตัดฉีกยาวใกล้เคียงกันดังรูป 23 (ก), (ค) และ (จ) เมื่อพิจารณาถึงชิ้นงานในการตัดครั้งสุดท้ายของแต่ละเงื่อนไข พบว่าพันธ์เอียง 45 องศา ที่ไม่ได้เคลือบผิวมีรอยตัดฉีกยาวลดลงอย่างมากและความกว้างของการฉีกขาด (x) เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 23 (ข) ในขณะที่พันธ์ที่เคลือบผิวด้วย AlCrN และ TiAlN ความกว้างของการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 23 (ง) และ (ฉ) จากการสังเกตความเปลี่ยนแปลงของรอยตัดฉีก พบว่าเมื่อตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น ความยาวของรอยตัดฉีกจะลดลงเรื่อยๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเนื่องจากพันธ์สึกหรอ จากรูปแม้ว่าการใช้พันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย TiAlN จะแตกหักเสียหายที่ระยะการตัดชิ้นงาน 5,000 ชิ้น ชิ้นงานที่ได้จากการตัดก็ยังมีส่วนเรียบตรงที่สามารถยอมรับได้ (รอยตัดฉีกประมาณร้อยละ 35 ของความหนา 2 มิลลิเมตร)



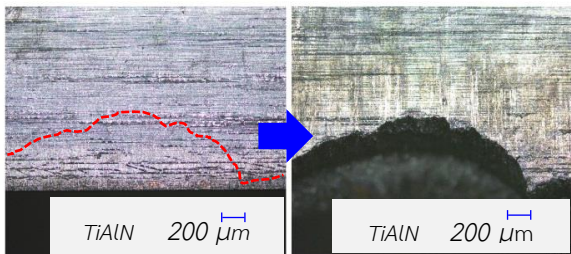
(ก) ตัดครั้งที่ 100

(ข) ตัดครั้งที่ 1,000



(ค) ตัดครั้งที่ 100

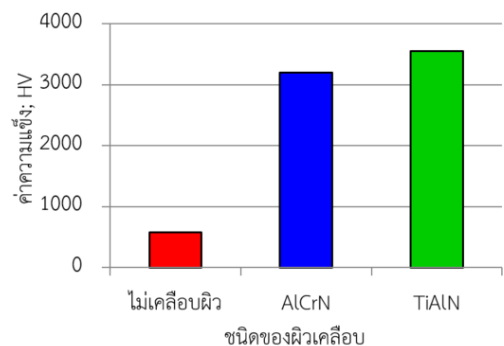
(ง) ตัดครั้งที่ 2,000



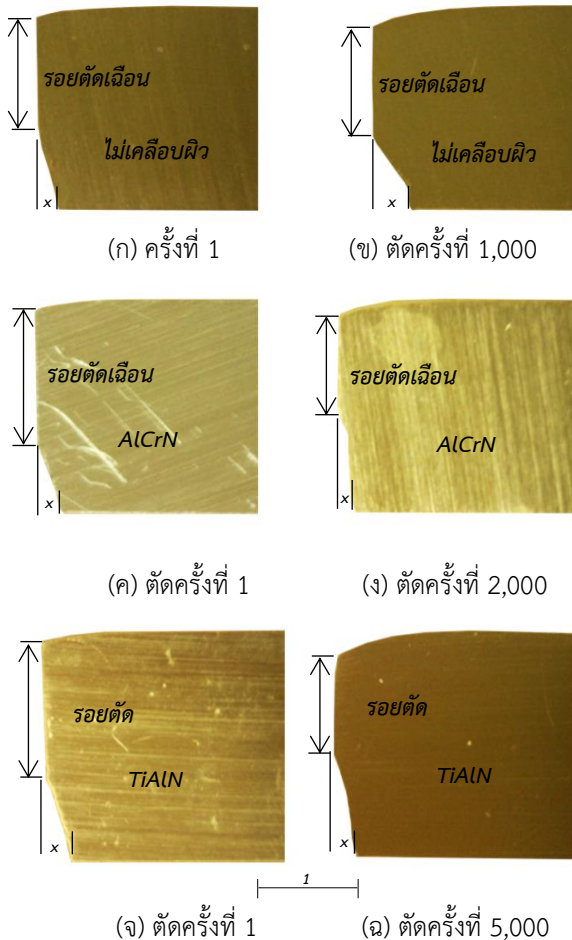
(จ) ตัดครั้งที่ 100

(ฉ) ตัดครั้งที่ 5,000

รูปที่ 21 การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับพันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งต่างชนิดกันที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2



รูปที่ 22 ความแข็งของพันธ์เอียง 45 องศา แบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง



รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานที่ตัดจาก
พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งต่างชนิดกัน

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการยืดอายุการใช้งานของ
พังก์ในกระบวนการตัดขอบ ซึ่งเป็นกระบวนการเก็บผิว
ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ประเด็นหลักของการ
วิจัยในงานนี้คือ การเคลือบผิวของพังก์ให้แข็ง เพื่อเพิ่ม
อายุการใช้งานของพังก์ให้ยาวนานขึ้น หลักการ
ดำเนินงานในการทดลองนั้น จะนำพังก์ที่ไม่ผ่านการ
เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมาทดลองในการ
ตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่เหมือนกัน หลังการ
ทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่ส่งผลต่อการ
ด้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบเนื่องจากลักษณะ
ของการตัดขอบคือการกระแทกและการเสียดสี
รุนแรง
- ความแข็งของผิวเคลือบส่งผลต่อการด้านทานการ
สึกหรอในกระบวนการตัดขอบได้อย่างชัดเจน
- การสึกหรอที่พบในงานวิจัยนี้มีลักษณะการแตก
เฉพาะบริเวณ (Chipping) เนื่องจากการกระแทกที่
รุนแรง
- พังก์เอียง 45 องศา ไม่เคลือบผิวตัดชิ้นงาน
เที่ยงตรงสูงได้ 1,000 ชิ้น
- พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิว AlCrN สามารถ
ตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้ถึง 2,000 ชิ้น
- พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิว TiAlN มีความ
ทนทานที่สุดสามารถตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้
ถึง 5,000 ชิ้น
- การตัดด้วยพังก์ตรงพบว่ารอยตัดเฉือนของชิ้นงาน
มีเพียงร้อยละ 20 ของความหนา 2 มิลลิเมตร
- การตัดด้วยพังก์เอียง 45 องศา พบว่าส่วนเรียบ
ตรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 55 ของ
ความหนา 2 มิลลิเมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์
(Finite Element Software)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Fang, P. Zeng and L. Lou, "Finite element
simulation of the effect of clearance on the
forming quality in the blanking process,"

- Journal of Materials Processing Technology*, vol. 122, no. 2-3, pp. 249-254, Mar. 2002.
- [2] M. Sasada, H. Kobayashi and I. Aoki, "Study on piercing mechanism of small holes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, pp. 649-652, Jul. 2006.
- [3] S. Thipprakmas, M. Jin, K. Tomokazu, Y. Katsuhiro and M. Murakawa, "Prediction of Fineblanked surface characteristics using the finite element method (FEM)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, pp. 391-398, Mar. 2008.
- [4] M. Farzin, H. R. Javani, M. Mashayekhi and R. Hambli, "Analysis of blanking process using various damage criteria," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1, pp. 287-290, Jul. 2006.
- [5] K. Mori, Y. Abe, Y. Kidoma and P. Kadarno, "Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 65, pp. 41-46, Feb. 2013.
- [6] P. Chumrum, N. Koga and V. Premanond, "Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, no. 5, Jul. 2015.
- [7] L. Komgrit and L. Pongsakorn, "FE Simulations and Experimental Analysis of the Blade Angle Effect on Sheared Surface in Trimming Process of Advanced High-Strength Steel Sheet," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, Jun. 2019.
- [8] S.-H. Song and W. Choi, "FEM investigation on thermal effects on force in high-speed blanking of mild steel," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, pp. 631-635, May 2016.
- [9] P. Pesch, S. Sattel, S. Woestmann, P. Masarczyk, K. Herden, T. Stucky, A. Martense, S. Ulriche and H. Hollecke, "Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 163-164, pp. 739-746, Jan. 2003.
- [10] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, "The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by Ball-on-disk technique," *Engineering Journal of Research and Development*, Vol. 20, no. 4, pp. 84-91, Oct. 2009.
- [11] Ö. N. Cora, A. AğCayazi, K. Namiki, H. Sofuoglu and M. Koç, "Die wear in stamping of advanced high strength steels – Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings," *Tribology International*, vol. 52, pp. 50-60, Apr. 2012.
- [12] J. A. Schey, *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear*, 2nd ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1984.