

การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด

ปกรณ์ ชุมรัมย์¹ วารุณี เปรมานนท์¹ และ คมกริช ละวรรณวงษ์^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัดด้วยเทคโนโลยีการเคลือบผิวและการปรับสภาพผิว โดยทำการศึกษาความเสียหายและการสึกหรอโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ร่วมกับการทำงานปั๊มตัดโลหะโดยใช้แม่พิมพ์ตัดในการขึ้นชิ้นถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์และการปรับสภาพผิวเพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางช่วยในการตัดสินใจในการเลือกใช้ชนิดของฟิล์มแข็งเคลือบผิว โดยวัสดุที่ใช้ทำพื้นซ์และบอลเป็นเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS ทำการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 ± 1 HRC. จากนั้นจึงนำไปเคลือบผิวและปรับสภาพผิวได้แก่ TiC-CVD (Chemical Vapour Deposition), TiCN-CVD, TiCN-PVD (Physical Vapour Deposition), VC-TD (Thermal Diffusion) และไม่เคลือบผิว ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองการตัดและแผ่นจาน เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ตามมาตรฐาน JISหนา 2 มิลลิเมตร จากการทดลอง พบว่าการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวช่วยลดการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายได้ ทั้งจากการทดลองโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการปั๊มตัดแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD มีแนวโน้มการลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าผิวเคลือบตัวอื่นๆ ซึ่งพบว่าการเกิดจากความแข็งแรงในการเกาะยึดของฟิล์ม TiCN บนวัสดุทำแม่พิมพ์มีค่าสูงกว่าตัวอื่น

คำสำคัญ: การเคลือบผิว, ฟิล์มแข็งเคลือบผิว, แม่พิมพ์ตัด, การสึกหรอ, เหล็กแผ่นรีดเย็น

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต, คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: komgrit.law@kmutt.ac.th, komgrit.law@rmutr.ac.th รับเมื่อ 8 ตุลาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 2 มีนาคม 2559

Application of surface modification for Extension tool life in blanking process

Pakorn Chumrum¹, Varunee Premanond¹ and Komgrit Lawanwong^{2*}

Abstract

The objective of this research is to increase of blanking die life by surface technology of coating and surface treatment. Friction and wear phenomenon were investigated by ball on disk technique by using tribometer. Blanking die experiments were also performed to confirm the performance of coated and treated tool surface for a guide line to select the proper types of thin film coating or surface treatment. Punch and ball were produced from cold work tool steel grade SKD11 JIS (hardened to 60 ± 1 HRC. Four types of hard film coating are TiC-CVD (Chemical Vapour Deposition), TiCN-CVD, TiCN-PVD (Physical Vapour Deposition), VC-TD (Thermal Diffusion) and Non-coating. Workpiece and disk material used in this experiment were made by cold rolled steel sheet JIS; SPCC of 2 mm thickness. It has been found experimentally that the selected types of treatment and coating showed ability to reduce wear and friction under both conditions of ball on disk test and blanking test. Die and ball coated with TiCN using CVD process illustrated maximum reduction of wear. This is due to high adhesion strength between the coated film and substrate.

Keywords : Coating, Hard Thin Film Coated, Blanking die, Wear, Cold Rolled Steel

¹ Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

² Department of Production Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus, Thailand.

* Corresponding author, E-mail: komgrit.law@kmutt.ac.th, komgrit.law@rmutr.ac.th Received 8 October 2015,

Accepted 2 March 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันการสึกหรอที่เกิดขึ้นในงานแม่พิมพ์เป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องใช้แม่พิมพ์เป็นส่วนประกอบในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่พิมพ์ตัดที่มีอัตราการสึกหรอสูงจากแรงดันสัมผัสจากการทำงาน เทคโนโลยีการเคลือบผิวแม่พิมพ์เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อชะลอการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ โดยการเคลือบผิวเป็นการปรับปรุงสมบัติของผิวแม่พิมพ์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานโดยการปรับส่วนผสมและโครงสร้างภายในของพื้นผิว (Surface Treatment) หรือนำเอาวัสดุอื่นที่มีสมบัติที่เหมาะสมเคลือบบนผิวชิ้นงาน (Surface coating) อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งเป็นการเพิ่มต้นทุนแม่พิมพ์ที่นับว่าเป็นสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้ชนิดของฟิล์มแข็งควรพิจารณาอย่างรอบคอบ เนื่องจากปัจจุบันในประเทศไทยก็มีผู้ประกอบการที่สามารถเคลือบผิวแม่พิมพ์ได้หลายแห่งทั้งที่เป็นของต่างชาติของคนไทย และการร่วมทุนระหว่างต่างชาติและคนไทย และยังมีฟิล์มแข็งให้เลือกหลากหลายชนิดทั้งที่เคลือบด้วยกรรมวิธีไอเคมี (CVD) และไอกายภาพ (PVD) ซึ่งในแต่ละกรรมวิธีจะมีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ชนิดของฟิล์มที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเอาเทคโนโลยีการเคลือบผิวมาใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะด้าน เช่น 1998 T.Sato [1] ได้ทำการศึกษารูปร่างการสึกหรอและสมบัติในการต่อต้านการกัดของสารเคลือบผิว TiN, TiC และ TiCN บนวัสดุพื้น SKH 51 (JIS) โดยใช้การทดสอบแบบจานหมุน

(Ball-on-Disk) ในปี 2000 S.Hogmark [2] เสนอแนวทางในการออกแบบและการประเมินผลจากการเคลือบผิวบนพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานและส่วนประกอบต่างๆ ในเครื่องจักร โดยกล่าวถึงการพัฒนาการเคลือบผิวในลักษณะวิธีการต่างๆ เช่น Multilayer, Superlattices, Nano-crystalline, และ Multi-component ซึ่งประเด็นสำคัญอยู่ที่ก่อนที่จะทำการเคลือบผิวนั้นต้องคำนึงถึงการออกแบบการเคลือบผิว โดยต้องพิจารณาองค์ประกอบและปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและอาจมีผลกระทบต่อกระบวนการเคลือบผิว ต่อมา 2003 C.Mitterer [3] ได้ทำงานวิจัยเพื่อพิจารณาวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยได้ศึกษาสารเคลือบผิวที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบทั้ง 5 ชนิด คือ TiN, Nitriding, TiCN, TiBN และ TiAlN โดยกรรมวิธี PACVD ในปี 2009 Ö.N.Cora [4] ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอด้วยการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน 7 ชนิด ด้วยการทดสอบแบบชุดผิวบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP600 AHSS ในปี 2011 B.Podgornik [5] ได้ทำการวิจัยฟิล์มเคลือบเพื่อทดแทนการใช้สารหล่อลื่นโดยการทดลองได้ทำการเคลือบผิวลงบนพื้นผิวที่มีสมบัติทางกลและทางเคมีต่างกัน โดยเคลือบด้วยกรรมวิธี PVD-TiCN, AlCrN และ DLC ทำการทดสอบกับแผ่นโลหะ M800-65K จำนวน 4,000 ครั้ง/การทดลอง ซึ่งพบว่าภายหลังการทดสอบการสึกหรอลดลง แรงในการตัดลดลง และยังมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำอีกด้วย จากนั้นนักวิจัยทีมเดิม 2012 Ö.N.Cora [6] ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการป้องกันการสึกหรอโดยเน้นการเคลือบผิวจาก PVD, CVD, และ TD โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของ substrate ทำการทดสอบ

การสึกหรอโดยใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยใช้เครื่อง CNC เป็นเครื่องจักรในการควบคุมการขุดผิว ในการวิจัยพบว่าชนิดของ substrate นั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอเนื่องจากการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดลงบน substrate ที่ต่างกันแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวก็จะแตกต่างกันไปด้วย ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอบนแม่พิมพ์ตัดที่ผ่านมาพบว่ามีนักวิจัย [7-9] จากหลายประเทศให้ความสำคัญต่อ tool clearance ว่าส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานอย่างไร และงานวิจัยทางด้านเคลือบผิวที่มีการนำเสนออีกอย่างแพร่หลายกลับพบว่างานวิจัยที่นำฟิล์มเคลือบผิวไปใช้งานกับงานขึ้นรูปโลหะ โดยเฉพาะแม่พิมพ์ตัดนั้นมียุ่่น้อยมากในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงสมบัติการต้านทานการสึกหรอเพื่ออายุของแม่พิมพ์ตัด โดยเลือกใช้ฟิล์มเคลือบชนิดต่างๆและการปรับสภาพผิวที่เหมาะสมมุ่งเน้นสร้างฐานข้อมูลการใช้งานให้กับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเลือกใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิว

2. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบการสึกหรอ

เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบชนิดต่างๆในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่สัมผัสด้วยวิธี Ball-on-disk ตามมาตรฐาน (ASTM G133-95) [10] ดังรูปที่ 1 ควบคู่ไปกับการบีบอัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking die)

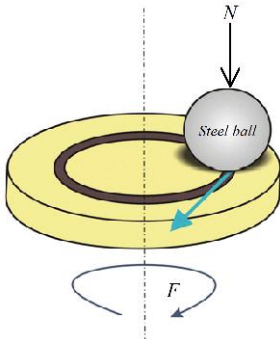
2.1 การทดสอบด้วยเทคนิค Ball-on-Disk

สำหรับการทดสอบ Ball-on-disk ในงานวิจัยนี้แผ่นงานคือวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS;SPCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นงานคือ 25 มม.หนา 2 มม. และบอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น JIS;SKD11 ชุบแข็ง 60 ± 2 HRC จากนั้นนำไปเคลือบผิวด้วยฟิล์มเคลือบ 3 ชนิด คือ TiCN-PVD (Double layer) , TiCN-CVD (Multilayer) , TiC-CVD และปรับสภาพผิว 1 แบบ คือ VC-TD ในส่วนแรกของการทดสอบคือ การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการที่ 1 โดยที่ μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน F คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ และ N คือแรงตั้งฉากหรือแรงกดวัตถุสัมผัสเข้าหากัน ซึ่งมีหลักการทำงานดังในรูปที่ 2



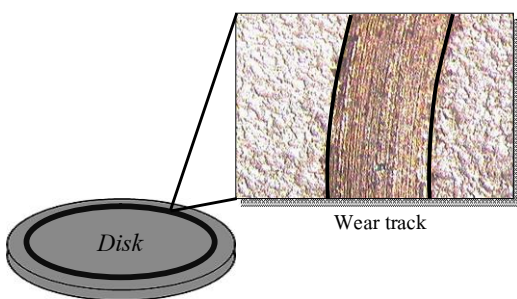
รูปที่ 1 การทดสอบด้วยวิธี Ball-on-disk บนเครื่องไดรฟ์มอเตอร์

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



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Ball-on-disk

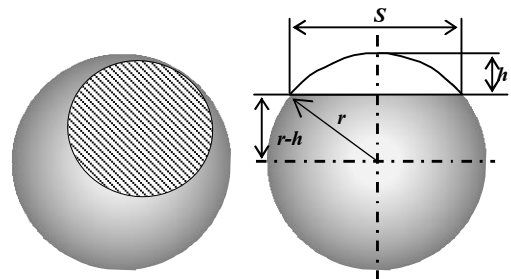
เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในวิธี Ball-on-disk จะต้องไม่พิจารณาถึงการสึกหรอที่จะเกิดขึ้น แต่เนื่องจากแผ่นจานซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าบอล จึงส่งผลให้เกิดการสึกหรอขึ้น ดังรูปจำลองที่ 3 และเพื่อรักษาสภาพของค่าแรงดันที่จุดสัมผัส (Contact pressure) กำหนดค่าขนาดความกว้างของรอยที่เกิดขึ้นที่แผ่นจานต้องไม่เกิน 600 ไมโครเมตร ทำให้ต้องเปลี่ยนแผ่นจานตามชนิดของผิวเคลือบ



รูปที่ 3 จำลองรอยการสึกหรอบนแผ่นจาน

ซึ่งรอยการสึกหรอ (s) ที่เกิดขึ้นกับบอลสามารถวัดได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ (Optical Macro scope)

ดังรูปที่ 4 และ ระยะ h สามารถคำนวณจากสมการที่ 2 สำหรับปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 ไม่ใช้สารหล่อลื่นขณะทำการทดสอบ คงที่แรงกด 10 นิวตัน ความเร็วเชิงเส้นตลอดการทดลองคือ 10 ซม./วินาที และ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4 วิธีการคำนวณการสึกหรอบนบอล

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \quad (2)$$

$$V = \pi h^2 \left[r - \frac{h}{3} \right] \quad (3)$$

$$k = \frac{V}{F_N S} \quad (4)$$

V , Wear volume [mm³]

s , Wear track diameter [mm]

h , Wear Height [mm]

r , Ball radius [mm]

k , Specific wear rate [mm³/Nm]

F_N , Normal load [N]

S , Sliding distance [m]

2.2 ทดสอบการสึกหรอด้วยแม่พิมพ์ตัด

เพื่อรองรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน ในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้แม่พิมพ์ตัดซึ่งพบการสึกหรอรุนแรงที่สุด โดยออกแบบแม่พิมพ์เพื่อรองรับพื้นที่ลักษณะกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 ออกแบบให้มีระยะของเคลือบเร็นซ์ ร้อยละ 5 ของความหนาชิ้นงาน วัสดุทำพ่นผลิตจาก เหล็กกล้าเครื่องมือ งานเย็น JIS; SKD11 โดยชุบแข็งที่ระดับความแข็งคงที่ เท่ากับ 60 ± 1 HRC วัสดุชิ้นงานทำจากวัสดุเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ JIS;SPCC หนา 2 มิลลิเมตร เช่นเดียวกันกับการทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้วย Ball-on-disk



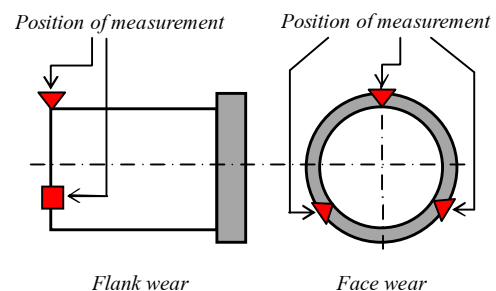
รูปที่ 5 ตัวอย่างพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองทำการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวที่ พันซ์ 4 ประเภท ด้วยกัน คือการเคลือบผิวด้วย TiC-CVD , TiCN-CVD (Multilayer) , TiCN-PVD (Double layer) และการปรับสภาพผิวด้วย VC-TD จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวโดยรายละเอียดสมบัติของฟิล์มเคลือบผิว และการปรับสภาพผิวแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าความแข็งผิวเคลือบ และความหนาของชั้นฟิล์มได้จากค่ามาตรฐานของบริษัทเคลือบผิว

ตารางที่ 1 สมบัติของผิวเคลือบ

Type of coating	Hardness (HV)	Thickness of film (μm)	Roughness Average ; R_a (μm)
Non-Coating	650	-	0.07
TiC-CVD	3800	5-8	0.045
TiCN-CVD	3300	8	0.033
VC-TD	3019	7	0.026
TiCN-PVD	2,500	3-5	0.017

ในการทดลองทำการศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ โดยทำการบ่มตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ในสภาวะที่ไม่มีมีการหล่อลื่น จากนั้นบันทึกอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ด้วยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพื้นที่และวัดระยะการสึกหรอของพื้นที่ทั้งบริเวณด้านหน้า (Face wear) และด้านข้าง (Flank wear) ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (Optical Micro scope) ที่มีโปรแกรมฟังก์ชันวัดระยะ ซึ่งตำแหน่งที่ใช้ในการวัดระยะการสึกหรอบนคมตัดของพื้นที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งการวัดระยะการสึกหรอทางด้านข้างและด้านหน้าของพื้นที่

3. ผลการทดลองด้วยวิธี Ball on disk

3.1 ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส

จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นจานและบอล SKD11 ที่ทำการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกันด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ ดังรูปที่ 7 พบว่าในกรณีที่ไม่มีการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิว มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด ประมาณ 0.48 ในขณะที่บอลปรับสภาพผิวด้วย VC-TD ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือบอลที่เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD (Multilayer) TiC-CVD จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน และบอลที่เคลือบผิวด้วย TiCN-PVD (Double layer) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากที่สุดในกลุ่มของการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิว จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวนั้นมีส่วนช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้เล็กน้อย

3.2 อิทธิพลของความเรียบผิวที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

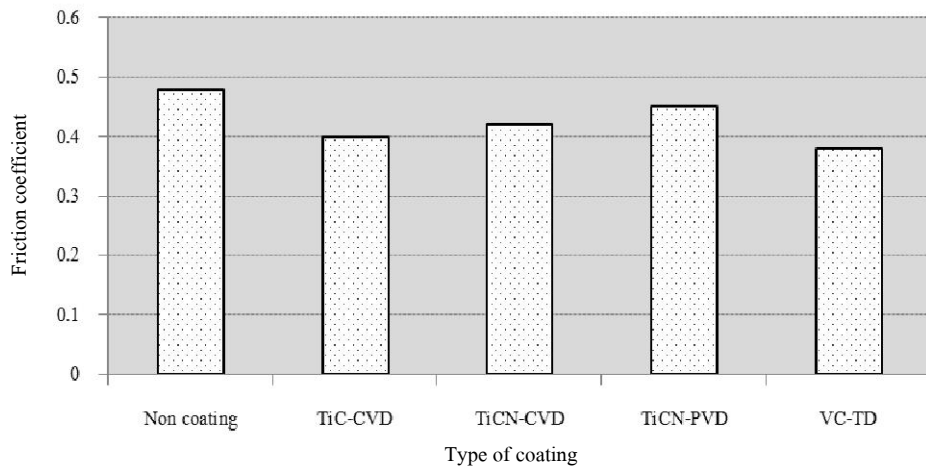
เนื่องจากการเคลือบผิวและการปรับสภาพผิวแต่ละชนิดนั้นทำให้ผิวบอลที่ได้หลังผ่านการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวมีค่าความเรียบผิวที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่ากรณีของบอลที่มีการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวด้วย VD-TD นั้น มีความเรียบผิวดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าเรียบผิวนั้นพบว่าค่าความหยาบผิวที่ต่างกันส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างของความเรียบผิว Ra ต่างกันเล็กน้อยคือระหว่าง (0.02-0.08 μm)

3.3 อิทธิพลของความแข็งของผิวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

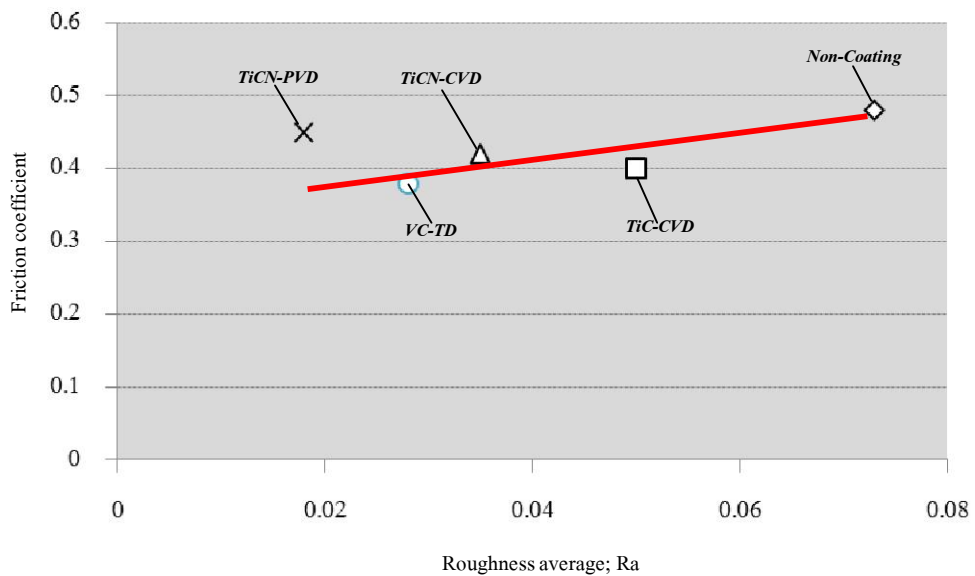
ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งที่ผิวของบอลและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าเมื่อความแข็งของผิวเคลือบมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการที่ความแข็งของผิวมีค่ามากจะทำให้ความสามารถในการต่อต้านการเปลี่ยนรูปถาวรมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย [11] พื้นที่การเปลี่ยนรูป (Deformation) บริเวณที่บอลสัมผัสกันจะมีขนาดเล็กมาก ทำให้บริเวณพื้นที่สัมผัสจริง (real contact area) มีค่าน้อยถึงแม้พื้นที่สัมผัสเสมือน (apparent contact area) จะไม่แตกต่างกันก็ตาม ดังนั้นเมื่อพื้นที่สัมผัสจริงน้อย การตรวจจับแรงเสียดทานที่เครื่องไทรบอมิเตอร์วัดได้ก็จะน้อยลงหรือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงนั่นเอง

3.4 ปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับฟิล์มเคลือบและการปรับสภาพผิวในการทดสอบแบบ Ball on disk

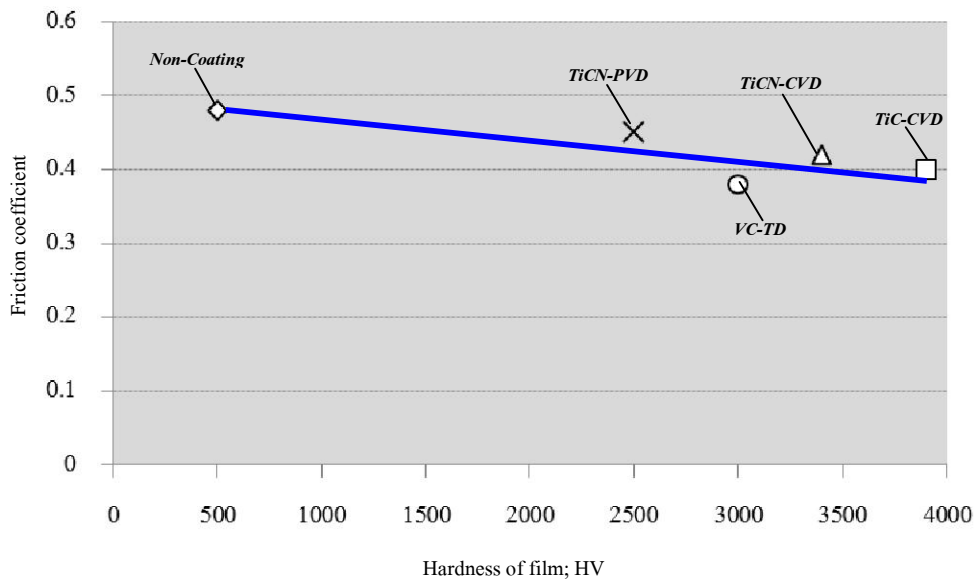
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอ (Wear volume) ของบอลที่ไม่ได้เคลือบและที่เคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวกับระยะทางที่ใช้ในการเสียดสีดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าเมื่อระยะทางในการเสียดสีเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และบอลที่เคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวมีปริมาณการสึกหรอที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบอลที่ไม่ได้เคลือบผิวที่มีการสึกหรอมากที่สุด โดยบอลที่เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD สึกหรอที่น้อยที่สุด รองลงมาคือ TiC-CVD, ส่วนการเคลือบผิวด้วย TiCN-PVD และการปรับสภาพผิวด้วย VC-TD มีแนวโน้มของสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน



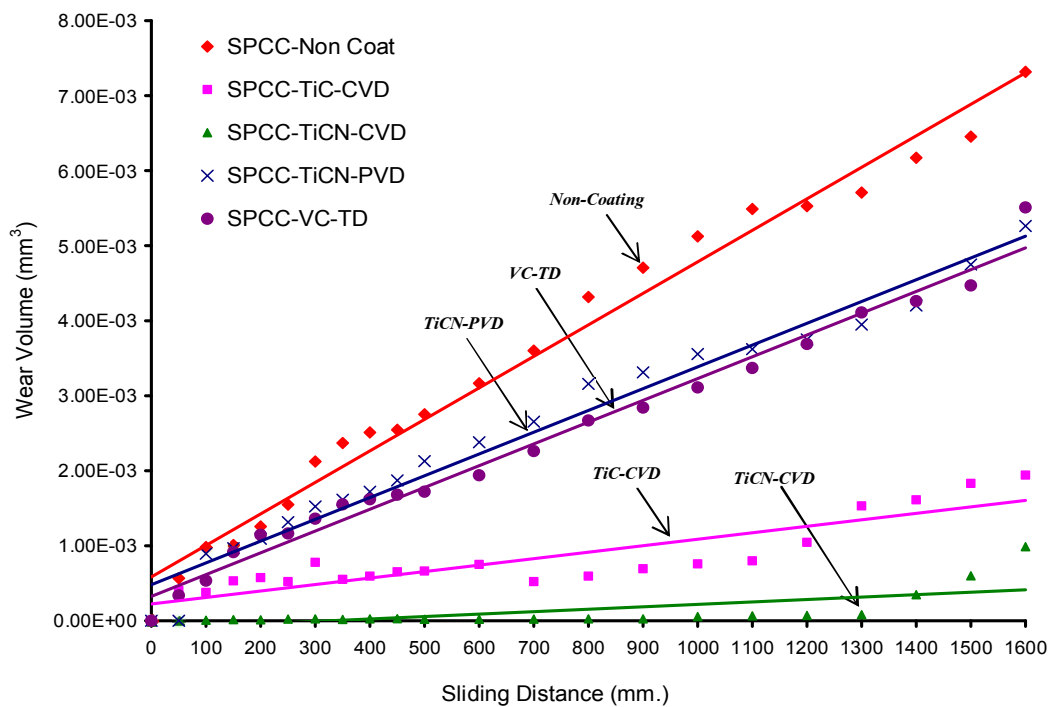
รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นกับผิวเคลือบและปรับสภาพผิว



รูปที่ 8 อิทธิพลความเรียบผิวของบอลภายหลังเคลือบผิวและปรับสภาพผิวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



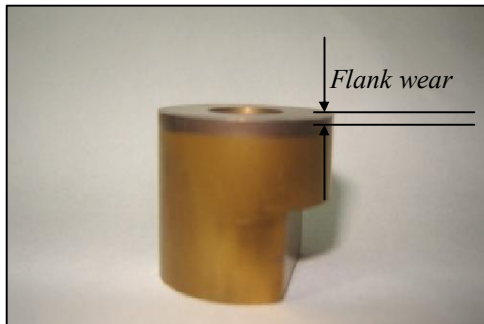
รูปที่ 9 อิทธิพลความแข็งของฟิล์มเคลือบและการปรับสภาพผิวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



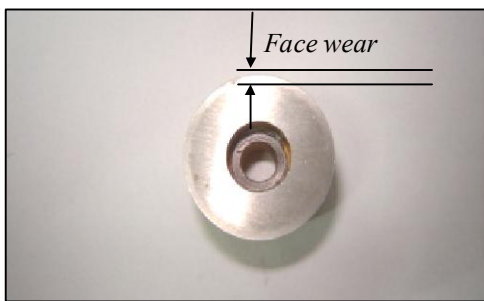
รูปที่ 10 ปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับผิวเคลือบและการปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการ Ball on disk

4. ผลการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด

4.1 ระยะเวลาสึกหรอด้านข้างและด้านหน้าของฟันซ์



(ก) ตำแหน่งการวัดการสึกหรอด้านข้าง

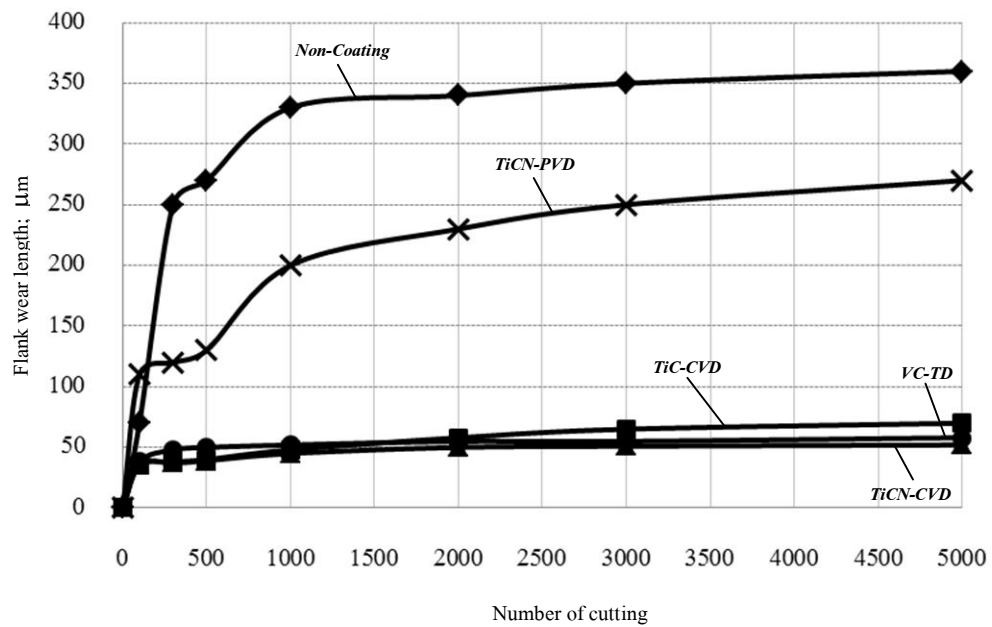


(ข) ตำแหน่งการวัดการสึกหรอด้านข้าง

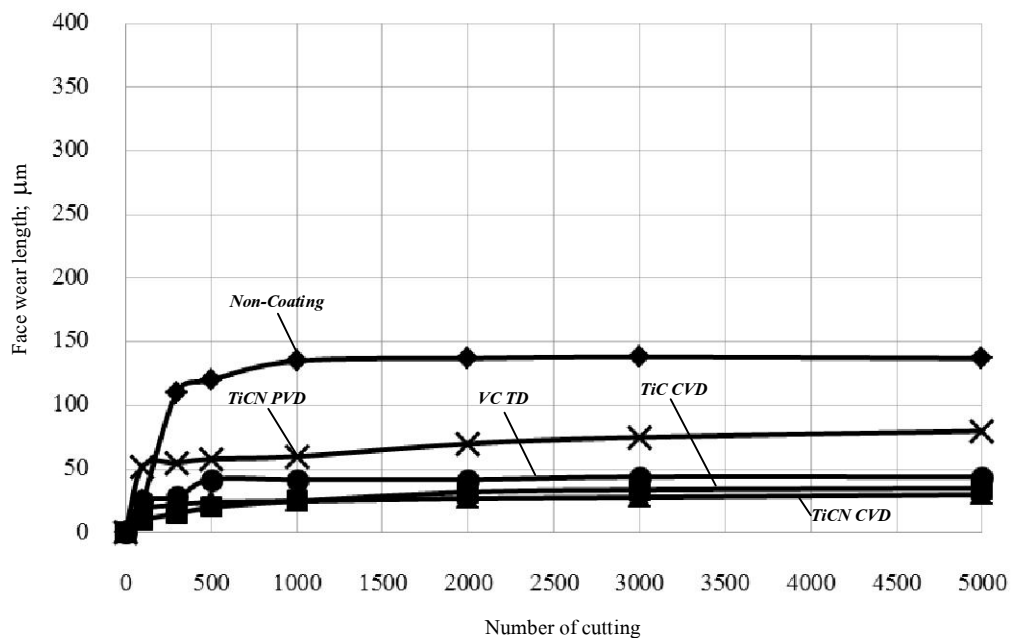
รูปที่ 11 พิกัดการตรวจสอบการสึกหรอด้านข้างและด้านหน้าของฟันซ์

พิกัดการตรวจสอบระยะการสึกหรอของฟันซ์ด้านข้างและด้านหน้า แสดงดังรูปที่ 11 ผลการทดลองในรูปที่ 12-13 แสดงการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับฟันซ์หลังผ่านการใช้ตัดวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ชนิดเดียวกันกับการทดสอบ Ball on disk) พบว่าการสึกหรอของฟันซ์ทั้งด้านหน้าและด้านข้าง ในช่วงแรก (ชิ้นที่ 1-1,000) การสึกหรอที่เกิดขึ้นที่ฟันซ์เพิ่มสูงขึ้น

อย่างต่อเนื่องและรวดเร็วจนกระทั่งถึงการตัดครั้งที่ 1,000 ฟันซ์เริ่มมีอัตราการสึกหรอที่ช้าลงจนมีแนวโน้มเกือบที่จะคงที่เนื่องจากการที่ระยะช่องว่างแม่พิมพ์แต่ละตัวถูกขยายใหญ่ขึ้นและคมตัดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นรัศมี ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการสึกหรอในงานแม่พิมพ์ตัด [12] คือในช่วงแรกการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการตัดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความรุนแรงของการสึกหรอด้านข้างและด้านหน้าของฟันซ์พบว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นด้านข้างจะมากกว่าด้านหน้า ฟันซ์เนื่องจากทางด้านข้างฟันซ์จะถูกเสียดสีถึงสองครั้ง ในจังหวะการตัด 1 ครั้ง (กดลงและดึงขึ้น) ทำให้มีการเคลื่อนที่สัมผัสมากกว่าด้านหน้าและเมื่อฟันซ์ยกขึ้นยังมีเนื้อชิ้นของงานบริเวณรอบรูปบีบรัด เนื่องจากในเนื้อโลหะบางส่วนมีการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic recovery) ในส่วนนี้จึงเสียดสีกับด้านข้างฟันซ์อีกครั้ง และพื้นที่ที่เกิดความเค้นสูงสุดบริเวณด้านข้างเคลื่อนตำแหน่งสูงขึ้นมาจากคมตัดเนื่องจากการสึกหรอของคมตัดทำให้บริเวณด้านข้างของคมตัดฟันซ์มีการสึกมากกว่าทางด้านหน้าคมตัดฟันซ์ในส่วนของความต้านทานการสึกหรอด้วยการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวพบว่า ฟันซ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวเกิดการสึกหรอที่บริเวณคมตัดมากกว่าฟันซ์ที่มีการเคลือบผิวและปรับสภาพผิวอย่างชัดเจน โดยการเคลือบผิวด้วย TiCN-PVD สามารถต่อต้านการสึกหรอได้น้อยที่สุดส่วนการปรับสภาพผิวด้วย VC-TD การเคลือบผิวด้วย TiC-CVD และ TiCN-CVD สามารถลดอัตราการสึกหรอได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามระยะการสึกหรอในกลุ่มของ VC-TD, TiC-CVD และ TiCN-CVD ก่อนข้างใกล้เคียงกัน

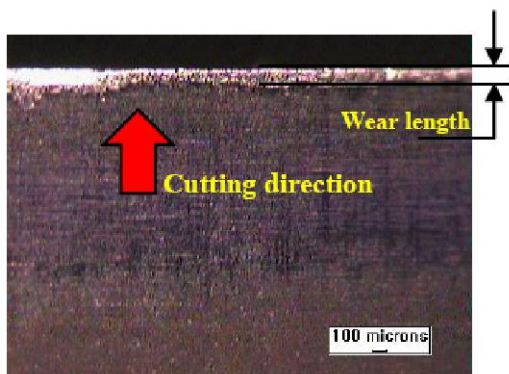


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอทางด้านข้างพื้นซ์ (Flank Wear)

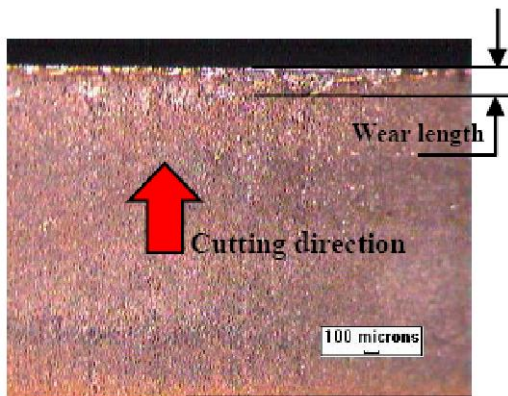


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอทางด้านหน้าพื้นซ์ (Face Wear)

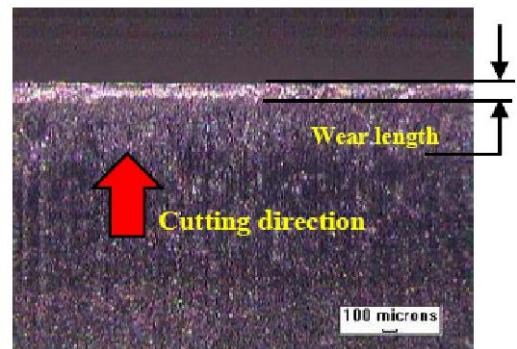
ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเคลือบผิวและการปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการ CVD มีแรงยึดเกาะของผิวฟิล์มกับผิวชิ้นงานที่ดีจากผลการทดสอบการขีดข่วน (Scratch Test) [13] ส่งผลให้การหลุดลอกของฟิล์มเป็นไปได้อย่างน้อย รวมถึงความแข็งแรงและความหนาของชั้นฟิล์มที่ค่อนข้างมาก ทำให้การสึกหรอน้อยที่สุดในกลุ่มของการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 14



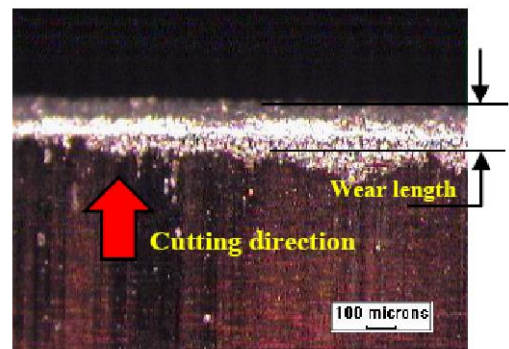
(ก) เคลือบผิวด้วย TiC-CVD



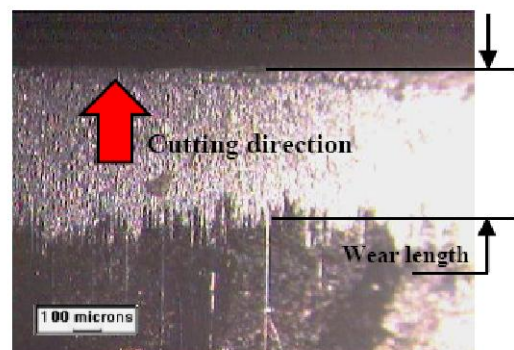
(ข) เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD



(ค) ปรับสภาพผิวด้วย VC-TD



(ง) เคลือบผิวด้วย TiCN-PVD



(จ) Non-coating

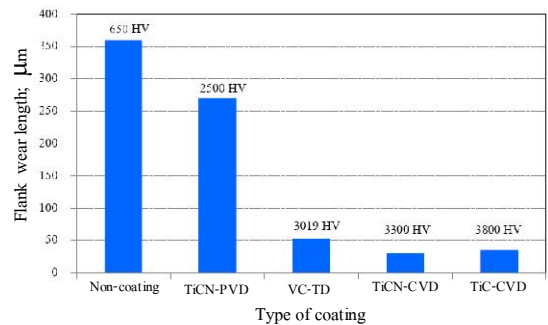
รูปที่ 14 การสึกหรอด้านข้างพื้นที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มเคลือบและการปรับสภาพผิวภายหลังการตัด 5,000 ครั้ง

4.2 อิทธิพลความแข็งที่ผิวที่มีต่อการสึกหรอของพันธ

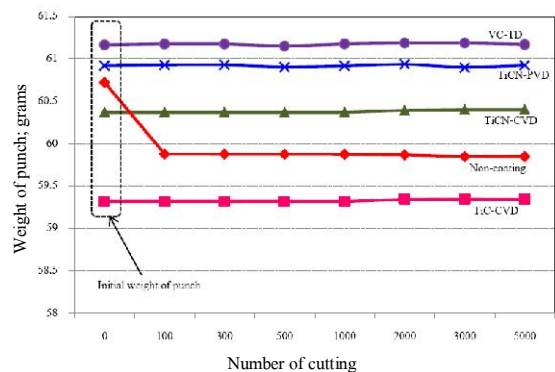
รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งของผิวเคลือบกับการสึกหรอที่เกิดขึ้นที่ด้านข้างของพันธ พบว่าเมื่อความแข็งมากขึ้นส่งผลให้ระยะการสึกหรอลดลงอย่างชัดเจน ส่วนผิวเคลือบ TiCN-PVD ถึงแม้จะมีค่าความแข็งค่อนข้างสูง แต่มีความแข็งแรงในการยึดเกาะต่ำความสามารถในการต้านทานการสึกหรอจึงไม่ดีเท่าที่ควร

4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพันธในแม่พิมพ์ตัด

ภาพรวมของการสึกหรอทั้งด้านข้างและด้านหน้าของพันธ สามารถสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพันธดังรูปที่ 16 โดยเก็บข้อมูลน้ำหนักก่อนทำการทดลองจากนั้นนำมาซึ่งทุกครั้งทีวระยะการสึกหรอ ผลจากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักพันธมีความสัมพันธ์กับระยะการสึกหรอที่เกิดขึ้น ในกรณีของพันธที่ไม่ทำการเคลือบผิวอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของพันธจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ในขณะที่พันธเคลือบผิวพบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมีน้อยมาก แม้ว่าบางช่วงพบว่าน้ำหนักของพันธมากขึ้นเนื่องจากการเกาะติด (Adhesion) ของเศษชิ้นงานที่บริเวณปลายของพันธ [12] อย่างไรก็ตามภายหลังการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของความสามารถในการสึกหรอโดยใช้ฟิล์มเคลือบและปรับสภาพผิว พบว่า สามารถลดการสึกหรอได้เป็นอย่างดี ทำให้เกิดความมั่นใจในการประยุกต์ใช้ฟิล์มเคลือบผิวในงานขึ้นรูปโลหะเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการสึกหรอนอกเหนือจากการชุบแข็งทั่วไป



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของผิวเคลือบกับการสึกหรอด้านข้างของพันธที่จำนวนการตัด 5,000 ครั้ง



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพันธกับจำนวนการตัดชิ้นงาน

5. สรุปผล

ฟิล์มเคลือบที่มีความแข็งสูงมีแนวโน้มให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ แต่ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของผิวเคลือบจะต้องไม่น้อยเกินไปจนอาจจะทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวคู่สัมผัสได้ การเคลือบผิวและปรับสภาพด้วยฟิล์มแข็งมีแนวโน้มในการลดการสึกหรอที่เกิดขึ้นของแม่พิมพ์ เนื่องจากความแข็งที่ผิวเพิ่มสูง อย่างไรก็ตามฟิล์มแข็งต้องมีการยึดเกาะที่ผิวแม่พิมพ์

อย่างเพียงพอ สำหรับการทดลองหาปริมาณการสึกหรอแบบเคลื่อนที่สัมผัสในกรณีเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองการบ่มตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sato ,T. Besshi , D. Sato and K. Inouchi, “Evaluation of wear and Tribological Properties of Coating Rubbing Against Copper”, *Journal of Wear* 220, 1998, pp. 154-160
- [2] S. Hogmark, S. Jacobson and M. Larsson, “Design and evaluation of tribological coatings”, *Journal of Wear* 246, 2000, pp. 20–33.
- [3] C. Mitterer, F. Holler, D. Reitberger, E. Badisch, M. Stoiber, C. Lugmair, R. Nöbauer, T. Müller and R. Kullmer, “Industrial Application of PACVD Hard Coatings”, *Journal of Surface and Coating Technology* 163-164, 2003, pp. 716-722.
- [4] Ö.N. Cora, and M. Koça, “Experimental investigations on wear resistance characteristics of alternative die materials for stamping of advanced high-strength steels (AHSS)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49, 2009, pp. 897-905.
- [5] B. Podgornik, B. Zajec, N. Bay and J. Vizintin, “Application of hard coating for blanking and piercing tools”, *Journal of WEAR* 270, 2011, pp. 850-855.
- [6] Ö.N. Cora, A. Agcayazi, K. Namiki, H. Sofuoğlu and M. Koç, “Die wear in stamping of advanced high strength steels Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings”, *Tribology International* 52, 2012, pp. 50-60.
- [7] 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 & Manufacture* 65, 2013, pp. 41–46.
- [8] J.A. Soares, M.L. Gipiela, S.F. Lajarin and P.V.P. Marcondes, “Study of the punch-die clearance influence on the sheared edge quality of thick sheets”, *International Journal of Advance Manufacturing Technology* 65, 2013, pp. 451–457.
- [9] M. Murakawa, M. Suzuki, T. Shionome, F. Komuro, A. Harai, A. Matsumoto, N. Koga, “Precision Piercing and Blanking of Ultrahigh-strength Steel Sheets”, *Procedia Engineering* 81, 2014, pp. 1114-1120.
- [10] ASTM G133-95, “Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear”, 2010, pp. 523-536.
- [11] K. Lawanwong and V. Premanond, “The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by Ball-on-disk technique”, *R&D Journal of The engineering Institue of Thailand under H.M. The King’s Patronage*, 2009, pp. 60-65. (in Thai)

- [12] P. Kaewtatip, V. Premanond and C. Maka, "Study on the Influences of Types of Tool Steel on Wear Behavior of Blanking Die", KMUTT R&D Journal 28, 2005, pp. 175-177. (in Thai)
- [13] B. Sresomroeng, K. Lawanwong, V. Premanond, R. Hato, P. Kaewtatip, A. Khanchawana and N. Koga, "Tribological behavior Of thin film coatings against high strength steel", International Journal of Abrasive Technology 2, 2009, pp. 313-328.