สมบัติทางไตรบอโลยีของเครื่องมือตัดและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดิน

The Tribological Properties of Cutting Tools and Suitable Conditions for Turning Alloy Steel for Producing Excavator Parts

เฉลิม ขุนเอียด[1] และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง[1 *]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ [1] ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC)

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

217 ถนนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

Chalerm Khunead[1] and Bhadpiroon Watcharasresomroeng[1 *]

[1] Department of Tool and Die Engineering, [1] Tool and Die Technology Center (TDTC),

Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

217 Nonthaburi 1 Road, Suanyai, Muang, Nonthaburi, Thailand, 11000

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: bhadpiroon.s@rmutsb.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-2289-1951

Received: 8 September 2020, Revised: 8 December 2020, Accepted: 23 April 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางไตรบอโลยีของเครื่องมือตัดและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดิน เครื่องมือตัดที่ศึกษาทำจากวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 และ TiCN ด้วยกระบวนการ CVD และ PVD สมบัติทางกลของฟิล์มแข็งบางที่เคลือบบนเครื่องมือตัดถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคนาโนอินเดนเทอร์ สมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานถูกประเมินจากการจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในเรื่องของเวลาการผลิตในการทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานจึงกำหนดความเร็วตัดคงที่เท่ากับ 175 m/min ซึ่งเป็นค่าความเร็วตัดที่เร็วที่สุดตามค่าแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราป้อนตัดและความลึกการตัด จากการศึกษาพบว่าเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์ม TiCN+Al_2O_3 ด้วยกระบวนการ CVD ซึ่งมีค่าความแข็งสูงที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 0.343 เป็นเครื่องมือตัดที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดิน โดยชิ้นงานที่ได้มีค่าความหยาบผิว Ra ต่ำที่สุดเมื่อใช้อัตราป้อนและความลึกการตัดเท่ากับ 0.10 mm/rev และ 0.50 mm ตามลำดับ

คำสำคัญ ไตรบอโลยี เครื่องมือตัด การกลึง เหล็กกล้าผสม

Abstract

The objective of this study is to investigate the tribological properties of cutting tools and the suitable conditions for turning alloy steel for the manufacturing of excavator parts. The cutting tool studied is made of cemented carbide material coated with hard thin films of TiCN+Al_2O_3 and TiCN by CVD and PVD processes. The mechanical properties of the cutting tools with a thin film coating are investigated by nanoindenter techniques. The tribological properties between the contacting surfaces of the cutting tool

material and the workpiece material are evaluated with simulation testing by Pin-on-Disk in accordance with ASTM G99-95a. In order to be effective in terms of production time, turning of the workpiece material is set to a constant cutting speed of 175 m/min during the experiment, which is the fastest value according to the manufacturer's recommendation. The studied factors in the turning process include feed rates and cutting depths. From the study, it was found that the cutting tool coated with TiCN+Al_2O_3 film by CVD process, which had the highest hardness in this study, gave the lowest coefficient of friction between the contacting surfaces as 0.343. It is a suitable cutting tool for turning alloy steel for producing excavator parts. The workpieces had the lowest Ra surface roughness when using a feed rate and a cutting depth of 0.10 mm/rev and 0.50 mm, respectively.

Keywords: Tribology, Cutting Tool, Turning, Alloy Steel

1. บทนำ

การกลึงเป็นกระบวนแปรรูปโลหะโดยการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่สำคัญกระบวนการหนึ่งตามมาตรฐาน DIN 8580 [1] เพื่อให้เกิดรูปทรงตามต้องการด้วยการทำให้วัสดุชิ้นงานสูญเสียเนื้อวัสดุด้วยคมตัดของเครื่องมือตัด (Cutting Tool) แม้ว่าจะเป็นกระบวนการที่มีการเสียเศษจากการตัดเฉือนเนื้อวัสดุทิ้ง แต่ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ได้ขนาดของชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูงและให้คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกลึง ดีรองจากกระบวนการเจียรไน (Grinding) และการขัดผิวมัน (Polishing) แต่ด้วยปัจจุบันมีการใช้วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงเพื่อให้สามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วน ซึ่งค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นของวัสดุจะส่งผลให้ความแข็งของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ความสามารถในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุลดลง รวมถึงเครื่องมือตัดจะสึกหรอเร็วกว่ากำหนด [2] โดยทั่วไปการสึกหรอ (Wear) ของเครื่องมือตัดจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเองเนื่องจากส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูป ทำให้ผู้ผลิตเครื่องมือตัดมีการพัฒนาวัสดุและใช้สารเคลือบผิวหลายชนิดเคลือบทับบนผิวของวัสดุเครื่องมือตัดออกมาขายตามท้องตลาดซึ่งแต่ละชนิดก็มีสมบัติและราคาที่แตกต่างกัน ทำให้ต้นทุนการผลิตที่เกิดจากการใช้เครื่องมือตัดแปรเปลี่ยนตามชนิดของเครื่องมือตัดที่เลือกใช้ อีกทั้งหากเลือกใช้ชนิดเครื่องมือตัดที่ไม่เหมาสมกับวัสดุชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปก็จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือนเนื้อวัสดุด้วยเครื่องมือตัดชนิดดังกล่าว

วัสดุที่นิยมใช้ทำเครื่องมือตัด ได้แก่ ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide) เซรามิก (Ceramic) เซอร์เมท (Cermet) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride; CBN) พอลิคริสตัลไลน์คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Polycrystalline Cubic Boron Nitride; PCBN) และพอลิคริสตัลไลน์ไดมอนด์ (Polycrystalline Diamond; PCD) [3] เป็นต้น นอกจากการใช้วัสดุที่มีความแข็งสูงมาผลิตเป็นเครื่องมือตัดแล้ว การเคลือบผิววัสดุทำเครื่องมือตัดด้วยฟิล์มแข็งบาง (Hard Thin Films) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านไตรบอโลยี (Tribology) ระหว่างผิวคู่สัมผัสของเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือนก็เป็นที่นิยมใช้ ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มแข็งบางมีอยู่สองกรรมวิธีหลัก คือ กรรมวิธีไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) และกรรมวิธีไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) ซึ่งทั้งสองกรรมวิธีต่างมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน [4] ทำให้ผู้ผลิตเครื่องมือตัดมีการพัฒนาวัสดุและใช้สารเคลือบผิวจำนวนมากออกมาขายตามท้องตลาดซึ่งอาจมีชื่อเรียกทางการค้าที่แตกต่างกัน มีราคาและสมบัติแตกต่างกัน และมีการแนะนำความเหมาะสมในการใช้กับวัสดุชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน ทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากสนใจศึกษาประสิทธิภาพในการเลือกใช้เครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุและเคลือบฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ ในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุแต่ละชนิด

Pattanatrigoon [5] เปรียบเทียบการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด SCM 420 ผลการศึกษาพบว่าเครื่องมือตัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธี Medium

Temperature-CVD หรือ MT-CVD มีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด ในขณะที่ Jareanchai [6] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิว (Surface Roughness) และการสึกหรอของเครื่องมือตัดในการกลึงเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด AISI 4140 ผลการศึกษาพบว่าสารหล่อเย็นไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานกลึงและการสึกหรอของเครื่องมือตัด ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา [7-9]

Gupta et al. [10] ศึกษาการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S45C ด้วยเครื่องมือตัดทำจากวัสดุเหล็กกล้าไฮสปีด (High Speed Steel; HSS) ที่เคลือบฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ ด้วยกรรมวิธี PVD โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดเฉือนเนื้อวัสดุกับเครื่องมือตัดที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มแข็งบาง ผลการศึกษาพบว่าเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบางมีประสิทธิภาพการตัดเฉือนเนื้อวัสดุดีกว่าโดยพิจารณาจากค่าแรงตัดเฉือน (Cutting Force) เนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงาน

Kumar et al. [11] ประเมินความสามารถในการตัดเฉือนเนื้อโลหะผสมนิกเกิ้ล-เหล็ก-โครเมียม (Nickel-Iron-Chromium) ที่มีชื่อทางการค้าว่า “INCOLOY® alloy 825” ด้วยกระบวนการกลึง โดยใช้เครื่องมือตัดทำจากวัสดุคาร์ไบด์เคลือบฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ ด้วยกรรมวิธี PVD ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มเคลือบบางแต่ละชนิดมีความสามารถในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันแม้จะผ่านกรรมวิธี PVD มาเหมือนกัน ทั้งในแง่ของปริมาณการสึกหรอของเครื่องมือตัดและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Saoubi et al. [12] ที่รายงานว่าเครื่องมือตัดแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการกลึงเหล็กกล้าผสม 16MnCr5 มีพฤติกรรมการสึกหรอที่แตกต่างกัน เครื่องมือตัดที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง TiN เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) เครื่องมือตัดที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง TiSiN ซึ่งมีลักษณะของเนื้อฟิล์มแข็งเปราะ เกิดการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) บนผิวของเครื่องมือตัดและพบเศษแตกของเนื้อฟิล์มขนาดเล็ก (Microchipping) จำนวนมาก ในขณะที่เครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งชนิด TiAlN และ AlCrN มีการเกาะยึดติด (Adhesion) ของอนุภาควัสดุชิ้นงานกลึงน้อยมาก ซึ่งกลไกการสึกหรอของฟิล์มแข็งทั้ง 3 ชนิด เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิ สมบัติทางกล และความเสียดทานที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดสัมผัสที่เกิดการการแตกของชั้นฟิล์มแข็ง

Shalaby [13] ศึกษากลไกการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือตัดชนิดต่าง ๆ ในการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าผสมคาร์บอน-โครเมี่ยม ผลการศึกษาได้อธิบายถึงกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด จากการทดลองเครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุ PCBN มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ในขณะที่ผลการศึกษาของ Nabhani [14] แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุ PCD ให้ผลความหยาบผิวสุดท้ายของชิ้นงานกลึงดีกว่าเครื่องมือตัดที่ทำจากวัสดุ CBN ในการกลึงวัสดุไทเทเนียมผสม

จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้นพบว่าชนิดของเครื่องมือตัดมีผลต่อคุณภาพและอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด วัสดุชิ้นงานแต่ละชนิดต้องการชนิดเครื่องมือตัดและตัวแปรในกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน แต่ยังไม่มีการเชื่อมโยงผลการศึกษากับสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงาน โดยเฉพาะวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินซึ่งเป็นงานบริการวิชาการของศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ในการผลิตชิ้นส่วนให้กับภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความต้องการศึกษาสมบัติทางไตรบอโลยีของเครื่องมือตัดที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ ที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดแนะนำให้ใช้ เพื่อนำผลที่ได้เป็นข้อมูลประกอบการเลือกชนิดเครื่องมือตัดแล้วทำการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุดังกล่าวด้วยกระบวนการกลึง เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) และภาคอุตสาหกรรมที่สนใจ เพื่อลดการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ทำให้ประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิต

2. วัสดุ ตัวแปร และวิธีการศึกษา

2.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุชิ้นงาน

วัสดุชิ้นงานที่ศึกษาเป็นเหล็กกล้าผสมเพื่อใช้ผลิตชิ้นส่วนสำหรับรถตักดิน ตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่อง

ทดสอบความแข็งยี่ห้อ Gallileo รุ่น ERGOTEST DIGI 25 R โดยใช้การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) สเกล C ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเท่ากับ 10.8 HRC

องค์ประกอบธาตุ (Elemental Composition) ของวัสดุชิ้นงานใช้เทคนิควิธี Optical Emission Spectrometry (OES) ในการระบุธาตุที่มีอยู่ในวัสดุชิ้นงาน โดยการตรวจสอบใช้เครื่อง SPECTROLAB รุ่น LAV M12 ที่สภาพแวดล้อมขณะทดสอบด้วยอุณหภูมิ 23.5 ˚C ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 47 % ผลการทดสอบที่ได้คิดเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของวัสดุชิ้นงาน (หน่วย: %wt)

C	Si	Mn	P	S	Cr
1.0873	1.0491	>2.3000	0.0652	0.0215	0.1916
Mo	**Ni**	**Al**	**Cu**	**Nb**	**Ti**
0.0630	0.0295	0.0068	0.0524	0.0057	0.0032
V	**B**	**Fe**			
0.0172	0.018	Bal.			

จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของวัสดุชิ้นงานพบว่า วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถตักดินที่ศึกษาครั้งนี้เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุแมงกานีสผสมอยู่ในปริมาณสูง (> 1%) [15] โดยทั่วไปธาตุแมงกานีสจะช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้า ทำให้มีความสามารถในการทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และทนการเสียดสี (Abrasion) ได้ดี

2.2 ชนิดและสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดที่ศึกษาครั้งนี้ทำจากวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ซึ่งเป็นโลหะผสมทังสเตน (WC) และโคบอลต์ (Co) เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 และ TiCN ด้วยกระบวนการ CVD และ PVD ความหนาฟิล์มแข็งบางได้จากการวัดภาคตัดขวางของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนเครื่องมือตัดด้วย HITASHI TM-1000 Scanning Electron Microscope (SEM) ค่าความแข็งใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติทางกลในระดับนาโน (Nano-mechanical Testing) ของ HYSITRON รุ่น Ti Premier โดยใช้หัวกดแบบ Berkovich ด้วยแรงกด 0-1000 μN การทดสอบดำเนินการ 5 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผลการทดสอบซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 2

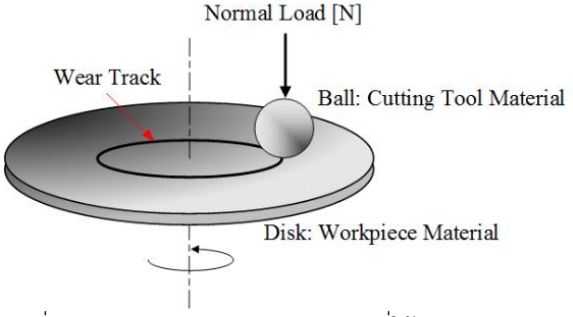
ตารางที่ 2 วัสดุและฟิล์มเคลือบของเครื่องมือตัดที่ศึกษา

วัสดุ	ชนิดฟิล์ม (กระบวนการ)	ความหนาฟิล์ม (μm)	ความแข็ง (GPa)
WC-Co	TiCN+Al_2O_3 (CVD)	15.80 ± 0.84	18.54 ± 1.11
	TiCN (CVD)	10.12 ± 0.52	15.10 ± 1.42
	TiCN (PVD)	4.29 ± 0.49	16.48 ± 1.36

2.3 การทดสอบหาสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส

สมบัติทางไตรบอโลยีในการศึกษานี้ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงาน การศึกษาใช้การจำลองการทดสอบ (Simulation Testing) ด้วยวิธีทดสอบ Pin-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a [16] ซึ่งเป็นวิธีทดสอบวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมใช้เพื่อหาสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสเนื่องจากเตรียมชิ้นทดสอบง่าย โดยการเตรียมเป็นแท่งหมุด (Pin) ที่มีปลายเป็นรัศมีหรือเป็นลักษณะลูกบอล (Ball) แล้วจับยึดด้วยด้ามจับ เพื่อทดสอบกับแผ่นจาน (Disk) รูปร่างกลมหรือสี่เหลี่ยม [17]

ในการศึกษานี้ใช้ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 mm ทำจากวัสดุเครื่องมือตัดและทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบางตามเงื่อนไขเดียวกันกับข้อมูลในตารางที่ 2 สำหรับแผ่นจานถูกเตรียมจากวัสดุชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 30 mm มีความหนา 10 mm โดยควบคุมความหยาบผิวของหน้าแผ่นจานให้อยู่ในช่วงเดียวกับชิ้นทดสอบสำหรับทดลองการกลึง หลักการทดสอบสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสระหว่างวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานโดยวิธีจำลองการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ Pin-on-Disk แสดงดังรูปที่ 1



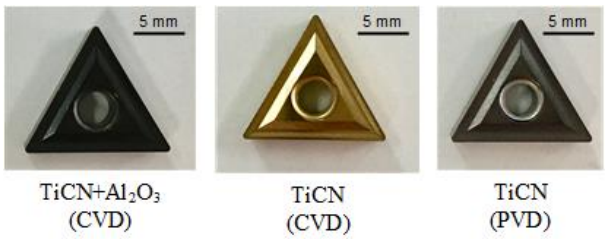
รูปที่ 1 หลักการทดสอบ Pin-on-Disk ที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส

เครื่องไตรบอมิเตอร์ Anton Paar แบบการเคลื่อนที่หมุน (Rotating Movement) ต่อพ่วงกับชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ InstrumX เวอร์ชั่น 7.0.10 ถูกใช้ในการศึกษาสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงาน ความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุนของแผ่นจานกำหนดให้เท่ากับ 150 mm/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องไตรบอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้สามารถดำเนินการได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อตัวเครื่อง สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส ผู้ศึกษากำหนดระยะทางการทดสอบเท่ากับ 50 m โดยมีแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Normal Load) ระหว่างผิวคู่สัมผัสที่ให้โดยตุ้มน้ำหนักขนาด 5 N การทดสอบใช้สารหล่อเย็น BIOCOOL 100 ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับการใช้ทดสอบตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานในการทดลองงานกลึง ในอัตราส่วนการเจือจางกับน้ำ 1:10

2.4 ตัวแปร และวิธีการศึกษาในการทดลองงานกลึง

ชิ้นทดสอบถูกเตรียมให้มีขนาดความยาวเท่ากับ 200 mm กลึงปอกผิวดิบและเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm โดยควบคุมความหยาบผิว Ra ของชิ้นทดสอบให้อยู่ในช่วง 3.2 ± 0.5 µm การเตรียมชิ้นทดสอบและการทดสอบทำโดยเครื่องกลึง ซีเอ็นซี OKUMA รุ่น HL-20

เครื่องมือตัดที่ใช้ศึกษามีลักษณะเป็นอินเสิร์ช (Insert) หรือที่ภาคอุตสาหกรรมเรียกในชื่อ “เม็ดมีด” แบบมุมลบรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า มีค่ารัศมีมุมของปลายเครื่องมือตัดเท่ากับ 0.4 mm จับยึดด้วยด้ามจับที่มีมุมเข้าตัดงานเท่ากับ 93° และมุมหลบเครื่องมือตัด + 6° ลักษณะของเครื่องมือตัดแสดงดังรูปที่ 2



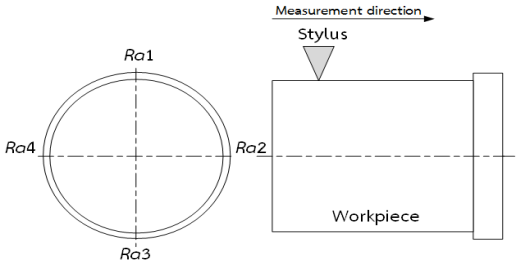
รูปที่ 2 ลักษณะเครื่องมือตัดที่ศึกษา

ตารางที่ 3 ตัวแปรของกระบวนการกลึงที่ศึกษา

ตัวแปร [หน่วย]	ค่า	
	ระดับต่ำ	ระดับสูง
อัตราการป้อนตัด F (mm/rev)	0.10	0.20
ความลึกการตัด DC (mm)	0.50	1.50

เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในเรื่องของเวลาการผลิต ผู้วิจัยกำหนดความเร็วตัด (Cutting Speed) คงที่ โดยเลือกใช้ค่าเร็วที่สุดตามค่าแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เท่ากับ 175 m/min ปัจจัยหรือตัวแปรของกระบวนการกลึงที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการป้อนตัด (Feed Rate; F) และความลึกการตัด (Depth of Cut; DC) ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 3

ชิ้นทดสอบถูกกลึงด้วยเครื่องมือตัดแต่ละชนิดตามเงื่อนไขตัวแปรที่ศึกษาดังค่าในตารางที่ 3 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการกลึงจะถูกตรวจสอบค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องมือวัดค่าความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus) ยี่ห้อ TESA รุ่น Rugosurf 10 โดยบันทึกค่าความหยาบผิวแบบ Ra ตำแหน่งการวัดชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการกลึงตามเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3 ค่าที่ได้จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผลการตรวจสอบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ

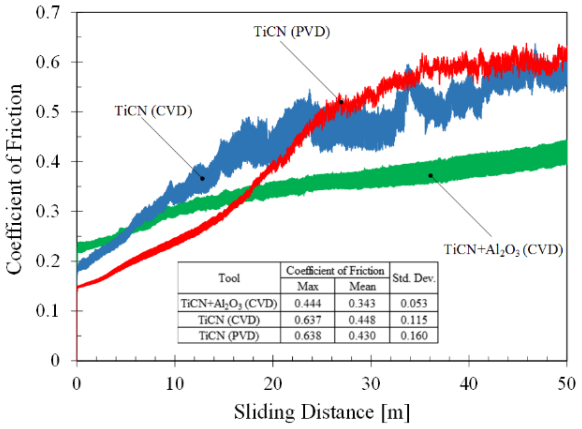
การประเมินความสามารถในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานของเครื่องมือตัด ใช้การตรวจสอบลักษณะรอยสึกหรอของเครื่องมือตัดที่ผ่านการทดสอบการกลึงชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Mitutoyo รุ่น MF-B1010D ที่ต่อพ่วงชุด Vision Unit และ คอมพิวเตอร์ ใช้ซอฟต์แวร์ QSPAK Vision Unit บันทึกภาพเครื่องมือตัดบริเวณคมตัดเพื่อตรวจสอบลักษณะความเสียหายของเครื่องมือตัด

3. ผลและการอภิปราย

3.1 สมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส

ผลการทดสอบสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ กับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินโดยการจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk ด้วยไตรบอมิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษาแสดงด้วยพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวคู่สัมผัสดังรูปที่ 4

จากการทดสอบพบว่าวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุด มีสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสที่ได้ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.343 ในขณะที่วัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN ด้วยกระบวนการ CVD และ PVD มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.448 และ 0.430 ตามลำดับ



Tool	Coefficient of Friction		Std. Dev.
	Max	Mean	
TiCN+Al_2O_3 (CVD)	0.444	0.343	0.053
TiCN (CVD)	0.637	0.448	0.115
TiCN (PVD)	0.638	0.430	0.160

รูปที่ 4 พฤติกรรมความเสียดทานของวัสดุเครื่องมือที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์บนวัสดุชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสจากลักษณะเส้นกราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเทียบกับระยะทางของวัสดุผิวคู่สัมผัสพบว่า ลักษณะเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบางชนิดต่าง ๆ จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ หลังจากนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องเมื่อระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น เป็นที่สังเกตว่าลักษณะเส้นกราฟของวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) มีลักษณะราบเรียบ (Smooth) และมีความชันของเส้นกราฟน้อยกว่าเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบางชนิด TiCN ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงสุด (Max) ของวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) มีค่าเท่ากับ 0.444 ในขณะที่วัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง ด้วยกระบวนการ CVD กับ PVD มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงสุดเท่ากับ 0.637 และ 0.638 ตามลำดับ

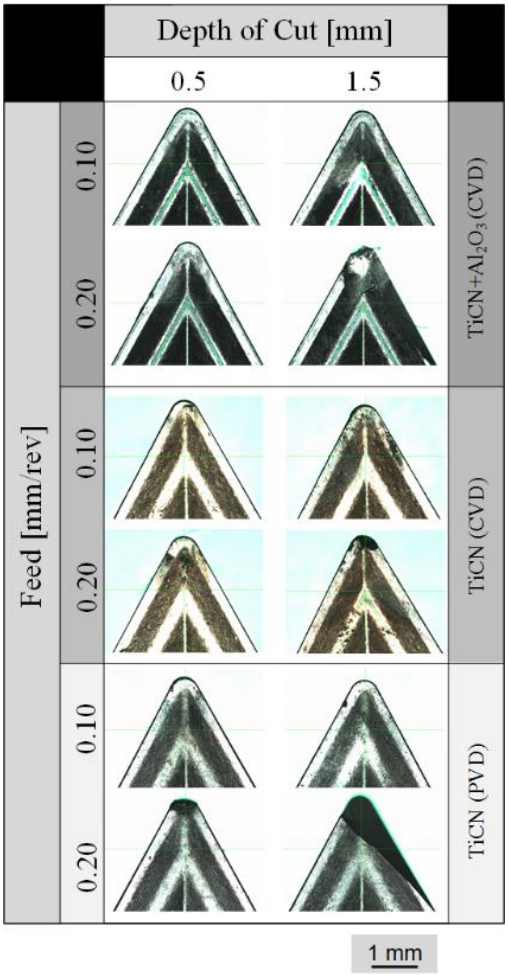
ลักษณะเส้นกราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN ด้วยกระบวนการ CVD กับ PVD จะมีลักษณะเส้นกราฟราบเรียบในช่วงแรก หลังจากนั้นเส้นกราฟจะมีลักษณะแกว่ง (Oscillation) ขึ้น-ลง ซึ่งจากงานวิจัยของ Gåård et al. [18] ได้อธิบายพฤติกรรมของเส้นกราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเทียบกับระยะทางในลักษณะนี้ว่าเป็นลักษณะของเส้นกราฟที่มีผลมาจากเนื้อฟิล์มแข็งบางที่เคลือบอยู่บนวัสดุเกิดความเสียหายซึ่งอาจเป็นไปในรูปแบบเนื้อฟิล์มลอกหลุด เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) หรือมีเศษวัสดุชิ้นงานเกาะยึดติดบนผิวฟิล์มแข็งบาง ดังนั้นวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) มีความเหมาะสมในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินได้ดีกว่าวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN ด้วยกระบวนการ CVD และ PVD

แม้ว่าวัสดุเครื่องมือตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่เคลือบฟิล์ม TiCN ด้วยกระบวนการ CVD กับ PVD จะมีสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีค่าใกล้เคียงกันนั้น แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมทางไตรบอโลยีจากลักษณะเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานร่วมด้วยแล้ว ทำให้สามารถระบุได้ว่าวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์ม TiCN ด้วยกระบวนการ PVD มีความเหมาะสมในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผิวคู่สัมผัสวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินได้ดีกว่าวัสดุเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN ด้วยกระบวนการ CVD

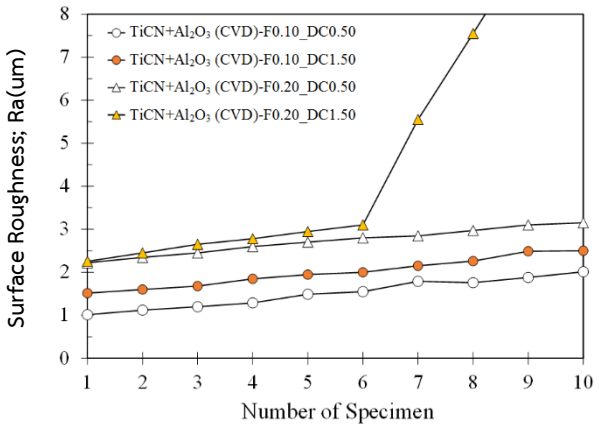
3.2 ผลการทดสอบด้วยกระบวนการกลึง

ลักษณะความเสียหายของคมตัดเครื่องมือตัดแต่ละชนิดที่ใช้ตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินด้วยกระบวนการกลึงตามสภาวะเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5

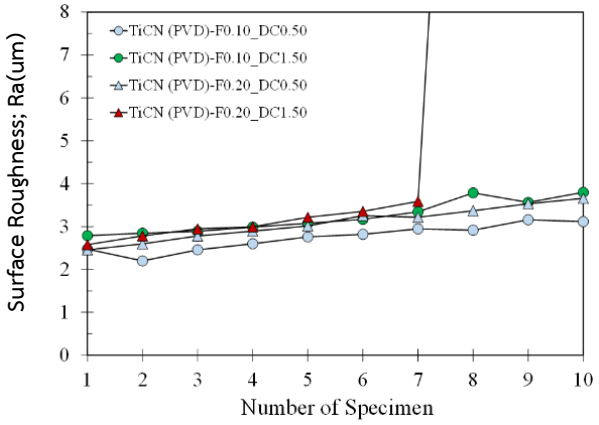
ความเสียหายของคมตัดเครื่องมือตัดมีลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิดของฟิล์มแข็งบางที่เคลือบผิววัสดุเครื่องมือตัดและเปลี่ยนไปตามระดับของปัจจัยหรือค่าของตัวแปรที่ใช้ จากรูปที่ 5 เครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN ด้วยกระบวนการ PVD เกิดเนื้อวัสดุเครื่องมือตัดแตกหักจนไม่สามารถทดสอบต่อได้ขณะทำการทดสอบกลึงชิ้นทดสอบที่ 8 ด้วยอัตราการป้อนและความลึกการตัดในระดับสูง คือ 0.20 mm/rev และ 1.50 mm ตามลำดับ ซึ่งคมตัดของเครื่องมือที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al2O3 (CVD) และ ฟิล์ม TiCN (CVD) ที่ใช้อัตราการป้อนและความลึกการตัดในระดับสูงก็พบความเสียหายที่รุนแรงกว่าการใช้อัตราการป้อนและความลึกการตัดในระดับต่ำเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเลือกใช้อัตราการป้อนตัดและความลึกการตัดในระดับสูงสำหรับการกลึงวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินในการศึกษาครั้งนี้จะส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา [3,5-14]



รูปที่ 5 ลักษณะความเสียหายของเครื่องมือตัดที่ตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานด้วยอัตราการป้อนตัดและความลึกการตัดต่าง ๆ

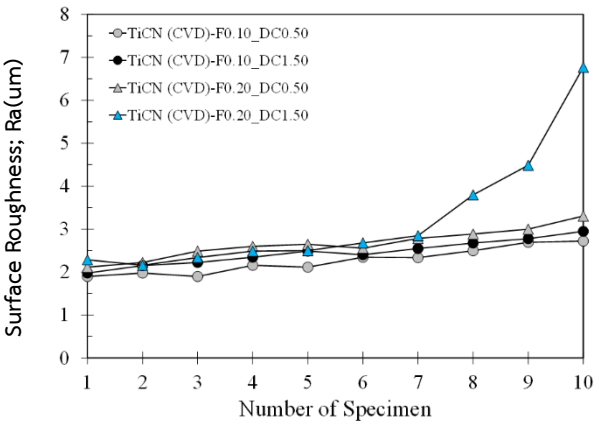


รูปที่ 6 ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึงด้วยเครื่องมือตัด TiCN+Al_2O_3 (CVD)

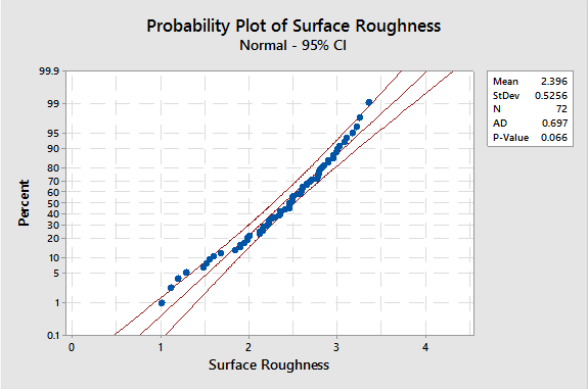


รูปที่ 8 ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึงด้วยเครื่องมือตัด TiCN (PVD)

ผลการตรวจสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่ถูกตัดเฉือนเนื้อวัสดุด้วยเครื่องมือตัดและตัวแปรขอกระบวนการกลึงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6 – 8 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านกลึงที่ได้มีค่าความหยาบผิว Ra อยู่ระหว่างค่า 1.014 – 3.797 µm ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นตามระยะทางการตัดเฉือนเนื้อวัสดุซึ่งพิจารณาได้จากจำนวนชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบการกลึง และจากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีชิ้นงานบางชิ้นมีค่าความหยาบผิวที่ได้จากการทดสอบการกลึงสูงกว่าความหยาบผิวชิ้นงานเริ่มต้นที่ได้จากการเตรียมชิ้นทดสอบกลึงปอกผิวดิบ ซึ่งทั้งหมดได้จากการตัดเฉือนเนื้อวัสดุด้วยกระบวนการกลึงภายใต้สภาวะเงื่อนไขอัตราการป้อนและความลึกการตัดเท่ากับ 0.02 mm/rev และ 1.50 mm



รูปที่ 7 ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึงด้วยเครื่องมือตัด TiCN (CVD)



รูปที่ 9 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

ตามลำดับ เมื่อใช้เครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) ในขณะที่พบค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึงสูงกว่าค่าความหยาบผิวชิ้นงานเริ่มต้นบนชิ้นทดสอบชิ้นที่ 8 สำหรับเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN (CVD) และ TiCN (PVD) ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบด้วยกระบวนการกลึงด้วยเครื่องมือวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบฟิล์มแข็งบาง ที่สภาวะเงื่อนไขอัตราการป้อนและความลึกการตัดเท่ากับ 0.10 mm/rev และ 0.50 mm ให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด

สำหรับการทดสอบการกลึงที่สภาวะเงื่อนไขการทดสอบอื่นพบคมตัดของเครื่องมือตัดมีความเสียหายในรูปแบบการสึกหรอแบบขัดถู ไม่พบเศษวัสดุชิ้นงานเกาะและเชื่อมเย็น (Cold Welding) ติดบนผิวของวัสดุเครื่องมือตัดทุกชนิดที่

ศึกษา สอดคล้องกับผลการจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk

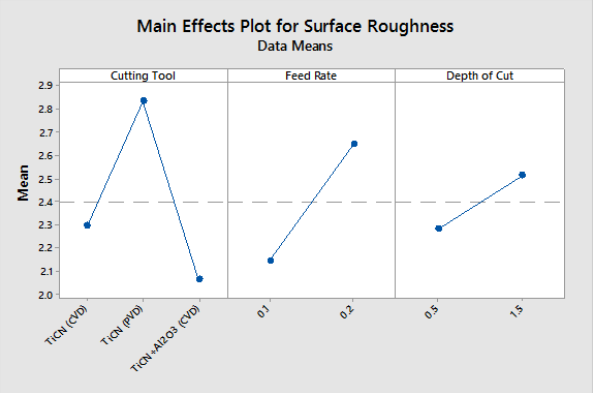
เพื่อให้มั่นใจว่าชนิดของเครื่องมือตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกการตัดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกลึง ผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติโดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ในการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าความหยาบผิวที่วัดได้จากชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึงของแต่ละเงื่อนไขการทดลองสำหรับชิ้นทดสอบที่ 1 ถึงชิ้นทดสอบที่ 6 เนื่องจากเป็นผลการวัดค่าความหยาบผิวของเครื่องมือตัดที่ยังไม่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง เพื่อให้มั่นใจว่าเลือกใช้เครื่องมือทดสอบทางสถิติที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ทดสอบการแจกแจงแบบปกติด้วยฟังก์ชัน Probability Plot ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความหยาบผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
CT	2	7.4230	3.71151	72.99	0.000
F	1	4.4805	4.48052	88.11	0.000
DC	1	0.9649	0.96489	18.98	0.000
CT * F	2	3.1645	1.58227	31.12	0.000
CT * DC	2	0.2032	0.10158	2.00	0.145
F * DC	1	0.3209	0.32093	6.31	0.015
CT * F * DC	2	0.0050	0.00252	0.05	0.952
Error	60	3.0510	0.05085		
Total	71	19.6131			
S = 0.225499 R-sq = 84.44% R-sq(adj) = 81.59%					

หมายเหตุ: CT = เครื่องมือตัด, F = อัตราการป้อนตัด, DC = ความลึกการตัด

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเรียงตัวกันในลักษณะเชิงเส้นตรงเอียง 45 องศา และ P-Value ที่ได้มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจ (α = 0.05) จึงสรุปได้ว่าชุดข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ทางสถิติมีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อนำชุดข้อมูลดังกล่าวไปทดสอบทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังผลการทดสอบในตารางที่ 4 พบว่า ชนิดของเครื่องมือตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกการตัด มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึง เนื่องจากมี P-Value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างชนิดเครื่องมือตัดกับอัตราการป้อนตัด และอัตราการป้อนตัดกับความลึกการตัด ก็มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลึง (P-Value < 0.05) เช่นกัน



รูปที่ 10 กราฟปัจจัยหลักที่แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่แต่ละระดับปัจจัย

จากการทดสอบด้วยกระบวนการกลึงและการจำลองการทดสอบด้วยไตรบอมิเตอร์เพื่อตรวจสอบสมบัติระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานพบว่า ผลการศึกษามีความสัมพันธ์กัน สมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานที่มีค่าความเสียดทานต่ำช่วยให้ชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่ากรณีสภาวะเงื่อนไขที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสสูง ทั้งนี้ประสิทธิภาพทางไตรบอโลยีของเครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบางยังขึ้นกับสภาวะเงื่อนไขของกระบวนการกลึง โดยการใช้อัตราการป้อนและความลึกการตัดที่มีค่าน้อยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางไตรบอโลยีของฟิล์มเคลือบบนวัสดุเครื่องมือตัดได้โดยให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผลิตได้ต่ำ ดังพิจารณาได้จากกราฟปัจจัยหลัก (Main Effects) ที่แสดงค่าเฉลี่ยของผลค่าความหยาบผิวที่แต่ละระดับปัจจัยซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติดังรูปที่ 10 ดังนั้นการเลือกชนิดของฟิล์มเคลือบและการใช้สภาวะเงื่อนไขในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกลึง

4. สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางไตรบอโลยีของเครื่องมือตัดและสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การจำลองการทดสอบด้วยไตรบอมิเตอร์ช่วยให้ข้อมูลในการเลือกใช้เครื่องมือตัดที่เหมาะสมในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงานได้

2) สมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงานส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุและคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ได้

3) เครื่องมือตัดที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD) มีสมบัติทางไตรบอโลยีดีที่สุดเมื่อเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับวัสดุชิ้นงานที่ศึกษารองลงมาคือเครื่องมือตัดเคลือบฟิล์มแข็งบาง TiCN (PVD) และ TiCN (CVD) ตามลำดับ

4) สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเหล็กกล้าผสมสำหรับผลิตชิ้นส่วนรถตักดินด้วยกระบวนการกลึงเมื่อกำหนดความเร็วตัดเท่ากับ 175 m/min ได้แก่ การใช้อัตราการป้อนและความลึกการตัดเท่ากับ 0.10 mm/rev และ 0.50 mm ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพทางไตรบอโลยีดีที่สุดเมื่อใช้เครื่องมือตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยฟิล์มแข็งบาง TiCN+Al_2O_3 (CVD)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากงบประมาณแผ่นดิน ปี 2560 รหัสโครงการ 60105013

ขอขอบคุณ บริษัท เทค เอ็นซี จำกัด และบริษัท เทคโน คิไค จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องมือตัดและวัสดุเครื่องมือตัดในการจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Lange K. Handbook of Metal Forming. New York: McGraw-Hill;1985.

[2] Lin Y, He S, Lai D, Wei J, Ji O, Huang J. Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting. Wear. 2020;454-455:1-11.

[3] Smith GT. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook. London: Springer;2008.

[4] Stachowiak GW, Batchelor AW. Engineering Tribology 3rd ed. Massachusetts: Elsevier Butterworth-Heinemann;2005.

[5] Pattanatrigoon C. A comparative study the flank wear of WC coated multilayer TiCN-Al_2O_3-TiN inserts on the mild carbon steel (SCM420) turning process. M.Eng. thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2006. Thai.

[6] Jareanchai P. A study of factors affecting the surface smoothness and tool lathe wear in steel turning. M.S.Tech.ED thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2006.Thai.

[7] Khunnuy B. A study of factors affecting surface roughness for S 45 C steel turning with ceramic cutting tool coated PVD. M.S.Tech.ED thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2007.Thai.

[8] Petkong K. A study of influence factors affecting to surface roughness in stainless steel turning. M.S.Tech.ED thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2007.Thai.

[9] Taweeugsornpun Y. A study of influence factors of process parameter turning to high chromium white cast iron Cr 2828. M.S.Tech.ED thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2007.Thai.

[10] Gupta KM, Ramdev K, Dharmateja S, Sivarajan S. Cutting characteristics of PVD coated cutting tools. Materials Today: Proceedings. 2018;5: 11260–11267.

[11] Kumar S, Ramanujam R, Vignesa M, Tamiloli N,Sharma N, Srivastava S, Patela A. Comparative evaluation of performances of TiAlN, AlCrN, TiAlN/AlCrN coated carbide cutting tools and uncoated carbide cutting tools on turning Inconel 825 alloy using Grey Relational Analysis. Sensors and Actuators A: Physical. 2018;279:331–342.

[12] Saoubi RM, Johansson MP, Andersson JM. Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools. Wear. 2013;302:1219–1229.

[13] Shalaby MA, ElHakim MA, Abdelhameed MM, Krzanowski JE, Veldhuis SC, Dosbaeva GK. Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel. Tribology International. 2014;70:148–154.

[14] Nabhai F. Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools material. Journal of Material Processing Technology. 2001;115:402-412.

[15] Hosfor WF. Iron and Steel. New York: Cambridge University Press;2012.

[16] ASTM International. G99 – 95a:2000. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Pennsylvania; 2000.

[17] Sresomroeng B. A study on reduction adhesion in forming of high strength steel sheet. D.Eng Thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2009.Thai.

[18] Gåård A, Krakhmalev P, Bergström J, Hallbäck N. Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets. Tribology Letters. 2007;26(1): 67 –72.