

การศึกษาอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนในการกัดวัสดุสแตนเลสแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

The Study of Workpiece Temperature During Machining in Dry Milling Stainless Steel

ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ^{1*} และชาญณรงค์ สายแก้ว¹

Paramet Baowan^{1*} and Charnnarong Saikaew¹

Received: August 3, 2018; Revised: September 17, 2018; Accepted: September 19, 2018

บทคัดย่อ

การกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการตัดโลหะที่สำคัญที่ต้องพยายามคิดค้นหาวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารหล่อเย็นเพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุสแตนเลสถูกขึ้นชื่อว่าตัดเฉือนได้ยากเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ความแข็งแรงสูง และการนำความร้อนต่ำเมื่อตัดเฉือนจะทำให้อุณหภูมิบริเวณการตัดเฉือนสูงเกิดการพอกติดของเศษบริเวณคมตัด วิธีแก้ไขส่วนใหญ่ใช้สารหล่อเย็นในการระบายความร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนกับรูปร่างดอกกัดและวัสดุเคลือบให้การตัดเฉือนวัสดุมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากผลวิจัยพบว่าดอกกัดมุมเฉลี่ย 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ TiAlN สามารถป้องกันการสึกหรอของคมตัดดอกกัดได้ดีที่สุดและอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนที่สูงขึ้นนอกจากมาจากปริมาณแหล่งความร้อนบริเวณคมตัดที่เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของมุมเฉลี่ยแล้ว การสึกหรอแบบแตกบิ่นก็มีส่วนทำให้อุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

คำสำคัญ : มุมเฉลี่ย; การสึกหรอแบบแตกบิ่น; งานเคลือบผิว

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

* Corresponding Author E - mail Address: paramet.ba@rmuti.ac.th

Abstract

Milling is one of the most important machining processes that can be developed for more effective cutting performance to avoid use of coolants and maintain environmental friendliness. Stainless steel is widely known as a hard-to-cut material due to its high ductility, strength and low thermal conductivity. The cutting temperature is high which causes a built-up edge on the cutting tool. A commonly used solution to this problem is to apply the coolant which has a harmful effect on workers' health. Therefore, this research aimed to study the relationship between cutting temperature of workpiece and shapes of end mill as well as coating material for higher efficiency and environmental friendliness. The results showed that the end mill with a 60-degree helix angle coated with TiAlN was the best one that could prevent the wear of the end mill's cutting edge and the increase in cutting temperature since the higher cutting temperature did not only stem from the wider cutting edge, but also the chipping wear.

Keywords: Helix Angle; Chipping; Hard Coating

บทนำ

การตัดเฉือนที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมดังที่เรียกว่า กรีนแมชชีนนิ่ง (Green Machining) ได้กลายเป็นทางเลือกใหม่ที่เข้ามาช่วยตอบโจทย์ปัญหาการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในสารหล่อเย็นมีสารเคมีบางตัวที่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะที่ควรหันมาให้ความสนใจมากขึ้น ในกระบวนการกัดด้วยวัสดุสเตนเลสถูกขึ้นชื่อว่าตัดเฉือนได้ยากก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะที่ต้องพยายามคิดค้นหาวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าสเตนเลสเป็นวัสดุที่มีความแข็งเหนียวสูง และการนำความร้อนต่ำ [1] โดยพื้นฐานวัสดุที่มีการระบายความร้อนต่ำเมื่อตัดเฉือนจะทำให้อุณหภูมิบริเวณการตัดเฉือนสูง [2] และเกิดการพอกติดบริเวณคมตัด (Built Up Edge, BUE) เป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานดอกกัดสั้นและคุณภาพชิ้นงานต่ำ วิธีการแก้ไขปัญหแบบนี้จะใช้สารหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิการตัดเฉือนแต่ก็จะมีผลกระทบหลายอย่างตามมา ทั้งการเกิดการแตกร้าวในเม็ดเกรนที่ปลายคมตัดและที่สำคัญจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน [3]

ดังนั้นการกัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Machining) ได้กลายเป็นทางเลือกใหม่ที่เข้ามาช่วยตอบโจทย์ความท้าทายเหล่านี้อย่างเลี่ยงไม่ได้ แนวทางหลักในเรื่องของการกัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นคือการพัฒนาสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัดโดยให้มีความทนต่อความร้อนหรือทำให้เกิดความร้อนต่ำที่สุดในขณะทำงาน ซึ่งจะปลดปล่อยพลังงานในการใช้แรงตัดเฉือนและแรงเสียดทาน ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยหลายคนคิดหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกัดด้วยวัสดุสเตนเลสแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น เช่น Emel Kuran, et al. [4] ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการหล่อเย็นและค่าตัวแปรในการตัดเฉือนวัสดุด้วยวิธีการออกแบบการทดลองพบว่า ค่าความหนาผิวและอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้นเมื่อตัดเฉือนด้วยค่าที่เหมาะสมและสามารถพยากรณ์ได้ค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ Deng Jianxin, et al. [5] ได้ศึกษาทั่วโลก

การสึกหรอของเครื่องมือตัดคาร์ไบด์ในการตัดเฉือนสแตนเลสพบว่า การสึกหรอบริเวณหลังคมตัด (Flank Wear) และอุณหภูมิการตัดเฉือนสูงขึ้นตามความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น Munoz-Escalona, P. et al. [3] ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดเฉือนที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและปริมาณการใช้พลังงาน การตัดเฉือนพบว่า การตัดเฉือนด้วยวิธีการไม่ใช้สารหล่อเย็นเป็นสภาวะการตัดเฉือนที่ดีที่สุดในด้านของการใช้พลังงานและค่าความหยาบผิวจะแปรผันไปตามการเลือกใช้ค่าตัวแปรการตัดเฉือนที่เลือก

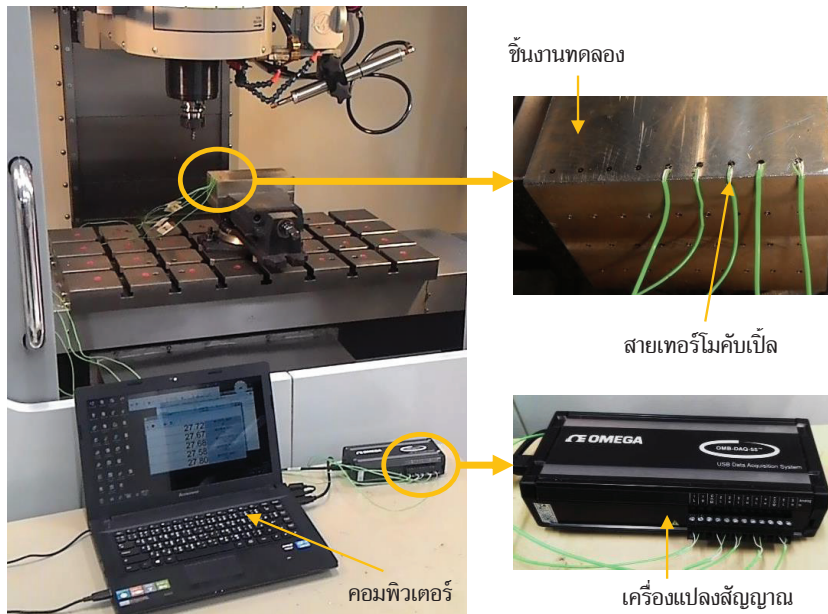
นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเครื่องมือตัดที่มีความทนต่อการสึกหรอและความร้อนด้วยการใช้สารเคลือบ เช่น Endrino, J. L. et al. [6] เปรียบเทียบดอกกัดเคลือบด้วย AlTiN กับ AlCrN รายงานว่า ดอกกัดเคลือบด้วย AlTiN มีอายุการใช้งานมากกว่า AlCrN ถึงสองเท่า Li Chen, et al. [7] ทำการปรับปรุงสมบัติสารเคลือบ TiAlN ด้วยการเคลือบ TiN เป็นชั้นที่สอง พบว่า TiAlN/TiN ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้กับเครื่องมือตัดมากกว่า TiAlN Dirk Biermann, et al. [8] ศึกษาสารเคลือบ CrN, TiN, AlCrN, AlTiN and TiAlN รายงานว่าการเคลือบด้วย TiAlN และ AlCrN มีส่วนช่วยป้องกันการสึกหรอได้โดยรวมไปถึงคุณภาพของผิวชิ้นงานและสารเคลือบที่ดีที่สุดคือ AlTiN จะเห็นว่าการวิจัยเหล่านี้มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาไปที่การหาสภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมและการหาสารเคลือบที่สามารถช่วยป้องกันการสึกหรอของเครื่องมือตัด และอีกอย่างหนึ่งการวิเคราะห์การเกิดขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนก็มีความสำคัญเช่นกันเพื่อที่จะหาวิธีการป้องกันเพื่อให้เกิดการตัดเฉือนเกิดความร้อนต่ำที่สุด ตามทฤษฎีแหล่งพลังงานความร้อนที่อธิบายโดย Sen Lin, et al. [9] อธิบายไว้ว่า ในขณะที่มีภารกิจงาน เมื่อวิเคราะห์ที่จุดที่มีการเสียดสีกันระหว่างดอกกัดกับชิ้นงาน แหล่งพลังงานความร้อนที่เกิดอุณหภูมิของชิ้นงานมี 2 แหล่ง คือ บริเวณหน้าคมตัด (Shear Plane) และบริเวณด้านหลังคมตัด (Flank Wear - Land) ซึ่งพื้นที่ทั้งสองเป็นพื้นที่ที่เกิดจากการเสียดสีของวัสดุชิ้นงานในขณะที่เกิดการตัดเฉือนและยังสามารถคำนวณหาปริมาณพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานได้จากความสัมพันธ์กันของมุมเลี้ยวดอกกัดที่อธิบายในบทความของ Baowan, P. et al. [10] เมื่อระยะความยาวคมตัดด้านข้างของดอกกัดที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของมุมเลี้ยวดอกกัดและสามารถคำนวณหาความยาวนี้ได้ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติ เมื่อมุมเลี้ยวมีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ปริมาณพื้นที่ของแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นตาม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนกับมุมเลี้ยวดอกกัดและวัสดุเคลือบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนวัสดุสแตนเลสแบบแห้ง

วิธีดำเนินการ

1. การติดตั้งชุดการทดลอง

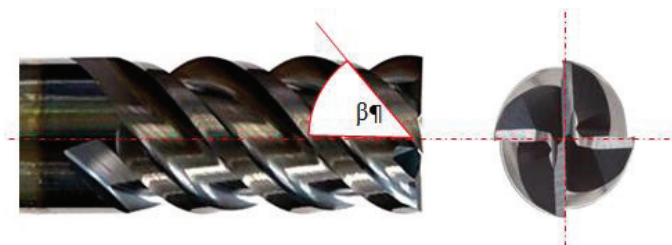
การออกแบบการทดลองในครั้งนี้มุ่งเน้นการกัดแบบด้านข้างแบบต่อเนื่องในระยะการตัดความยาว 50 เมตร ดังนั้นการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 1 ชิ้นงานจะถูกเจาะรูเพื่อฝังสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เข้าไปเพื่อวัดอุณหภูมิชิ้นงานจำนวน 5 จุด เมื่อดอกกัดตัดเฉือนชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิลจะเกิดความร้อนในชิ้นงานในขณะตัดเฉือนสัญญาณความร้อนจะถูกส่งเข้าไปที่ชุดแปลงสัญญาณ (Data Logger) แล้วแปลงเป็นตัวเลขอุณหภูมิของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในขณะนั้นแล้วแสดงผลส่งออกมาที่หน้าจอคอมพิวเตอร์และบันทึกผล เพื่อติดตามตรวจสอบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชิ้นงานในขณะตัดเฉือน



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดการทดลองเก็บข้อมูล

2. สภาพการตัดเฉือน

วัสดุชิ้นงานทดลองใช้วัสดุสแตนเลสเกรด 304L มีสมบัติการนำความร้อนที่ $16.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [11] เครื่องมือตัดใช้เป็นดอกกัดคาร์ไบด์ที่มีมุมเลื่อยแตกต่างกันดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดในตารางที่ 1 และเคลือบด้วยวัสดุที่ต่างกันคือ Titanium Aluminium Nitride (TiAlN) และ Diamond Like Carbon (DLC) ที่มีสมบัติดังตารางที่ 2 รูปแบบการตัดเฉือนชิ้นงานแบบตัดด้านข้างคมตัด (Side Milling) บนเครื่องกัดอัตโนมัติแกนตั้งยี่ห้อ Haas VM02 ด้วยค่าตัวแปรการตัดเฉือนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัด ดังตารางที่ 3 จากนั้นวัดค่าความหยาบผิว (R_a) ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว Mitutoyo SJ210 Stylus ISO 1997 ในแนวขนานกับทิศทางการตัดเฉือนแนวแกน ตรวจสอบการสึกหรอของคมตัดดอกกัดด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ในการทดลองครั้งนี้จะทำการออกแบบการทดลองแบบ 22 แฟคตอเรียล และมีจำนวน 3 ซ้ำรวมเป็น 12 ชุดการทดลองเพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ



รูปที่ 2 รูปร่างมุมเลื่อย (β) ของดอกกัด

ตารางที่ 1 ลักษณะและค่ารูปร่างดอกกัด

รายละเอียด	ค่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม)	10
ความยาวคมตัด (มม)	25
มุมเลี้ยว ($^{\circ}$)	30, 60
มุมหลบแนวแกน ($^{\circ}$)	4
มุมหลบแนวรัศมี ($^{\circ}$)	6
จำนวนฟัน (ฟัน)	4

ตารางที่ 2 สมบัติของสารเคลือบผิว

รายการ	TiAlN	DLC
ความหนาฟิล์ม (ไมโครเมตร)	2.87	1.12
ความแข็ง (Hv)	2300	3000
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.45	0.1

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรการตัดเฉือน

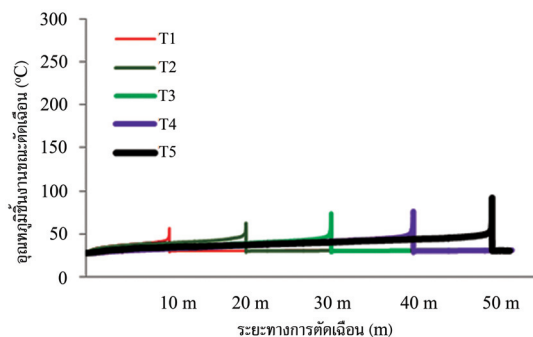
ตัวแปร	ค่า
ความเร็วตัด: V_c (ม/นาที)	120
อัตราป้อน: F (มม/ฟัน)	0.05
ความลึกกัดแนวแกน: a_p (มม)	20.0
ระยะป้อนตัดแนวรัศมี: a_e (มม)	0.2

ผลการทดลอง

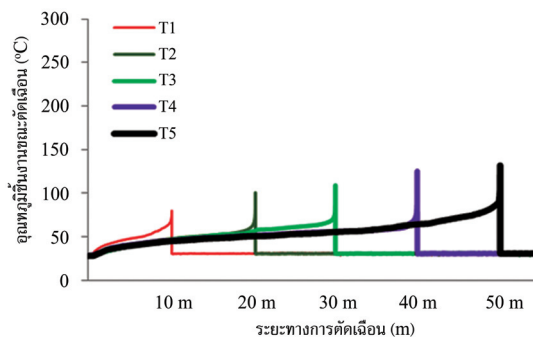
1. อุณหภูมิของชิ้นงาน

การกัดอย่างต่อเนื่องถือว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญในการนำไปวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการกัดแบบด้านข้างให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ในส่วนนี้เป็นการอธิบายอิทธิพลที่เกิดขึ้นระหว่างขนาดของมุมเลี้ยวดอกกัดและชนิดของสารเคลือบที่มีผลต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนจากรูปที่ 3 (ก) - (ง) จะเห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะทางการตัดเฉือนที่มากขึ้น ในแต่ละจุดที่มีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนที่ระยะ 10 - 50 เมตร T1 - T5 ในแต่ละจุดการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานจะเริ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ตัดเฉือนเข้ามาใกล้จุดที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิ้ลไว้ในแต่ละช่วงระยะการวัดจนมาสัมผัสกับจุดที่ฝังไว้ก็จะได้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนที่ระยะการตัดเฉือนนั้น ๆ หลังจากผ่านจุดที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิ้ลไปแล้วสัญญาณอุณหภูมิของจุดนั้นก็ก็จะดิ่งลงมาสู่อุณหภูมิปกติ จากรูปที่ 3 (ก) - (ข) กราฟดอกกัดมุมเลี้ยวขนาด 30° และ 60° ที่เคลือบ

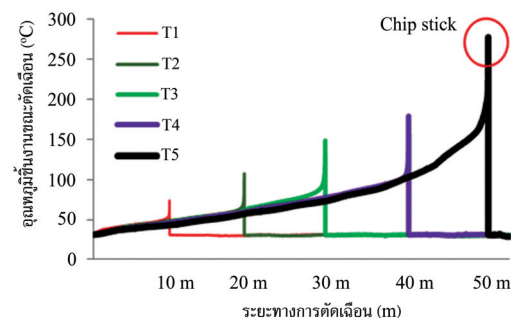
ด้วย TiAlN มีค่าอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนแตกต่างกัน สืบเนื่องจากค่าอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนที่กัดด้วยดอกกัดมุมเลี้ยว 60° มีค่าสูงกว่าดอกกัดมุมเลี้ยว 30° ทุกระยะการตัดเฉือน ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีแหล่งพลังงานความร้อนที่มีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของมุมเลี้ยว ในทำนองเดียวกันดอกกัดมุมเลี้ยวขนาด 30° และ 60° ที่เคลือบด้วย TiAlN มีความเสถียรมากในการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงาน สืบเนื่องจากมีความแปรผันน้อยสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนให้ใกล้เคียงกันตลอดระยะการตัดเฉือน เนื่องจากสารเคลือบ TiAlN มีความโดดเด่นของความสามารถในการยึดเกาะที่ดี และมีความแข็งทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีที่อุณหภูมิสูง [12] - [13]



(ก) มุมเลี้ยว 30° เคลือบ TiAlN

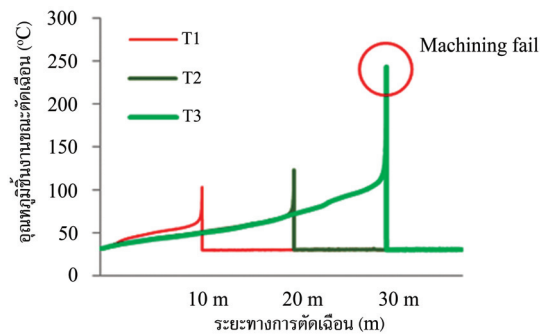


(ข) มุมเลี้ยว 60° เคลือบ TiAlN



(ค) มุมเลี้ยว 30° เคลือบ DLC

รูปที่ 3 อิทธิพลของมุมเลี้ยวและสารเคลือบต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือน

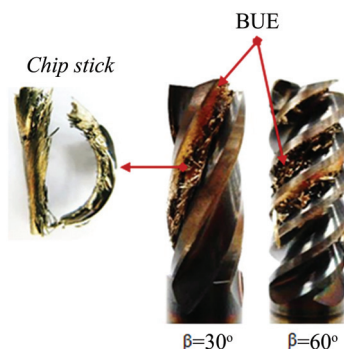


(ง) มุมเลื่อย 60° เคลือบ DLC

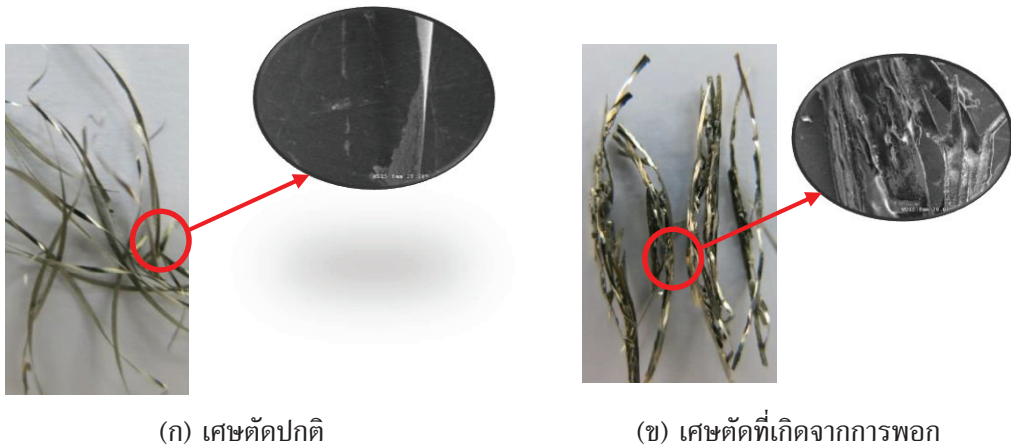
รูปที่ 3 อิทธิพลของมุมเลื่อยและสารเคลือบต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือน (ต่อ)

ในทางตรงกันข้ามดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 30° และ 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงกว่าดอกกัดเคลือบด้วย TiAlN อย่างชัดเจนประมาณ 3 เท่า ดังรูปที่ 3 (ค) - (ง) ดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 30° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงระยะทางการตัดเฉือน 50 เมตร มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงถึง 275 °C จนเกิดการหลอมของเศษตัดเข้าไปพอกติดที่คมตัด เช่นเดียวกับกับดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงถึง 250 °C อย่างรวดเร็วเพียงแค่ระยะทางการตัดเฉือนแค่ 30 เมตร เกิดการหลอมของเศษตัดเข้าไปพอกติดที่คมตัดอย่างรุนแรงจนทำให้ดอกกัดไม่สามารถตัดเฉือนต่อไปได้อีก เนื่องมาจากจุดด้อยของวัสดุเคลือบ DLC ที่มีการยึดเกาะที่ไม่ดี [14] ทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอคมตัดจากการตัดเฉือนได้นานจึงเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วนำไปสู่การสูงขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือน

จากรูปที่ 4 เป็นที่น่าประหลาดมากในการทดลองนี้เกิดการพอกติดของเศษที่คมตัดขึ้นกับดอกกัดที่เคลือบด้วย DLC เท่านั้น ทั้งที่มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้อธิบายว่า DLC มีสมบัติโดดเด่นอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำทำให้มีความลื่น [15] - [17] ซึ่งไม่น่าจะเป็นเหตุการณืนี้ได้ อาจเป็นเพราะงานวิจัยนี้เป็นการตัดเฉือนแบบต่อเนื่องเป็นเวลานานจนทำให้ชั้นเคลือบของ DLC ที่มีความบางจนทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอได้นาน



รูปที่ 4 การพอกติดคมตัดของเศษตัดบนคมตัดดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุเคลือบ DLC



รูปที่ 5 รูปร่างของเศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือน

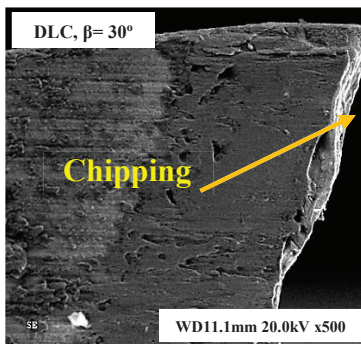
นอกจากนี้ก่อนเกิดการพอกอัดจนเครื่องมือตัดไม่สามารถตัดเฉือนได้จะมีสัญญาณเตือนก่อน โดยสามารถสังเกตได้จากลักษณะรูปร่างของเศษตัดดังรูปที่ 5 (ก) - (ข) เป็นความแตกต่างกันของเศษตัด รูปที่ 5 (ก) เป็นเศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือนปกติทั่วไปที่มีรูปร่างแบนยาวและมันวาวเป็นเกลียวแตกต่างจากรูปที่ 5 (ข) เป็นลักษณะเศษตัดที่เกิดจากการตัดเฉือนที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากคมตัดเกิดการพอกอัดของเศษ

2. การสึกหรอของคมตัดด้านข้าง

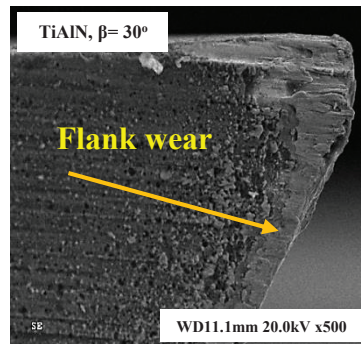
คมตัดด้านข้างของดอกกัดเป็นอีกปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของดอกกัดในการกัดแบบด้านข้างเนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้ตัดเฉือนวัสดุจึงกลายเป็นตัวชี้วัดอายุการใช้งานของดอกกัดจากรูปที่ 6 (ก) - (ง) เมื่อทำการทดลองกัดชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระยะการตัดเฉือนที่ 50 เมตร ดอกกัดที่มีมุมเลี้ยว 30° และ 60° ที่เคลือบด้วย TiAlN และ DLC พบว่าเกิดการสึกหรอที่ชัดเจน 2 ชนิด คือ การสึกหรอหลังคมตัด (Flank Wear) และการสึกหรอแบบแตกบิ่น (Chipping) การสึกหรอแบบหลังคมตัดเกิดบนดอกกัดที่เคลือบด้วยสาร TiAlN การสึกหรอนี้ถือว่าการสึกหรอที่ไม่มีความรุนแรงมากนัก สังเกตจากคมตัดที่มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยมากโดยเฉพาะดอกกัดมุมเลี้ยว 60° ดังรูปที่ 6 (ข), (ง) เนื่องจากดอกกัดที่มีมุมเลี้ยวสูงจะเกิดแรงในการตัดเฉือนต่ำ [18] - [19] รวมไปถึงสมบัติของสารเคลือบ TiAlN ที่มีความแข็งและยึดเกาะที่ดีทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการสึกหรอของดอกกัดดีขึ้น

ในขณะที่ดอกกัดที่เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC พบการสึกหรอแบบแตกบิ่นที่เกิดจากการที่ปลายคมตัด ไม่สามารถรับภาระแรงในการตัดเฉือนได้นานทำให้คมตัดเสียรูปร่างเห็นได้ชัดตามรูปที่ 6 (จ) - (ช) เนื่องจากข้อด้อยของวัสดุเคลือบ DLC ที่มีการยึดเกาะที่ไม่ดี ทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอของปลายคมตัดจากการตัดเฉือนได้นาน การสึกหรอแบบแตกบิ่นนี้ส่งผลกระทบต่อดอกกัดที่มีมุมเลี้ยวสูงอย่างมากเพราะที่มุมเลี้ยวสูงนั้นมีปริมาณพื้นที่แหล่งความร้อนมาก เมื่อดอกกัดเกิดการแพร่กระจายของรอยแตกบิ่นที่คมตัดทำให้การตัดเฉือนไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้เกิดความล้มเหลวของการตัดเฉือนดังดอกกัดมุมเลี้ยว 60° เคลือบด้วยสาร DLC ในการทดลองครั้งนี้

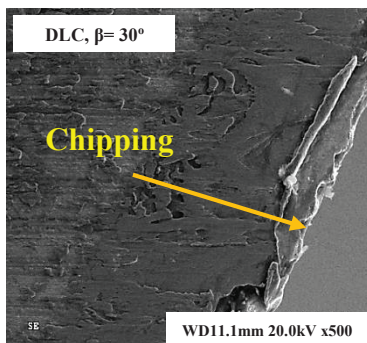
เมื่อวิเคราะห์เชื่อมโยงไปถึงอุณหภูมิของชิ้นงานนอกจากปริมาณของพื้นที่แหล่งความร้อนแล้ว การสึกหรอแบบแตกบิ่นก็มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งหมายรวมถึงอิทธิพลชนิดของสารเคลือบที่จะต้องมีความสามารถในการป้องกันการเกิดการสึกหรอแบบนี้



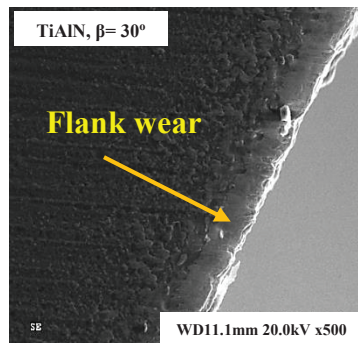
(ก) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย DLC



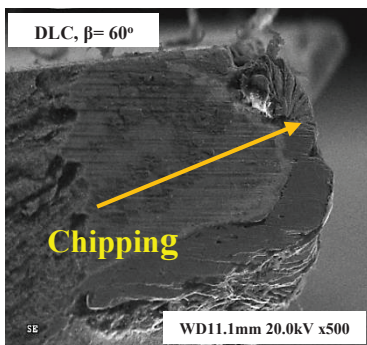
(ข) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย TiAlN



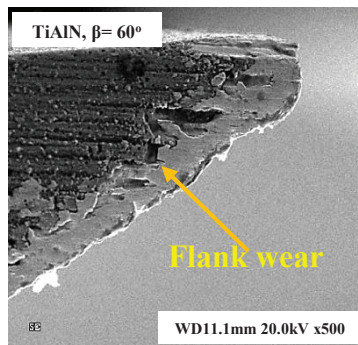
(ค) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย DLC



(ง) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย TiAlN

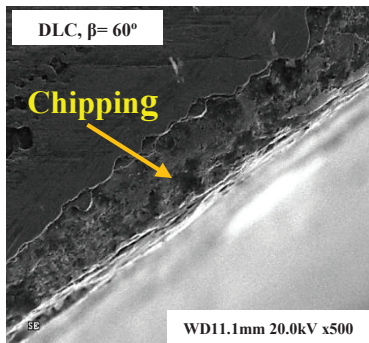


(จ) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย DLC

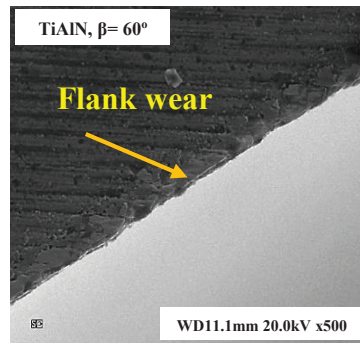


(ช) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย TiAlN

รูปที่ 6 การสึกหรอของคมตัดดอกกัดที่ตรวจสอบด้วย SEM



(ข) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย DLC



(ฅ) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย TiAlN

รูปที่ 6 การสึกหรอของคมตัดดอกกัดที่ตรวจสอบด้วย SEM (ต่อ)

สรุปผลการวิจัย

ดอกกัดมุมเลี้ยวสูงจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นตามเนื่องจากมีปริมาณของพื้นที่แหล่งความร้อนมากกว่าดอกกัดมุมเลี้ยวต่ำ ในขณะที่ความแตกต่างกันของวัสดุเคลือบก็มีผลทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนแตกต่างกันเช่นกัน ดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุ TiAlN จะมีอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนต่ำกว่าดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุ DLC เนื่องจากสารเคลือบ TiAlN สามารถป้องกันการสึกหรอของคมตัดดอกกัดได้ดีกว่าสารเคลือบ DLC การสึกหรอแบบแตกบิ่นซึ่งเป็นการสึกหรอที่มีความรุนแรงสูงทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นำไปสู่ความล้มเหลวของดอกกัดในการตัดเฉือนจะเกิดขึ้นกับดอกกัดที่เคลือบด้วยวัสดุ DLC กล่าวได้ว่านอกจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณพื้นที่แหล่งความร้อนตามขนาดของมุมเลี้ยวดอกกัดแล้ว ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานมาจากการแพร่กระจายของการสึกหรอแบบแตกบิ่นบนคมตัดดอกกัดในการกัดวัสดุสแตนเลสแบบด้านข้างคมตัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ รหัสทุน 561T212

References

- [1] Muammer, N. and Yakup, Y. (2011). Effect of Cryogenic Cooling in Milling Process of AISI 304 Stainless Steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 21, pp. 72-79. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60680-8

- [2] Cordes, S. E. (2012). Thermal Stability of γ -alumina PVD Coatings and Analysis of Their Performance in Machining of Austenitic Stainless Steels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. Vol. 5, pp. 20-25. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.11.003
- [3] Munoz-Escalona, P., Shokrani, A., and Newman, S. T. (2015). Influence of Cutting Environments on Surface Integrity and Power Consumption of Austenitic Stainless Steel. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. Vol. 36, pp. 60-69. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.013
- [4] Emel Kuram, Babur Ozcelik, Mahmut Bayramoglu, Erhan Demirbas, and Bilgin Tolga Simsek. (2013). Optimization of Cutting Fluids and Cutting Parameters During end Milling by using D-optimal Design of Experiments. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 42, pp. 159-166
- [5] Deng Jianxin, Zhou Jiantou, Zhang Hui, and Yan Pei. (2011). Wear Mechanisms of Cemented Carbide Tools in Dry Cutting of Precipitation Hardening Semi-Austenitic Stainless Steels. **Wear**. Vol. 270, Issue 7-8, pp. 520-527. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.006
- [6] Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., and Gey, C. (2005). Hard AlTiN, AlCrN PVD Coatings for Machining of Austenitic Stainless Steel. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 200, Issue 24, pp. 6840-6845. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.030
- [7] Li Chen, Yong Du, Xiang Xiong, Ke K. Chang, and Ming J. Wu. (2011). Improved Properties of Ti-Al-N Coating by Multilayer Structure. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 29, Issue 6, pp. 681-685. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2011.05.001
- [8] Dirk Biermann, Markus Steiner, and Eugen Krebs. (2013). Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. **Procedia CIRP**. Vol. 7, pp. 246-251. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.042
- [9] Sen Lin, Fangyu Peng, Jie Wen, Yizhi Liu, and Rong Yan. (2013). An Investigation of Workpiece Temperature Variation in end Milling Considering Flank Rubbing Effect. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 73, pp. 71-86. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.05.010
- [10] Baowan, P., Saikaew, C., and Wisitsoraat, A. (2017). Influence of Helix Angle on Tool Performances of TiAlN and DLC-Coated Carbide end Mills for Dry Side Milling of Stainless Steel. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 90, Issue 9-12, pp. 3085-3097. DOI: 10.1007/s00170-016-9601-5
- [11] Peckner, D. and Bernstein, I. M. (1977). **Handbook of Stainless Steels**. McGraw-Hill Book Company. New York
- [12] Prengel, H. G., Santhanam, A. T., Penich, R. M., Jindal, P. C., and Wendt, K. H. (1997). Advanced PVD-TiAlN Coatings on Carbide and Cermet Cutting Tools. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 94-95, pp. 597-602. DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00503-3
- [13] Jindal, P. C., Santhanam, A. T., Schleinkofer, U., and Shuster A. F. (1999). Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN Coated Cementedcarbide Tools in Turning. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 17, pp. 163-170. DOI: 10.1016/s0263-4368(99)000086

- [14] James, C., Sung, Ming-Chi Kan, and Michael Sung. (2009). Fluorinated DLC for Tribological Applications. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 27, pp. 421-426
- [15] Haruyo Fukui, Junya Okida, Naoya Omori, Hideki Moriguchi, and Keiichi Tsuda. (2004). Cutting Performance of DLC Coated Tools in Dry Machining Aluminum Alloys. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 187, pp. 70-76. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.01.014
- [16] Robertson, J. (1999). Deposition and Properties of Diamond Like Carbon. **Materials Research Society Symposium Proceedings**. Vol. 555, pp. 12. DOI: 10.1557/PROC-555-291
- [17] Yunn-Shiuan Liao, Ting-Chang Lin, Cheng-Yu Lai, Yen-Liang Chen, Hao-Hueng Chang, Chun-Pin Lin. (2014). Cutting Performance of Diamond-Like Carbon Coated Tips in Ultrasonic Osteotomy. **Journal of Dental Sciences**. Vol. 9, Issue 1, pp. 63-68. DOI: 10.1016/j.jds.2013.02.014
- [18] Ema, S. and Davies, R. (1989). Cutting Performance of End Mills with Different Helix Angles. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 29, Issue 2, pp. 217-227. DOI: 10.1016/0890-6955(89)90033-3
- [19] Omar, O. E. E. K., El-Wardany, T., and Elbestawi, M. A. (2007). An Improved Cutting Force and Surface Topography Prediction Model in End Milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 47, Issue 7-8, pp. 1263-1275. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.021