

การจำลองความเครียดพลาสติกและอัตราการความเครียดพลาสติกขณะกลึง
AISI 4340 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
**Simulation of Plastic Strain and Plastic Strain Rate in Turning Operation
of AISI 4340 Steel using Finite Element Method**

กัณฑ์กรณ์ เขาทอง¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 ถนน มาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม รหัสไปรษณีย์ 73140

*ผู้ติดต่อ: E-mail fengkkk@ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 034 355 310, เบอร์โทรสาร 034 355 310

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลของอัตราป้อนต่อความเครียดพลาสติกและอัตราการความเครียดพลาสติกขณะกลึงโลหะ AISI 4340 ด้วยความเร็วตัดสูง (high speed machining; HSM) โดยใช้สมการความเค้นไหล Johnson - Cook ร่วมกับแบบจำลองความเสียดทาน Coulomb ในการหาผลเฉลยการกระจายตัวของความเครียดพลาสติกและอัตราการความเครียดพลาสติกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่าความเครียดพลาสติกจะเกิดขึ้นบริเวณด้านนอกของเศษตัด (outside chip) มากกว่าด้านใน (inside chip) โดยความเครียดพลาสติกและอัตราการความเครียดพลาสติกจะแปรผันตามอัตราป้อน

คำสำคัญ: การกลึง, ความเครียดพลาสติก, อัตราการความเครียดพลาสติก

Abstract

This paper presents an influence of feed rate on plastic strain and plastic strain rate during high speed machining (HSM) operation of AISI 4340 Steel using Johnson-Cook flow curve constitutive equation combine with Coulomb friction model in order to obtain plastic strain distribution and plastic strain rate via finite element method. The result shows that plastic strain occurs more on the outer side of the chip than on the inner side of the chip. The values of plastic strain and plastic strain rate are found to have variation with the feed rate investigated in this study.

Keywords: Turning, Plastic Strain, Plastic Strain Rate

1. บทนำ

AISI 4340 เป็นเหล็กกล้าผสม นีมนำไปผลิตเกียร์ เฟลาขับ เฟลาข้อเหวี่ยง และชิ้นส่วนทางกลอื่นๆ ในยานยนต์และอากาศยาน เนื่องจาก AISI

4340 มีคุณสมบัติทางกลที่ทนต่อแรงดึง แรงบิด แรงกระแทก แรงกระทำซ้ำ และทนต่อการกัดกร่อนสูง เพราะมีส่วนผสมของโครเมียม [1]

กระบวนการผลิตเพลสำหรับยานยนต์และอากาศยานสามารถแบ่งกระบวนการผลิต 3 ขั้นตอนคือ 1) หล่อขึ้นรูป 2) กลึง 3) ชุบแข็ง สำหรับการกลึงชิ้นงานจะถูกตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดสูง (High Speed Machining; HSM) ทำให้โครงสร้างระดับอะตอมของชิ้นงานมีความบกพร่องของโครงสร้างน้อย ชิ้นงานมีความแข็งแรง ลดระยะเวลาตัด ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเที่ยงตรง และผิวที่ราบเรียบ ดังนั้น HSM จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

ปัจจุบันได้มีการนำซอฟต์แวร์วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษาพฤติกรรมทางกลและพฤติกรรมทางความร้อนของการตัดเฉือนโลหะด้วยกรรมวิธีการกลึง การเลือกซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้วิจัยต้องคำนึง ซอฟต์แวร์ที่นักวิจัยส่วนมากเลือกใช้สำหรับการศึกษาการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึงคือ DeformTM AbaqusTM และ AdvantEdgeTM แต่สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ MSC.Marc 2010 เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีลิขสิทธิ์

2. การตัดเฉือนด้วยกรรมวิธีการกลึง

องค์ประกอบพื้นฐานที่เกิดจากกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการกลึง คือ 1) เศษตัด (Chip Formation) 2) แรงตัดเฉือน (force cutting) 3) ความร้อน (heat) [2]

2.1 เศษตัด

เศษตัดแบ่งตามลักษณะรูปร่างออกเป็น 3 แบบคือ

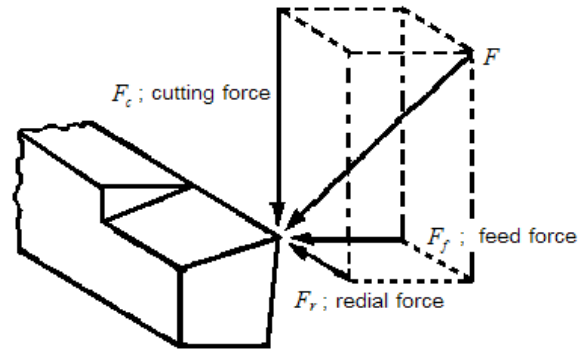
- 1) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง พบในการตัดเฉือนวัสดุเปราะมากเช่นเหล็กหล่อ ทองเหลือง
- 2) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง พบในการตัดเฉือนวัสดุเหนียว
- 3) เศษโลหะแบบต่อเนื่องชนิดเกิดขอบเย็นพบในการตัดเฉือนวัสดุเหนียวที่มีการป้อนตัดลึก ใช้ความเร็วต่ำและไม่มีน้ำมันหล่อเย็น

2.2 แรงตัดเฉือน

พิจารณาแบบจำลองทางเลขาคณิตของกระบวนการตัดชิ้นงาน ด้วยกระบวนการกลึงตาม

รูปที่ 1 แรงตัดเฉือนที่เกิดจากกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึงมี 3 แรงคือ

- 1) แรงตัดเฉือน (cutting force; F_c)
- 2) แรงป้อน (feed force; F_f)
- 3) แรงดันมีด (radial force; F_r)



รูปที่ 1 แรงตัดเฉือนที่เกิดจากกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึง [2]

2.3 ความร้อน

พลังงานจากการตัดเฉือนด้วยกรรมวิธีการกลึงส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 75 % สูญเสียไปกับเศษตัด (chip) 20 % ตกค้างอยู่ใบมีดกลึง และ 5 % ตกค้างอยู่ในชิ้นงาน

3. ความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกของชิ้นงานที่ถูกกลึงด้วย HSM

กระบวนการตัดเฉือนโลหะด้วยกรรมวิธีการกลึงนั้น งานทางกลจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและการเสียรูปแบบพลาสติก โดยมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น หากพิจารณาบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดกลึงซึ่งเป็นบริเวณขนาดเล็ก อุณหภูมิของผิวชิ้นงานจะสูงกว่า 1000 °C ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติก [3]

ปัจจุบันความไม่เข้าใจเกี่ยวกับความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นกับวัสดุในกระบวนการผลิตต่างๆ ยังมีอยู่มาก สำหรับชิ้นงานที่ถูกกลึงแบบ HSM จะทำให้เกิดความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกสูงกว่ากระบวนการผลิตด้วยวิธีอื่น ความเครียดและอัตรา

ความเครียดนี้จะส่งผลกระทบต่อกระแสวิกฤต ความเค้น การสึกหรอของมีดกลึง อายุของมีดกลึง ความสมบูรณ์ของผิวชิ้นงาน และรูปร่างของเศษชิ้นงาน [4]

อัตราความเครียดพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณอัตราความเครียดต่ำ ($< 1 \text{ s}^{-1}$) 2) บริเวณอัตราความเครียดปานกลาง ($1 - 10^3$ หรือ 10^4 s^{-1}) 3) บริเวณอัตราความเครียดสูง (มากกว่า 10^3 หรือ 10^4 s^{-1}) โดยอัตราความเครียดพลาสติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วตัด [5]

จากการตรวจเอกสารพบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราป้อนต่อการเกิดความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกขณะตัดเนื้อโลหะ AISI 4340 ด้วยการกลึงแบบ HSM ที่ความเร็วตัด 3000 เมตรต่อนาที ที่อัตราป้อน 0.05, 0.1 และ 0.2 มม.ต่อรอบ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4. การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 แบบจำลองวัสดุ

การศึกษาครั้งนี้ใช้สมการคอนสติติวทิฟตามแบบจำลองความเค้นไหลของ Johnson-Cook ตามสมการ (1) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุขณะถูกกลึง [1,3,5] โดยสมการความเค้นไหลนี้ถูกบรรจุใน MSC.Marc 2010 [6]

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right)^m \right) \quad (1)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดพลาสติก

$\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียดพลาสติก (s^{-1})

$\dot{\varepsilon}_0$ คือ อัตราความเครียดพลาสติกอ้างอิง (s^{-1})

T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลาย ($^{\circ}\text{C}$)

T คือ อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$)

A คือ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (MPa)

B คือ โมดูลัสของความแข็ง (MPa)

C คือ สัมประสิทธิ์ความไวของอัตรา

ความเครียด

n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็ง

m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความอ่อนตัวจากความร้อน

โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรในสมการ Johnson-Cook และสมบัติทางกลของโลหะ AISI 4340 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองความเค้นไหล Johnson-Cook และสมบัติทางกลของ AISI 4340 [1]

พารามิเตอร์ของตัวแปรในสมการ Johnson-Cook	
A (MPa)	729
B (MPa)	510
C	0.014
m	1.03
n	0.26
$\dot{\varepsilon}_0$ (s^{-1})	1
T_m ($^{\circ}\text{C}$)	1520
สมบัติทางกล	
ความหนาแน่น (kg m^{-3})	7830
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (GPa)	208
อัตราส่วนบัวของ	0.3
ความร้อนจำเพาะ ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	477
การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)	11.5×10^{-6}

4.2 แบบจำลองความเสียดทาน

การวิเคราะห์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับมีดกลึงใช้แบบจำลองความเสียดทานของคูลอมบ์ ตามสมการ (2) [5]

$$\mu = \frac{F_f + F_c \times \tan \gamma}{F_c - F_f \times \tan \gamma} \quad (2)$$

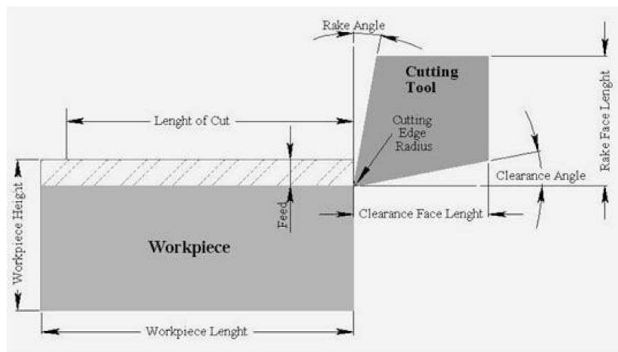
เมื่อ F_f คือ แรงป้อน

F_c คือ แรงตัดเฉือน

γ คือ มุมคายเศษ (Rake angle)

4.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกในโปรแกรม MSC.Marc 2010 ต้องสร้างแบบจำลองทางเลขาคณิตของชิ้นงาน AISI 4340 และมีดกลึง แบบ 2 มิติ ให้สอดคล้องกับรูปร่างของการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึงตามรูปที่ 2 โดยงานวิจัยนี้กำหนดขนาดของรูปร่างของการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึง AISI 4340 ตามตารางที่ 2



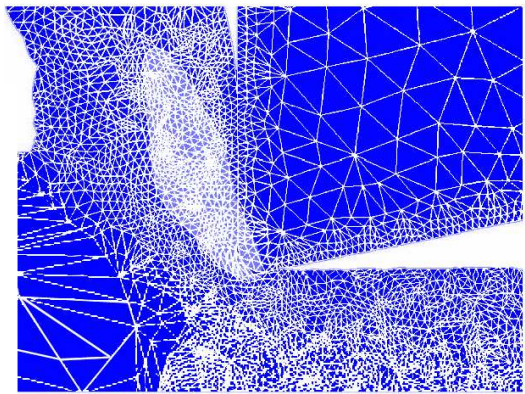
รูปที่ 2 รูปร่างของชิ้นงานและมีดกลึง [7]

ตารางที่ 2 ขนาดรูปร่างของการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยกระบวนการกลึงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขณะกลึงโลหะ AISI 4340

Workpiece	
Workpiece Length	5 mm
Workpiece Height	3 mm
Material	AISI 4340
Tool	
Rake angle	-6°
Rake face length	2 mm
Clearance angle	6°
Clearance length	2 mm
Cutting edge radius	0.02mm
Material	Triple layered cemented carbide
Process	
Depth of cut	1 mm
Length of cut	2 mm

Feed Rate	0.05, 0.1, 0.2 mm/rev
Cutting Speed	3000 m/min
Initial Temperature	25°C
Friction coefficient	ขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี

เมื่อได้แบบจำลองทางเลขาคณิต แบบ 2 มิติแล้ว จึงทำการสร้างโครงสร้างตาข่าย โดยกำหนดให้โครงสร้างตาข่าย (mesh) เป็นแบบ mash adaptive มีจำนวนโหนดสูงสุดเท่ากับ 70000 โหนด ขนาดเอลิเมนต์สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.1 และ 0.01 มิลลิเมตร ตามลำดับ ภาพตัวอย่างโครงสร้างตาข่ายแสดงตามรูปที่ 3



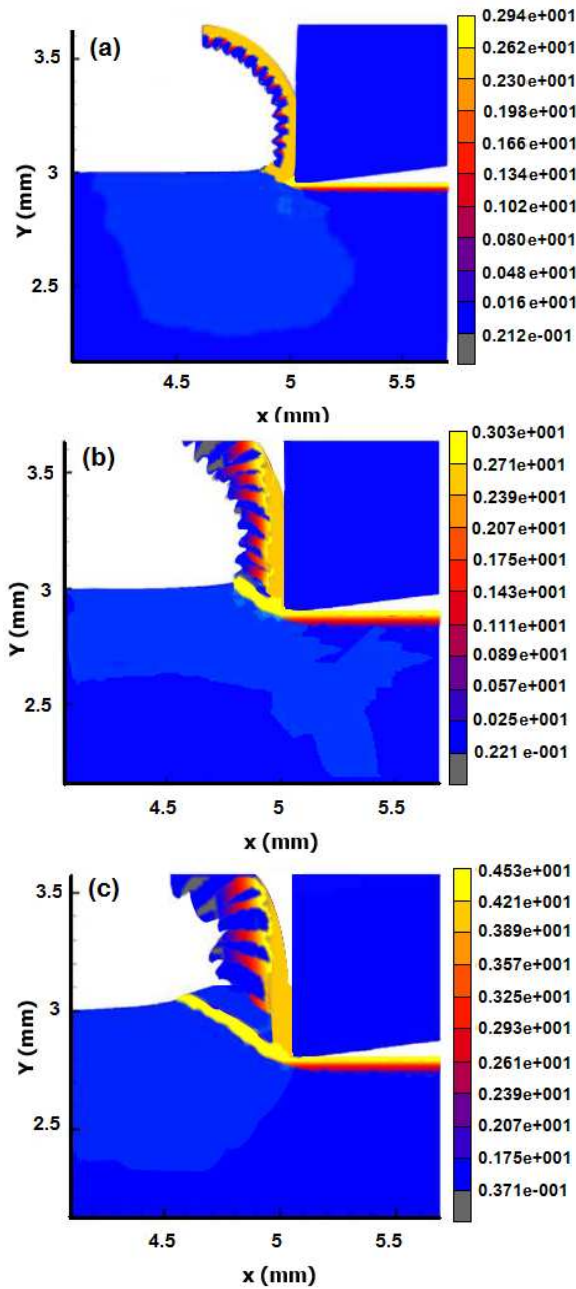
รูปที่ 3 โครงสร้างตาข่ายของชิ้นงานและมีดกลึง

5. ผลและวิจารณ์

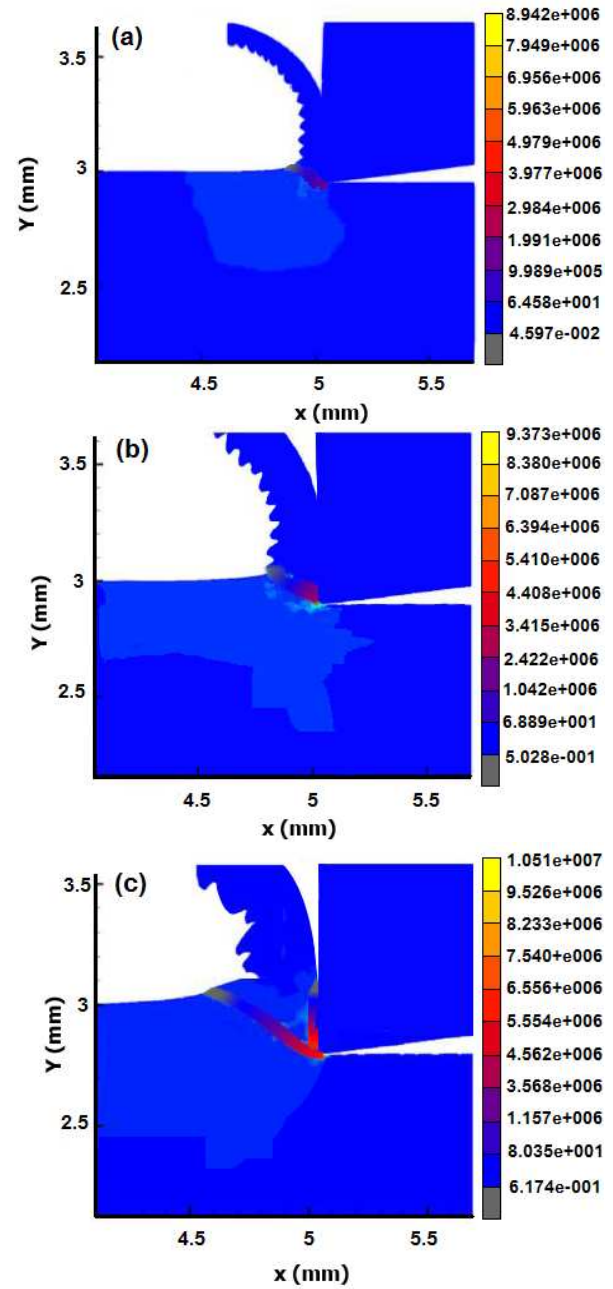
5.1 ผลการวิเคราะห์ความเครียดพลาสติก

พิจารณารูปที่ 4 เมื่อชิ้นงานถูกกลึงแบบ HSM ความเร็วตัด 3000 m/min ความลึกตัด 1 mm ที่อัตราป้อน 0.05 mm/rev ทำให้เกิดความเครียดพลาสติกเท่ากับ 2.94 แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนเป็น 0.1 และ 0.2 mm/rev จะเกิดความเครียดพลาสติกเท่ากับ 3.03 และ 4.53 ตามลำดับ นั่นคือเมื่อกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ความเครียดพลาสติกจะแปรผันตามอัตราป้อน โดยความเครียดพลาสติกจะเกิดสูงสุดที่บริเวณชิ้นงานสัมผัสกับ Cutting Edge Radius ไบมีดกลึง

เมื่อความเครียดพลาสติกเพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเสียรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสความเค้นเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้น โดยผิวด้านนอกของเศษตัดจะได้รับผลกระทบจากความเค้นเฉือนมากกว่าผิวด้านใน ดังนั้นผิวด้านนอกของเศษตัดจึงเกิดความเครียดพลาสติกมากกว่าผิวด้านใน



รูปที่ 4 ระดับชั้นสีของความเครียดพลาสติกของ AISI 4340 ขณะถูกกลึงแบบ HSM ความเร็วตัด 3000 m/min ความลึกตัด 1 mm ที่อัตราป้อน (a) 0.05 mm/rev (b) 0.1 mm/rev (c) 0.2 mm/rev



รูปที่ 5 ระดับชั้นสีของอัตราความเครียดพลาสติกของ AISI 4340 ขณะถูกกลึงแบบ HSM ความเร็วตัด 3000 m/min ความลึกตัด 1 mm ที่อัตราป้อน (a) 0.05 mm/rev (b) 0.1 mm/rev (c) 0.2 mm/rev

5.2 ผลการวิเคราะห์อัตราความเครียดพลาสติก

พิจารณารูปที่ 5 เมื่อชิ้นงานถูกกลึงแบบ HSM ความเร็วตัด 3000 m/min ความลึกตัด 1 mm ที่อัตราป้อน 0.05 mm/rev ทำให้เกิดอัตราความเครียดพลาสติกเท่ากับ $8.942 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนเป็น 0.1 และ 0.2 mm/rev จะเกิดอัตราความเครียดพลาสติกเท่ากับ 9.373×10^6

และ $1.1051 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ นั่นคือเมื่อกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่อัตราความเครียดพลาสติกจะแปรผันตามอัตราป้อน โดยอัตราความเครียดพลาสติกจะเกิดสูงสุดที่บริเวณชิ้นงานสัมผัสกับ Cutting Edge Radius ไบมีดกลึง

เมื่อเพิ่มอัตราป้อนจะทำให้อุณหภูมิขณะกลึง
ขึ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเสีบริฐเนื่องจากการ
ร้อนจึงเป็นสาเหตุให้อัตราความเครียดพลาสติกเพิ่ม
สูงขึ้น

อัตราความเครียดพลาสติกที่คำนวณได้มีค่า
มากกว่า 10^4 s^{-1} หมายความว่าอัตราความเครียด
พลาสติกที่เกิดจากการกลึงแบบ HSM เป็นอัตรา
ความเครียดสูง

6. สรุป

การตัดเฉือนขึ้นงานด้วยกรรมวิธีการกลึงแบบ
HSM ที่อัตราเร็วป้อนต่างๆ จะส่งผลต่อขึ้นงานดังนี้

- 1) เมื่อเพิ่มอัตราป้อนจะทำให้ความเครียด
พลาสติกและอัตราความเครียดพลาสติกเพิ่มขึ้น
- 2) ความเครียดพลาสติกจะเกิดขึ้นบริเวณด้าน
นอกของเศษตัด (outside chip) มากกว่าด้านใน
(inside chip) ทำให้บริเวณด้านนอกของเศษตัดเกิด
การเสีบริฐได้ง่ายกว่า
- 3) การกลึงแบบ HSM ที่ความเร็วตัด 3000
m/min ความลึกตัด 1 mm อัตราป้อนที่เหมาะสมคือ
0.05 mm/rev
- 4) ความเครียดพลาสติกและอัตราความเครียด
พลาสติกจะเกิดสูงสุดที่บริเวณขึ้นงานสัมผัสกับ
Cutting Edge Radius ไบมีดกลึง
- 5) อัตราความเครียดพลาสติกที่เกิดจากการกลึง
แบบ HSM เป็นอัตราความเครียดสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guo Y.B. and David W. Yen. (2004). A FEM
study on mechanisms of discontinuous chip
formation in hard machining, Journal of Material
Processing Technology, Vol 312. 155-156, pp.
1350-1356.
- [2] ทวี อินชินธรางกุล. (2537). เทคโนโลยีการตัด
ปาดผิว, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] Chandrakanth Shet and Xiaomin Deng.
(2000). Finite element analysis of orthogonal

metal cutting process, Journal of Materials
Processing Technology. Vol. 105, pp. 95-109.

[4] Wielage H and Vollertsen F. (2010).
Classification of Laser Shock Forming within the
Field of High Speed Forming Processes, Journal
of Materials Processing Technology. Vol. 211 (5),
pp. 953-957.

[5] Davim J.P. and Maranhao. (2009). A study of
plastic and plastic strain rate in machining of steel
AISI 1045 using FEM analysis, Materials and
Design, Vol. 30, pp. 160-165.

[6] MSC.Software Corporation. 2010. MSC. Marc
theory manual, USA, MSC. Software Corporation.

[7] C. Maranhao and J. Paulo Davim. (2010).
Finite element modeling of machining of AISI 316
steel: Numerical simulation and experimental
validation, Simulation Modelling Practice and
Theory, Vol. 18, pp. 139-156.