

การศึกษาสมบัติเชิงกลจากกระบวนการรีดผิวละเอียด ด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Mechanical Properties on Surface Fine Rolling Process using FEM-Simulation

ศิริชัย ต่อสกุล

Sirichai Torsakul

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3490 โทรสาร 0-2549-3442

E-mail: storsakul@yahoo.com

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปโลหะเพื่อให้ได้ผิวงานสำเร็จที่เรียบและมีความต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านการวิธีการขึ้นรูปโลหะ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาสมบัติเชิงกลจากกระบวนการรีดผิวละเอียด ด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคาดคะเนสมบัติเชิงกลภายใต้ผิวชิ้นงาน เช่น ความเค้นตกค้างภายใต้กระบวนการรีดผิวละเอียด โดยใช้เซรามิกบอลขนาด 6 มม. ซึ่งถูกหมุนรีดลงบนชิ้นงานความลึก 0.2 มม. ด้วยความดันสูง 150 บาร์ ผลลัพธ์ของวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลอง จากการวิเคราะห์พบว่าผิวชิ้นงานหลังจากการรีดผิวละเอียดมีความหยาบผิวดีกว่าก่อนรีดผิวละเอียดถึง $2.6\text{ }\mu\text{m}$ และเกิดความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน 800 MPa ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงของผิวชิ้นงานได้จากเดิมถึง 60 HV ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลการทดลองสอดคล้องกัน

Abstract

In Metal Forming processes, there are restrictions in producing work-pieces with enhanced surface finishes and improvement to the material fatigue strength. Therefore, this paper presents a new idea for the metal forming method which begins with the facilitation of fine surface rolling, for which produces the enhanced surface finish and increases the material strength. FEM- Simulation was carried out for

predicting the mechanical property under the work-piece surface which resulted in residual stress in the fine surface rolling process. The hard smooth rolling mill made from ceramic, was 6 mm. diameters. The ceramic ball was rolled and rotated on the work-piece surface 0.2 mm depth under high pressure 150 bar. The results from the FEM-Simulation were compared with the experiment. The results show that: (i) after rolling, the surface roughness of the work-piece increased approximate $2.6\text{ }\mu\text{m}$; (ii) the residual stress under the work-piece surface, was 800 MPa, thus the surface had more strength, about 60 HV. All the results derived from FEM-Simulation analysis showed reasonable agreement with the experimental application data.

1. บทนำ

เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ เป็นแขนงหนึ่งของกรรมวิธีการผลิตในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และอุปกรณ์เครื่องมือจักรกลต่างๆ ปัจจุบันกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งออกได้หลายกรรมวิธีการผลิต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และต้องการของรูปทรงผลิตภัณฑ์เป็นหลัก

กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแบบต่าง ๆ เช่น การรีดขึ้นรูป, การตีขึ้นรูป, การอัดขึ้นรูป, การดึงขึ้นรูป, การตัดโลหะแผ่น, การตัดโลหะแผ่นละเอียด, การลากขึ้นรูปด้วย, การดัดโค้ง และ การยืดขึ้นรูป [1-3].

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM, Finite Element Method) เป็นการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ด้วยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ได้นำมาใช้ในงานเชิงวิศวกรรม ตั้งแต่ปี 1960 เริ่มต้นจากงานคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ กระทั่งงานวิเคราะห์ในโครงสร้างต่าง ๆ [4-5] ปัจจุบันเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์แก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถวิเคราะห์วัสดุได้ทั้งในสภาวะความยืดหยุ่น (Elastic deformation) และสภาวะยึดตัว (Plastic deformation) โดยการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) ของปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะ [6-7] โดยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะ เพื่อลดขั้นตอนการผลิต, พยากรณ์ขีดความสามารถของกระบวนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องภายในและภายนอกผิวชิ้นงาน และปรับปรุงกรรมวิธีการผลิต เป็นต้น ดังนั้น FEM จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์งานวิจัยชิ้นนี้

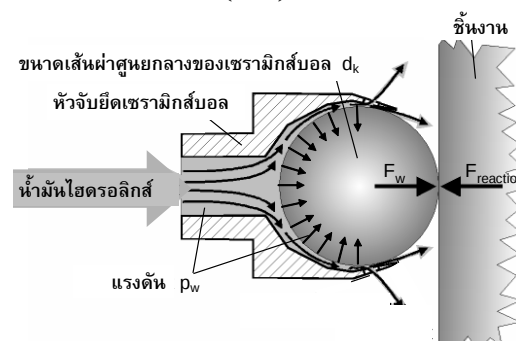
การขึ้นรูปโลหะเพื่อที่จะให้ได้ผิวงานที่เรียบในขณะเดียวกัน ก็ได้ผิวงานที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการใหม่ในการขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีการรีดผิวละเอียด (Surface fine rolling) เพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะซึ่งต้องการผิวงานเรียบและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์กระบวนการรีดผิวละเอียด เพื่อคาดคะเนผิวชิ้นงานและความเค้นตกค้างภายใต้กระบวนการรีดผิวละเอียด โดยใช้โปรแกรมการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORMTM ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะโดยเฉพาะ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้การรีดผิวละเอียด โดยเซรามิกบอลขนาด 6 มม. ถูกหมุนรีดลงบนชิ้นงานอย่างละเอียด ด้วยความลึก 0.2 มม. ซึ่งเป็นวัสดุชิ้นงานของใบพัดเครื่องจักร (Turbine) ด้วยความดันสูง ผลลัพธ์ของวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

2. ทฤษฎี

ลูกบอลที่ใช้ทำจากวัสดุเซรามิก ซึ่งมีความแข็งแรงสูง ลูกบอลถูกรีดบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความดันสูงบนผิวชิ้นงานสำหรับอิทธิพลที่เกิดขึ้นโดยตรงต่อกระบวนการรีดผิวละเอียด คือ ความดันการรีด p_w และ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซรามิกบอล d_K การคำนวณหาแรงที่ใช้การรีดนั้น ได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการลดปัญหาลงจากภายใต้สภาวะ

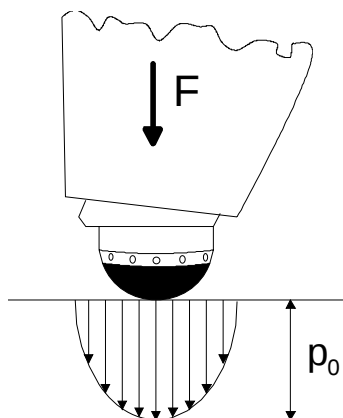
Hydrodynamic เดิมเป็นภายใต้สภาวะปัญหา Hydrostatic วิธีการนี้อาจใช้ได้ เมื่อสัดส่วนของ Hydrostatic มีขนาดใหญ่กว่า Hydrodynamic อย่างชัดเจน [8]. โดยระบบแรงดันกระจายตัวตั้งฉากไปตามผิวของเซรามิกบอล และ ทุก ๆ จุดมีปริมาณแรงดันเท่าๆ กัน โดยมีแรงดันที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานเท่านั้นที่ทำหน้าที่กดรีดผิวชิ้นงาน ส่วนแรงดันบางส่วนจะไหลออกทางขอบข้างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 1 แรงจากการรีดสามารถคำนวณหาได้ดังนี้ [9]

$$F_w = p_w \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_K}{4} \right)^2 \quad (1)$$



รูปที่ 1 แรงกระทำของกระบวนการรีดผิวละเอียด

ภายใต้การรีดนั้น สามารถเขียนรูปการกระจายของแรงดันภายใต้ผิวชิ้นงานได้ดังรูปที่ 2 แรงดันที่เกิดขึ้นจากการรีดนั้น เกิดการกระจายแรงตามรูปทรงภูเขาว่า โดยแรงดันสูงสุดเกิดขึ้นตรงจุดสัมผัสระหว่างผิวเซรามิกบอล กับผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2 แรงดันภายใต้ผิวชิ้นงานจากการรีด [10]

แรงดัน P_0 ภายใต้แรงรีดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3F_w E}{2r^2 (1-\nu^2)^2}} \quad (2)$$

เมื่อ

$$r = \frac{r_w \cdot r_B}{r_w + r_B} \quad (3)$$

$$E = \frac{2E_w \cdot E_B}{E_w + E_B} \quad (4)$$

คำอธิบาย

r_w คือ รัศมีผิวชิ้นงาน

r_B คือ รัศมีลูกบอล

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

E_w คือ Young's Modulus ของ ชิ้นงาน

E_B คือ Young's Modulus ของ ลูกบอล

3. วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการรีดผิวละเอียด เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลภายใต้ผิวชิ้นงาน ระหว่างกระบวนการรีด และหลังกระบวนการรีด [11-12] โปรแกรมสำหรับใช้วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานนี้ได้แก่ DEFORMTM ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานขึ้นรูปโลหะ

งานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์กระบวนการรีดผิวละเอียดแบบ 3D (Three dimension) ซึ่งประกอบด้วยชิ้นงาน และเซรามิกบอล เริ่มต้นโดยการสร้างโมเดล 3D ด้วยโปรแกรม Pro/ENGINEER จากนั้นแปลง (Export) ไฟล์โมเดลจาก Pro/ENGINEER มาเป็น ไฟล์ IGES (Initial Graphics Exchange Specification) แล้วนำไปประมวลผลในโปรแกรม DEFORMTM การวิเคราะห์เป็นแบบ Linear-elastic analysis ดังรูปที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุแสดงดังตารางที่ 1

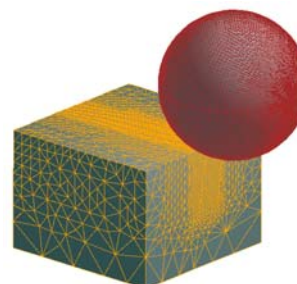
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

	วัสดุ	E-Modul [GPa]	ν
ชิ้นงาน	TiAl4V	120	0.24
เซรามิกบอล	Ceramic	420	0.3

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการรีดผิวละเอียด กระทำโดยการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ผลการจำลองออกมาถูกต้องตามการทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขต่าง ๆ ใช้สำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการรีดผิวละเอียด

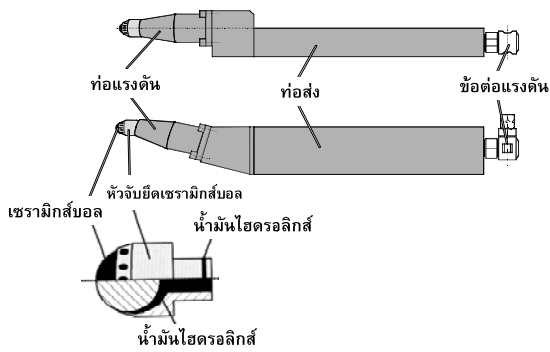
	ขอบเขตเงื่อนไข	เอลิเมนต์	Node	ความเร็ว [mm/s]	ความดัน [Bar]
ชิ้นงาน	Fixed	61,487	45,964	0.8	-
เซรามิกบอล	No	20,363	25,049	-	150



รูปที่ 3 การจำลองโมเดลการรีดผิวละเอียด

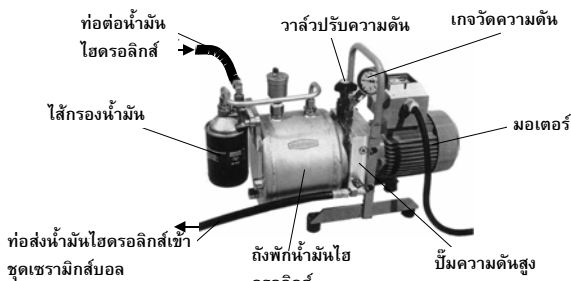
4. การทดลอง

การทดลองกระบวนการรีดผิวละเอียด ได้ทำการทดลองในห้องทดลองของ WZL RWTH Aachen ณ ประเทศเยอรมนี อุปกรณ์เครื่องมือที่สำคัญ ๆ คือ ชุดเซรามิกบด ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย เซรามิกสับบอลขนาด 6 มม., ชุดจับยึดเซรามิกบด และท่อต่อระบบแรงดันไฮดรอลิกส์



รูปที่ 4 ชุดเซรามิกบด

รูปที่ 5 แสดงชุดระบบส่งกำลังไฮดรอลิกส์ สำหรับส่งกำลังแรงดันไปยังเซรามิกบด เพื่อทำการรีดลงบนชิ้นงาน



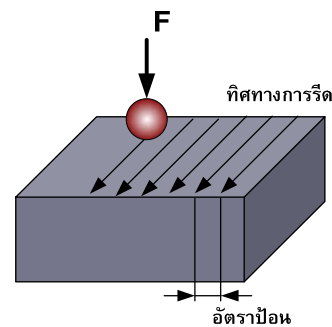
รูปที่ 5 ชุดอุปกรณ์ไฮดรอลิกส์ จาก บริษัท ECOROLL

ชุดอุปกรณ์เซรามิกบดถูกจับยึดเข้ากับหัวจับยึดบนเครื่องกัด CNC (Milling) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการรีดผิวละเอียดบนเครื่องกัด

ชิ้นงานถูกรีดด้วยเซรามิกบดด้วยความดันอัด 150 บาร์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.8 mm/s โดยทำการรีดผิวละเอียดด้วยความลึก 0.2 mm. ทำการรีดไปในทิศทางตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 7

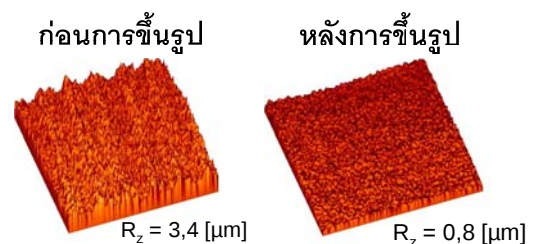


รูปที่ 7 แนวทิศทางการรีดผิวละเอียด

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

5.1 คุณภาพผิว (Surface roughness)

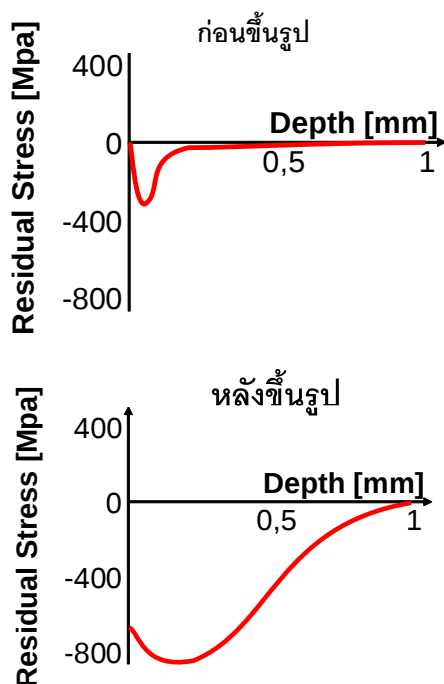
ผิวชิ้นงานหลังจากผ่านการรีดผิวละเอียดพบว่า คุณภาพผิวของชิ้นงานมีความหยาบผิวดี โดยเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.4 μm เป็น 0.8 μm โดยความหยาบผิวเพิ่มขึ้นเป็น 2.6 μm ดังรูปที่ 8 จากการวิเคราะห์ด้วย AFM



รูปที่ 8 ความหยาบผิวชิ้นงาน ก่อนและหลังการรีดผิวละเอียด

5.2 ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน (Residual stress under workpiece surface)

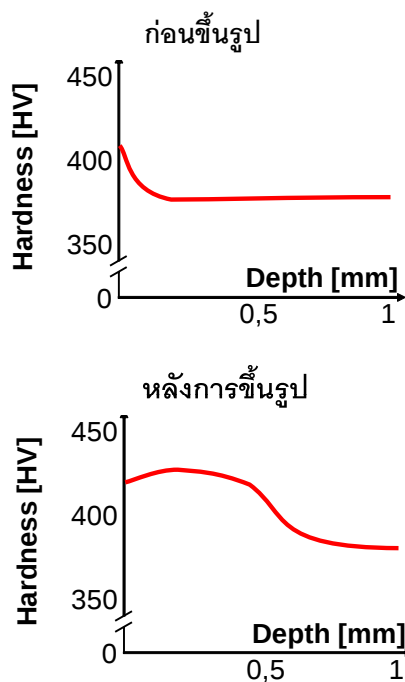
ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงานหลังจากการรีดผิวละเอียด มีค่า 800 MPa เป็นลักษณะความเค้นตกค้างอัด (Compressive residual stress) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 450 MPa ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน

5.3 ความแข็งของผิวชิ้นงาน (Hardness result)

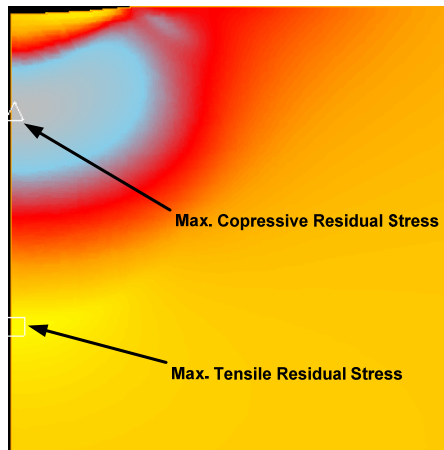
ความแข็งของผิวชิ้นงานเกิดขึ้นโดยตรงจากผลของความเค้นตกค้างภายใต้ชิ้นงานที่เกิดขึ้นภายหลังการรีดผิวละเอียด โดยสามารถเพิ่มความแข็งผิวชิ้นงานได้จากเดิมประมาณ 60 HV ดังรูปที่ 10



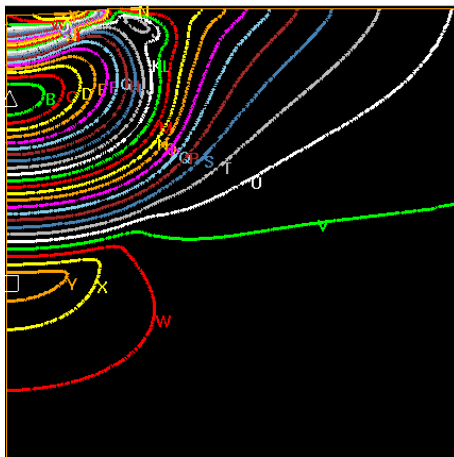
รูปที่ 10 ความแข็งของผิวชิ้นงาน

5.4 ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

การจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเกิดความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงานสองชนิดกล่าวคือ ความเค้นตกค้างอัด (Compressive residual stress) และ ความเค้นตกค้างดึง (Tensile residual stress) ซึ่งความเค้นตกค้างอัดเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างบริเวณใต้ผิว ซึ่งค่าความเค้นตกค้างสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณตรงกลางจากการกดรีดลึกลงไปประมาณ 0.2 มม. มีค่า 780 MPa ส่วนความเค้นตกค้างดึงเกิดขึ้นลึกลงไปจากความเค้นตกค้างอัด ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความเค้นตกค้างอัด ทำให้ชิ้นงานเกิดแรงดึงด้านภายในชิ้นงานหลังจากเซรามิกบอรรีดผ่านชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 Contour Plot ของความเค้นตกค้าง



รูปที่ 12 Contour Plot ของความเค้นตกค้าง

6. สรุปผล

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลจากกระบวนการรีดผิวละเอียดกระทำได้โดยการจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม DEFORMTM ลูกบอลเซรามิกถูกรีดลงบนชิ้นงาน วัสดุเป็น TiAl4V ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับทำเทอร์ไบน์ (Turbine) นั้น ได้ผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดีมาก ซึ่งจากการทดลองพบว่าเกิดความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงานลึก 0.2 มิลลิเมตร เพิ่มคิดเป็น 128 % จากเดิม เป็นผลทำให้ความแข็งของผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากเดิมคิดเป็น 16 % และความหยาบผิวดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก WZL, Aachen

University of Technology, Germany และ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schuler GmbH., "Metal Forming Handbook", Springer, Berlin, 1998.
- [2] Lange, K., "Metal Forming Handbook", McGraw-Hill, Springer, New York, 1985.
- [3] Altan, T., Oh, S.L. and Gegel, H.L., "Metal Forming: Fundamentals and Applications", American Society for Metals, Ohio, 1986.
- [4] Betten, J., "Finite Elemente für Ingenieure 1", 2 Auflage, Springer, Berlin, 2003.
- [5] Kress, G., "Analysis Structure with FEM", ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich, 2004.
- [6] Zienkiewicz, O.C., "The Finite Element Method", McGraw-Hill, Maidenhead, 1997.
- [7] Hughes, T.J.R., "The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis", Prentice-Hall, New York, 1987.
- [8] Röttger, K., "Walzen hartgedrehten Oberflächen", Dissertation WZL RWTH - Aachen, 2002.
- [9] Bernstein, G., "Grundlagen und Anwendung Glatt- und Festwalzens, Jahrbuch Honen-Schleifen-Läppen", 50. Ausgabe Vulkanverlag Essen, 1981, pp.438-459.
- [10] Liermann, J., "Hartdrehen wälzbelasteter Bauteile", Dissertation WZL RWTH – Aachen, 1998.
- [11] Chandra, A., "Analyses of metal forming problems by the boundary element method", International Journal of Solids and Structures, 31, 1994, pp.1695-1736.
- [12] Jiang, Y. and Tieu, A.K., "A 3-D finite element method analysis of cold rolling of thin strip with friction variation", 2004, pp.37:185-191.