

การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวโดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุง
ความต้านทานการสึกหรอบนยึดติดในกระบวนการรีดลดความหนา
ผนังถ้วยอะลูมิเนียม

Application of Surface Modification by Shot Peening for Improving
Adhesive Wear Resistance in Ironing of Aluminum Alloy Cup

วิทยา ดาวดอน* สุรัตน์ วรรณศรี สุระเชษฐ์ ช้อนกลิ่น รุ่งวสันต์ ไกรกลาง นรารักษ์ บุตรชา

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Witthaya Daodon* Surat Wannasri Surachade Sonklin Rungwasun Kraiklang Nararak Budchar

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala

University of Technology Isan, 744 Suranarai Rd., Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author Email: witthaya.da@rmuti.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: January 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอบนยึดติดในกระบวนการรีดลดความหนาผนังถ้วยอะลูมิเนียมโดยใช้การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ด้วยการยิงอนุภาคแข็ง และการขัดผิวตามหลัง แม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังถูกสร้างจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์เรซินเคลือบและมีการปรับสภาพผิวที่ต่างกัน 3 สภาวะ คือ ผิวขัดมัน ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันให้มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu m$ และผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันให้มี $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu m$ วัสดุชิ้นงาน คือ แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O แผ่นอะลูมิเนียมถูกเตรียมเป็นชิ้นงานถ้วยด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกก่อนการรีดลดความหนาผนัง น้ำมันหล่อลื่นถูกทาไปบนผิวของแม่พิมพ์และผิวของถ้วย อัตราการรีดลดความหนาผนังถูกเปลี่ยนเพื่อเร่งการเกิดการสึกหรอบนยึดติด จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ผิวขัดมัน แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันที่มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu m$ ประสบความสำเร็จในการรีดลดความหนาผนังถ้วยที่อัตราการรีดลดความหนาผนังสูงโดยปราศจากการยึดติดของเนื้ออะลูมิเนียมบนผิวของแม่พิมพ์ ความต้านทานการสึกหรอบนยึดติดถูกปรับปรุงเนื่องจากหลุมขนาดเล็กที่กระจายบนผิวขรุขระที่ถูกสร้างจากการยิงอนุภาคแข็งช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปยังผิวแม่พิมพ์และถ้วยระหว่างการขึ้นรูป

คำสำคัญ: การรีดลดความหนาผนังถ้วย ถ้วยอะลูมิเนียม การต้านทานการสึกหรอบนยึดติด การยิงอนุภาคแข็ง
ไททาเนียมคาร์ไบด์เรซินเคลือบ

ABSTRACT

The aim of this research is to improve adhesive wear resistance in ironing of aluminum alloy cups by utilizing modification of the die surface with shot peening and post-polishing. The dies were

made of TiCN-based cermet with three different surface conditions, polished, shot-peened ($R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$) and shot-peened ($R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$) surfaces. Workpiece material was aluminum alloy A3003-O sheets. The aluminum alloy sheets were formed into cups by a deep drawing process. Before ironing, liquid lubricant was applied onto the die and cup surfaces. The ironing ratio was changed to accelerate occurrence of adhesive wear. The results showed that comparing to the smooth polished die, the shot-peened die ($R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$) succeeded in ironing cups at a high ironing ratio without adhesion of the cup material on the die. The adhesive wear resistance was improved because dimples on the surface structured by shot peening helped retaining and supplying the lubricant into the die-cup interface during the ironing.

Keyword: Cup ironing, aluminum alloy cup, adhesive wear resistance, shot peening, TiCN-based cermet.

1. บทนำ

อลูมิเนียมเป็นวัสดุน้ำหนักเบาที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และ อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น [1] อย่างไรก็ตาม การผลิตชิ้นส่วนจากอลูมิเนียมยังคงประสบปัญหาการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ของเนื้อวัสดุชิ้นงานไปบนผิวของแม่พิมพ์ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยขีดข่วน (Galling) เป็นร่องลึกบนผิวของผลิตภัณฑ์ [2] เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าว สารหล่อลื่นจึงถูกใช้กันโดยทั่วไปในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ [3]

ระบบการหล่อลื่นแบบใช้น้ำมัน ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความสามารถในการหล่อลื่น โดยลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่หยาบจะมีหลุมขนาดเล็กที่สามารถช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งก่อให้เกิดฟิล์มบางของสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวสัมผัสส่งผลให้ความสามารถในการหล่อลื่นดีขึ้น กลไกการหล่อลื่นดังกล่าวถูกเสนอและกำหนดชื่อว่า การหล่อลื่นแบบไมโคร-พลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ (Micro-plasto-hydrodynamic Lubrication) [4] เวลาต่อมา กลไกการหล่อลื่นแบบไมโคร-พลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ถูกพิสูจน์ในการทดสอบลากขึ้นรูปเย็น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกต

โดยตรงไปที่ผิวสัมผัสระหว่างเครื่องมือและชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์โปร่งใส [5, 6] อัตราการลดความหนา ความเร็วการลากขึ้นรูป และความหนืดของสารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อการกระจายของสารหล่อลื่นออกจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวของชิ้นงาน [7]

เนื่องจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวสามารถกักเก็บน้ำมันและเพิ่มการหล่อลื่น จึงมีการพัฒนาการสร้างหลุมขนาดเล็กบนแผ่นชิ้นงานเพื่อปรับปรุงเงื่อนไขทางไดรบบอลยี (Tribology) ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น [8] Electron Beam Texturing ถูกใช้สร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของลูกรีด (Roller) ระหว่างกระบวนการรีด (Rolling) ลักษณะพื้นผิวของลูกรีดจะถูกส่งถ่ายไปบนพื้นผิวของโลหะแผ่น จากการนำโลหะแผ่นดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก พบว่า ความเสียหายลดลงเมื่อความเร็วการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น [9] สมรรถนะการหล่อลื่นในกระบวนการรีดลดความหนาผนัง และในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมถูกปรับปรุงโดยการสร้างหลุมขนาดเล็กบนแผ่นชิ้นงาน [10] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการขึ้นรูปที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปมาก หลุมขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานจะเสียรูปจนไม่สามารถทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันเพื่อเพิ่มการหล่อลื่นได้

ตรงกันข้าม ผิวของเครื่องมือหรือแม่พิมพ์มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูง ไม่ค่อยเปลี่ยนรูปมากนัก ดังนั้น

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

การสร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของแม่พิมพ์ สามารถช่วยการหล่อลื่นได้แม้จะมีการใช้งานที่ยาวนาน ในกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) หลุมขนาดเล็กถูกสร้างขึ้นบนผิวของพunch (Punch) หลุมขนาดเล็กดังกล่าวทำหน้าที่กักเก็บ และป้อนน้ำมันเข้าสู่ผิวสัมผัสของพunch และชิ้นงานทำให้การสึกหรอของพunch ลดลง และอายุการใช้งานของพunch ยาวนานขึ้น [11, 12] ปัจจุบันเพื่อลดการสึกหรอของเครื่องมือหรือแม่พิมพ์ ผิวเคลือบแข็ง (Hard Coating) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ในการจำลองการสึกหรอบนเครื่อง Tribometer ด้วยวิธี Ball-on-disc พบว่า เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ที่เคลือบด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุด มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่เคลือบด้วยไททาเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) และไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) [13] ผิวเคลือบแข็งชนิดต่างๆ ถูกนำไปใช้เคลือบพunch SKD11 ในงานปั๊มตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS-SPCC จากการทดสอบการสึกหรอด้วยแม่พิมพ์ตัด พบว่า การใช้ผิวเคลือบแข็งที่มีความแข็งสูงส่งผลให้ระยะการสึกหรอที่ด้านข้างของพunch ลดลง [14] Basnyat และคณะ [15] สร้างหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวของผิวเคลือบไททาเนียมอลูมิเนียมคาร์ไบด์ (TiAlCN) โดยภายในหลุมขนาดเล็กมีสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง (Solid Lubricants) กักเก็บอยู่ จากการศึกษาลักษณะทางด้านไดรบบอลีย์ พบว่า ความเสียดทานลดลงอย่างมากเนื่องจากหลุมขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บ และจ่ายสารหล่อลื่นชนิดของแข็งไปยังผิวหน้าของวัสดุคู่สัมผัส

การสร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของชิ้นงานสามารถทำได้โดยกระบวนการเหล่านี้ เช่น Shot Peening, Electro Discharge Machining (EDM), Laser Texturing, Electron Beam Texturing และ Electro-Chemical Etching เป็นต้น [3] การยิงอนุภาคแข็ง (Shot Peening) คือ กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ชนิดหนึ่ง ซึ่งอนุภาคแข็งรูปร่างทรงกลมขนาดเล็กถูกยิงไปที่ผิวของโลหะด้วยความเร็วสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดหลุมขนาดเล็กบริเวณผิวชิ้นงาน และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ

การยิงอนุภาคแข็งถูกนำไปใช้สำหรับการปรับสภาพผิววัสดุฝังในทางการแพทย์ เช่น เหล็กตามกระดูก การยิงอนุภาคแข็งส่งผลให้ความเสียดทานลดลง วัสดุมีความแข็งแรงทนทานต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ทำให้สามารถผลิตเหล็กตามกระดูกที่มีขนาดบางลง และมีน้ำหนักเบา [16] สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในการทดสอบลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์โดยใช้การยิงอนุภาคแข็ง (Shot Peening) และไนไตรดิง (Nitriding) ปรับปรุงการต้านทานการเกิดรอยขีดข่วน (Galling Resistance) เนื่องจากความสามารถของการหล่อลื่นเพิ่มขึ้น [17] ซึ่งจะเห็นได้ว่า การปรับปรุงผิวแม่พิมพ์โดยใช้การยิงอนุภาคแข็งสร้างหลุมกักเก็บน้ำมันขนาดเล็กช่วยเพิ่มความสามารถการหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงสนใจประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์โดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดในกระบวนการรีดลดความหนาผนังถ้วยอะลูมิเนียม

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. วัสดุแม่พิมพ์และวัสดุชิ้นงาน

การศึกษานี้ประกอบด้วยสองกระบวนการขึ้นรูป คือ กระบวนการลากขึ้นรูปลึกสำหรับเตรียมชิ้นงานถ้วย และกระบวนการรีดลดความหนาผนังสำหรับประเมินความสามารถการต้านทานการสึกหรอแบบยึดติด แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Die) และพunch (Punch) ที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น JIS SKD11 ผ่านการอบชุบให้มีความแข็ง 60 ± 1 HRC และผ่านการขัดมันให้มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Arithmetic Mean Roughness; R_a) $0.02 \mu\text{m}$ วัสดุชิ้นงานคือ แผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O เส้นผ่านศูนย์กลาง 66 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร ที่มีสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 1 แม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังทำจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์เบสเซอร์เมท (TiCN-based Cermets) มีความแข็ง 1150 HV น้ำมันแร่ปราศจากสารเติมแต่งซึ่งมีความหนืด (Kinematic

Viscosity) $562 \text{ mm}^2/\text{s}$ ถูกใช้สำหรับหล่อขึ้นรูป

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O

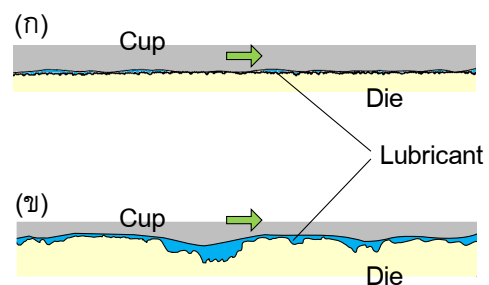
Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)	Surface roughness, R_a (μm)
106	26.8	31	0.22

2.2. การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์

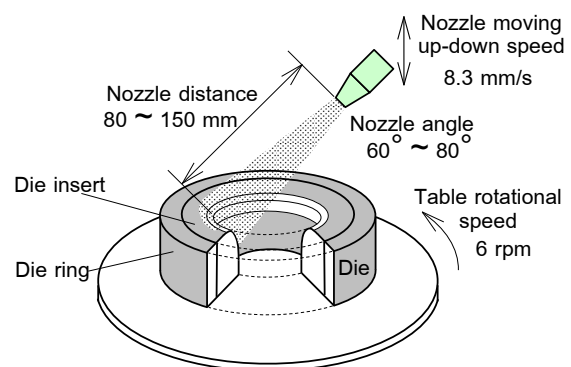
กลไกการหล่อขึ้นรูประหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 ในการรีดลดความหนาผนัง ความหนาผนังด้านข้างของถ้วยถูกรีดให้บางลงด้วยช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Die Clearance) ที่เล็กกว่าความหนาเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงาน ดังนั้นแรงดันสัมผัส (Contact Pressure) ระหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์มีค่าสูง เมื่อผิวทั้งสองสัมผัสกันโดยตรง การสึกหรอแบบยึดติดจะเกิดขึ้น โดยทั่วไปการป้องกันการสึกหรอแบบยึดติด ผิวแม่พิมพ์จะถูกขัดมันให้เรียบและถูกหล่อลื่นด้วยน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม บนแม่พิมพ์ผิวขัดมันน้ำมันหล่อลื่นจะถูกกวาดออกจากผิวสัมผัสได้ง่าย ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 1 (ก) บนแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วตามด้วยการขัดมัน น้ำมันหล่อลื่นถูกกักเก็บในหลุมบนผิวขรุขระและถูกป้อนเข้าสู่ผิวสัมผัสซึ่งส่งผลให้ความสามารถการหล่อขึ้นเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1 (ข)) ด้วยกลไกการหล่อขึ้นดังที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้ หลุมขนาดเล็กจึงถูกสร้างบนพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

แม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังประกอบด้วยตัวเรือน (Die Ring) และดาวยินเสริท (Die Insert) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2 ดาวยินเสริทนี้ทำจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์ ไบโนไตรเบสเซอร์เมท และถูกปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็ง แล้วตามด้วยการขัดมันให้มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ค่าต่างๆ ผิวขัดมันซึ่งมีความหยาบผิวต่ำ $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ก) ถูกใช้เป็นผิว

อ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ เบื้องต้น การปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็งถูกเตรียมจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนของการเตรียม คือ ขั้นแรกการยิงสร้างผิวหยาบด้วยอนุภาคอะลูมินา (Alumina Particle) ขั้นที่สองและสาม การยิงลบปลายแหลมของผิวหยาบด้วยอนุภาคแก้ว (Glass Bead) และอนุภาคคาร์ไบด์ (Hard Carbide Particle) ตามลำดับ กระบวนการยิงอนุภาคแข็งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 อนุภาคแข็งขนาดเล็กถูกยิงออกจากหัวยิงอนุภาค (Nozzle) โดยแรงดันลม ระยะระหว่างหัวยิงอนุภาคและแม่พิมพ์ คือ $80 \sim 150 \text{ mm}$ เพื่อยิงอนุภาคไปยังผิวด้านในของแม่พิมพ์ หัวยิงอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ด้วยความเร็ว 8.3 mm/s พร้อมกับปรับมุมระหว่าง $60^\circ \sim 80^\circ$ กับแนวระดับ ในขณะเดียวกันแม่พิมพ์หมุนด้วยความเร็วรอบ 6 rpm



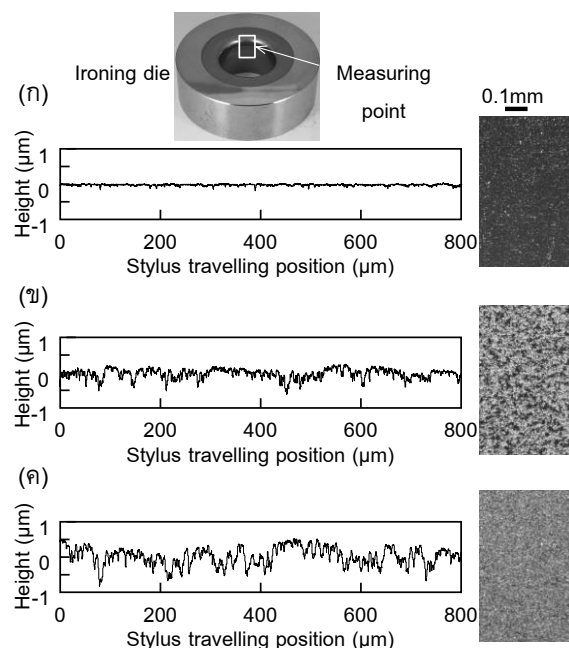
รูปที่ 1 กลไกการหล่อขึ้นรูประหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์ (ก) แม่พิมพ์ผิวขัดมัน และ (ข) แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็ง แล้วตามด้วยการขัดมัน



รูปที่ 2 กระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

ผิวของแม่พิมพ์หลังจากการปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $R_a = 0.21 \mu\text{m}$ ผิวดังกล่าวถูกนำมาขัดมันต่อโดยใช้ฝีมือนักด้วย Diamond Paste ขนาด $3 \mu\text{m}$ และ $1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เพื่อที่จะควบคุมค่าความหยาบผิว ระหว่างขัดมันจึงมีการวัดความหยาบผิวของแม่พิมพ์เป็นระยะๆ ค่าความหยาบผิวของผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันถูกกำหนดเป็นช่วงเพื่อให้สะดวกต่อการทำงาน เนื่องจากไม่ต้องการให้ผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันเรียบจนกระทั่งใกล้เคียงกับผิวขัดมันมากจนเกินไป ช่วงแรกกำหนด $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ช่วงที่สอง เพื่อที่จะลดความหยาบผิวจาก $R_a = 0.21 \mu\text{m}$ ดังนั้นกำหนด $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$ สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันที่มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ” ปลายยอดแหลม (Asperities) ของพื้นผิวหยาบถูกขัดออก พื้นผิวประกอบด้วยหลุมขนาดเล็ก ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ข) สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันที่มี $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$ ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง” ถึงแม้ว่าผิวแม่พิมพ์จะถูกขัดมัน แต่ปลายยอดแหลมยังคงอยู่ และพื้นผิวมีลักษณะหลุมขนาดเล็กและมีปลายยอดแหลม ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ค)

สมบัติของผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันมีค่าความหยาบผิวดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปร่างโปรไฟล์ความหยาบผิวของแม่พิมพ์ (ก) ผิวขัดมัน (ข) ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ และ (ค) ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง

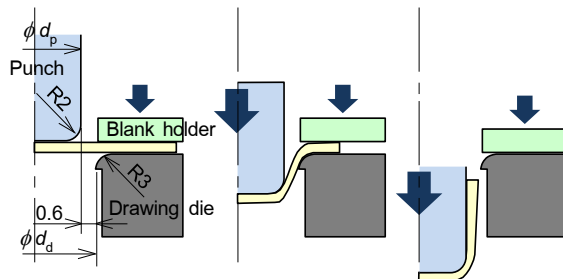
ตารางที่ 2 สมบัติของผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Die	Surface modifying method	Surface roughness, R_a (μm)
ผิวขัดมัน	Polishing	0.02
ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ	Shot peening & Post-polishing	0.08 ~ 0.10
ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง	Shot peening & Post-polishing	0.14 ~ 0.18

2.3. การลากขึ้นรูปสีกและการรีดลดความหนาผนัง

ก่อนการรีดลดความหนาผนัง แผ่นอลูมิเนียมกลมถูกขึ้นรูปเป็นชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปสีกดังแสดงในรูปที่ 4 แรงจับยึดแผ่นเปล่า (Blank

Holder Force) ที่ใช้กดแผ่นอลูมิเนียมระหว่างการลากขึ้นรูปมีค่าเท่ากับ 1 kN



รูปที่ 4 การลากขึ้นรูปด้วยแสดงในมุมมองภาพตัดครึ่ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

ชิ้นงานด้วยถูกขึ้นรูปเตรียมไว้ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อสร้างอัตราการรีดลดความหนาผนังที่แตกต่างกันโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเล็ก และพันซ์ที่มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 3 ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและพันซ์มีขนาดเท่ากับความหนาของแผ่นอลูมิเนียม คือ 0.6 มิลลิเมตร สำหรับทุกอัตราการรีดลดความหนาผนัง

ตารางที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ และพันซ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยสำหรับอัตราการรีดลดความหนาผนังต่าง ๆ

Nominal ironing ratio r (%)	Drawing die diameter d_d (mm)	Punch diameter d_p (mm)
10	34.12	32.92
20	34.24	33.04
30	34.36	33.16
35	34.42	33.22
40	34.48	33.28
50	34.60	33.40

การเปลี่ยนอัตราการรีดลดความหนาผนังสามารถอธิบายได้ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 5 เมื่อขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของพันซ์และด้วยถูกปรับเปลี่ยน ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังคงเดิม คือ 34 มิลลิเมตร ทำให้ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังและพันซ์เปลี่ยนไป ส่งผลให้อัตราการรีดลดความหนาผนังเปลี่ยนแปลง อัตราการรีดลดความหนาผนังสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$r = \frac{t_0 - c}{t_0} \quad (1)$$

เมื่อ r = อัตราการรีดลดความหนาผนัง (Nominal Ironing Ratio) หน่วย %

t_0 = ความหนาเริ่มต้นของแผ่นอลูมิเนียมเปล่า (Initial Blank Thickness) หน่วย มิลลิเมตร

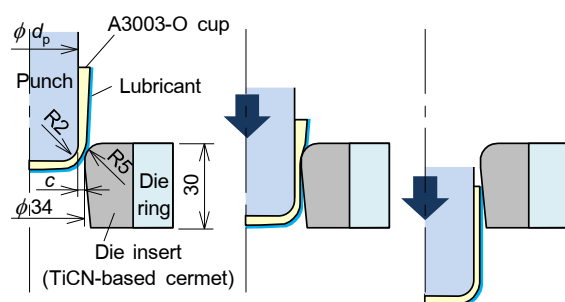
c = ช่องว่าง (Clearance) ระหว่างแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังและพันซ์ หน่วย มิลลิเมตร

ในการรีดลดความหนาผนัง พันซ์ที่ใช้เป็นชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเล็ก พันซ์แต่ละขนาดใช้สำหรับด้วยที่เตรียมมาที่อัตราการรีดลดความหนาผนังหนึ่งเท่านั้น เช่น พันซ์ขนาด 33.04 มิลลิเมตร ใช้สำหรับด้วยที่เตรียมมาที่อัตราการรีดลดความหนาผนัง $r = 20\%$ เป็นต้น ชิ้นงานด้วยถูกติดตั้งไปที่ปลายพันซ์ ผิวของด้วยและผิวของแม่พิมพ์ถูกทาดด้วยน้ำมันหล่อลื่น หลังจากนั้นด้วยถูกกดโดยพันซ์ผ่านแม่พิมพ์ ด้วยช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เล็กกว่าความหนาเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงาน ดังนั้นความหนาผนังด้านข้างของด้วยจึงถูกรีดให้บางลงและความสูงของด้วยเพิ่มขึ้น ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 5

ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง คือ อัตราการรีดลดความหนาผนังสูงสุดที่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จโดยปราศจากการสีกหรือแบบยึดติด หรือข้อบกพร่อง ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังถูกใช้เพื่อประเมินความสามารถด้านทานการสีกหรือแบบยึดติดของแต่ละเงื่อนไขสภาพผิว แต่ละเงื่อนไขสภาพผิวอัตราการรีดลดความหนาผนังจะถูกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออัตราการรีดลดความหนาผนังเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะเกิดการสีกหรือ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

แบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ และ/หรือจะเกิดข้อบกพร่องบนผนังถ้วย เช่น การฉีกขาด หรือรอยขีดข่วน ข้อบกพร่องดังกล่าวถูกสังเกตเบื้องต้นด้วยตาเปล่า การศึกษาหรือแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ถูกสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)



รูปที่ 5 การรีดลดความหนาผนังถ้วยแสดงในมุมมองภาพตัดครึ่ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

การทดลองรีดลดความหนาผนังใช้แม่พิมพ์ที่มีสภาพผิวต่างกัน 3 แบบ คือ แม่พิมพ์ผิวขัดมัน แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคเชิงความหยาบผิวต่ำ และแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคเชิงความหยาบผิวสูง แต่ละสภาพผิวแม่พิมพ์ทดลองที่อัตราการรีดลดความหนาผนัง 20% 30% 35% และ 40% ตามลำดับ กรณีที่อัตราการรีดลดความหนาผนังหนึ่งๆ เกิดการสึกหรอแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ หรือเกิดข้อบกพร่องบนผนังถ้วย การทดลองจะหยุดไว้ที่อัตราการรีดลดความหนาผนังนั้นๆ เบื้องต้น ออกแบบการทดลองไว้ทั้งหมด 12 แบบ ซึ่งแต่ละแบบดำเนินการทดลองแบบละ 3 ครั้ง

2.4. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่น

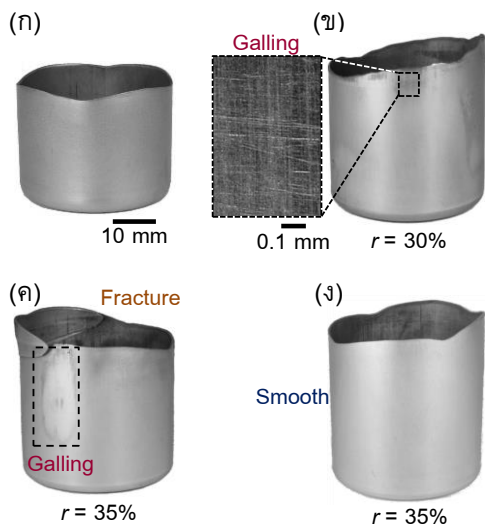
ตามสมมติฐานดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคเชิงแล้วตามด้วยการขัดมัน สามารถช่วยเพิ่มการหล่อลื่นได้ เป็นผลมาจากการที่หลุมบนผิวขรุขระกักเก็บและป้อนน้ำมันหล่อลื่นเข้าสู่ผิวสัมผัส เมื่อความสามารถการหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดเพิ่มขึ้น เห็นได้ว่า ทั้งสภาพผิวแม่พิมพ์และน้ำมันหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อการต้านทานการสึกหรอ

แบบยึดติด ดังนั้นอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นจึงถูกศึกษา ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้หาได้จากผลต่างของน้ำหนักก่อน และน้ำหนักหลังทาน้ำมันหล่อลื่น ทารด้วยพื้นที่ผิวด้านข้างของถ้วยที่ถูกทาด้วยน้ำมันหล่อลื่นนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สภาพผิวแม่พิมพ์ 2 แบบ คือ ผิวขัดมัน และอีกผิวเลือกใช้ผิวยิงอนุภาคเชิงที่มีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังสูงสุด ทดลองรีดลดความหนาผนังที่ $r = 30\%$ เริ่มต้นการทดลอง หล่อลื่นโดยใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปกติ หลังจากนั้น ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นจะถูกลดลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณน้ำมันหล่อลื่นลดลงถึงระดับหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ การศึกษาครั้งนี้ จะทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำมันหล่อลื่นต่ำสุดที่จะเกิดการสึกหรอแบบยึดติด

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

3.1. การปรับปรุงขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง

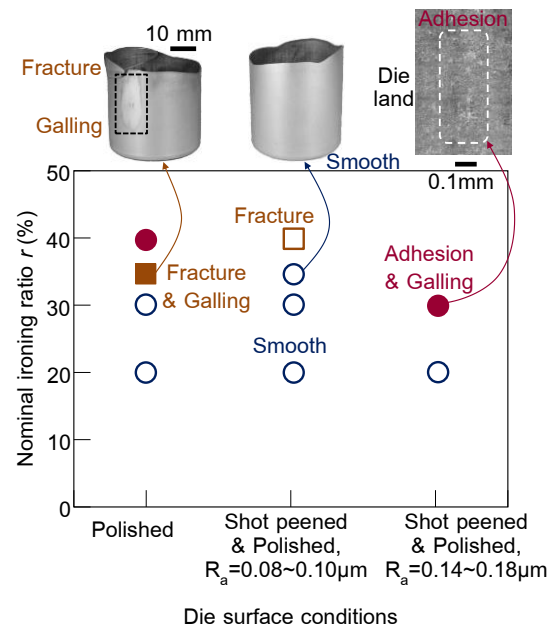
ลักษณะผิวถ้วยที่ผ่านการรีดลดความหนาผนังถูกแสดงในรูปที่ 6 สำหรับแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคเชิงความหยาบผิวสูง (รูปที่ 6 (ข)) เกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนผิวถ้วย แม้ที่อัตราการรีดลดความหนาผนังที่ต่ำ ถึงแม้ว่าบนพื้นผิวนี้จะมีหลุมขนาดเล็กสำหรับกักเก็บน้ำมันหล่อลื่น แต่ก็ยังมีปลายยอดแหลมอยู่ด้วย ทำให้เกิดการไถครูดไปบนผิวถ้วยได้ง่าย สำหรับแม่พิมพ์ผิวขัดมัน (รูปที่ 6 (ค)) เกิดรอยขีดข่วน และการฉีกขาดบนถ้วย พื้นผิวนี้มีความราบเรียบสูง น้ำมันหล่อลื่นถูกกวาดออกจากผิวสัมผัสได้ง่าย ทำให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยขีดข่วน สำหรับแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคเชิงความหยาบผิวต่ำ สามารถขึ้นรูปถ้วยสำเร็จโดยได้ผิวถ้วยที่เรียบปราศจากข้อบกพร่อง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง)



รูปที่ 6 ลักษณะผิวถ้วยที่ผ่านการรีดลดความหนาผนัง (ก) ก่อนการรีดลดความหนาผนัง (ข) ใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง (ค) ใช้แม่พิมพ์ผิวขัดมัน และ (ง) ใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ

ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 7 แม่พิมพ์ผิวขัดมันมีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง 30% แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ ซึ่งปลายยอดแหลมบนพื้นผิวถูกขัดออก และมีหลุมขนาดเล็ก มีความสามารถในการรีดลดความหนาผนังที่ดีขึ้น โดยมีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังที่ 35% ผลจากการศึกษาวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Popp and Engel [12] ที่ว่า หลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวแม่พิมพ์ทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันหล่อลื่นด้วยแรงดันบนผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปทำให้น้ำมันหล่อลื่นถูกบีบตัว และถูกป้อนเข้าสู่ผิวสัมผัสของชิ้นงานและแม่พิมพ์ส่งผลให้ความสามารถในการหล่อลื่นเพิ่มขึ้นการสึกหรอของแม่พิมพ์ลดลง เมื่อเพิ่ม $r = 40\%$ พบว่า ไม่มีการสึกหรอแบบยึดติด แต่มีเพียงการฉีกขาดของผนังถ้วยเท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดถูกปรับปรุงด้วยแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ แต่ในทางตรงกันข้ามแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง ถึงแม้จะทำการขึ้นรูปที่ $r = 30\%$ ปลายยอดแหลมของผิวแม่พิมพ์ก็

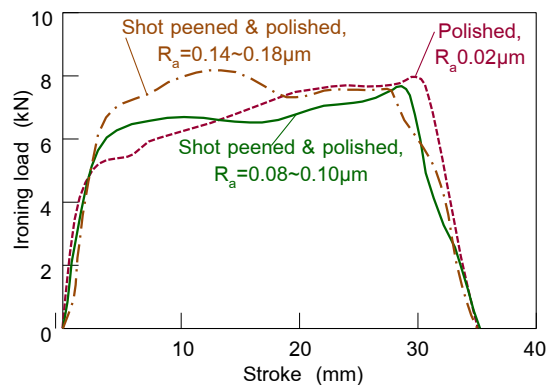
ครูดไปบนผิวถ้วยระหว่างการขึ้นรูป และเกิดการยึดติดของวัสดุถ้วยไปบนผิวแม่พิมพ์ ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังของแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูงคือ 20%



รูปที่ 7 ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังถ้วยของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบจุดที่สูงที่สุด (Maximum Ironing Load) ของเส้นโค้งโหลด - ระยะทางแต่ละเส้นสำหรับ $r = 30\%$ ในรูปที่ 8 พบว่า ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง มีค่าโหลดสูงสุดที่สุด คือ 8.3 kN รองลงมาคือ ผิวขัดมันมีค่าโหลด 8.0 kN และสุดท้ายผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ มีค่าโหลด 7.7 kN ตามลำดับ ซึ่งผลของการลดลงของค่าโหลดสามารถอธิบายโดยการศึกษาของ Bech และคณะ [18] ที่ว่า การกระจายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกกักเก็บจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวมีอิทธิพลต่อแรงในการขึ้นรูป ดังนั้นการใช้ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำที่มีหลุมขนาดเล็กซึ่งสามารถปรับปรุงการหล่อลื่นจึงส่งผลให้โหลดในการขึ้นรูปต่ำกว่าเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบอื่นๆ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 8 เส้นโค้งโหลด - ระยะทางการรีดลดความหนาแน่นสำหรับ $r = 30\%$ ของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ

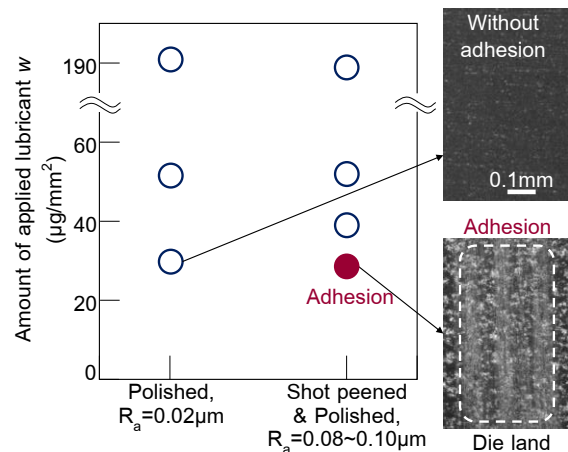
3.2. อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่น

อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 9 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะการขึ้นรูปปกติคือ $190 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ ปริมาณสารหล่อลื่นสำหรับแต่ละสภาพผิวแม่พิมพ์ถูกลดลงเรื่อยๆ สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ เมื่อมีการลดปริมาณน้ำมันหล่อลื่นลงเหลือ $30 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ เกิดการยึดติดของวัสดุด้วยไปบนผิวแม่พิมพ์ ในขณะที่ผิวขัดมันยังคงสามารถขึ้นรูปได้ปกติ การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ดี ใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เพียงพอ

4. สรุป

การยิงอนุภาคแข็งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์รีดลดความหนาแน่นได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ผิวขัดมันซึ่งพื้นผิวมีความราบเรียบสูง โดยพบว่า การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ซึ่งบนพื้นผิวมีหลุมขนาดเล็ก ประสบความสำเร็จในการรีดลดความหนาแน่นด้วยที่อัตราการรีดลดความหนาแน่นสูงโดยปราศจากการยึดติดของเนื้อด้วยไปบนผิวของแม่พิมพ์ ได้ด้วยที่ผิวเรียบปราศจากข้อบกพร่อง และใช้โหลดในการขึ้นรูปต่ำกว่าเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบอื่นๆ ความต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดถูกปรับปรุงเนื่องจากหลุมขนาดเล็กบน

ผิวขรุขระที่ถูกสร้างจากการยิงอนุภาคแข็งช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปยังผิวแม่พิมพ์และถ่วงระหว่างการขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำยังมีข้อจำกัดคือ ในการใช้งานจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ดี และใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เพียงพอ



รูปที่ 9 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์สำหรับ $r = 30\%$

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kleiner, M. Geiger and A. Klaus, "Manufacturing of lightweight components by metal forming," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 52, pp. 521–542, Jun. 2003.
- [2] P. Groche, G. Nitzsche and A. Elsen, "Adhesive wear in deep drawing of aluminum sheets," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 57, pp. 295–298, May 2008.
- [3] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid and M. Yoshida, "Environmentally benign tribo- systems for metal forming," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 59, pp. 760–780, Jul. 2010.
- [4] T. Mizuno and M. Okamoto, "Effects of lubricant viscosity at pressure and sliding

- velocity on lubricating conditions in the compression-friction test on sheet metals,” *Trans. ASME J. Lubr. Technol.*, vol. 104, pp. 53–59, Jan. 1982.
- [5] H. Kudo, M. Tsubouchi, H. Takada and K. Okamura, “An investigation into plasto-hydrodynamic lubrication with a cold sheet drawing test,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 31, pp. 175–180, Jan. 1982.
- [6] A. Azushima, M. Uda and H. Kudo, “An interpretation of the speed dependence of the coefficient of friction under the micro-PHL condition in sheet drawing,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 40, pp. 227–230, Jan. 1991.
- [7] A. Azushima, “Direct observation of contact behaviour to interpret the pressure dependence of the coefficient of friction in sheet metal forming,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 44, pp. 209–212, Jan. 1995.
- [8] K. Steinhoff, W. Rasp and O. Pawelski, “Development of deterministic- stochastic surface structures to improve the tribological conditions of sheet forming processes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 60, pp. 355–361, Jun. 1996.
- [9] M. Vermeulen and J. Scheers, “Micro-hydrodynamic effects in EBT textured steel sheet,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, pp. 1941–1951, Oct. 2001.
- [10] M. S. Nilsson, D. Olsson, I. Petrushina, J. L. Andreasen, N. Bay, E. Christensen and N. J. Bjerrum, “Strategic surface topographies for enhanced lubrication in sheet forming of stainless steel,” *Int. J. Surf. Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 68–79, Jan. 2010.
- [11] M. Geiger, U. Popp and U. Engel, “Excimer laser micro texturing of cold forging tool surfaces - influence on tool life,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 51, pp. 231–234, Jul. 2002.
- [12] U. Popp and U. Engel, “Microtexturing of cold-forging tools- influence on tool life,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, pp. 27–33, Jan. 2006.
- [13] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, “The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by ball-on-disk technique,” *R&D J. Eng. Inst. Tha.*, vol. 20, No. 4, pp. 84–91, Aug. 2009. [in Thai]
- [14] P. Chumrum, V. Premanond and K. Lawanwong, “Application of surface modification for extension tool life in blanking process,” *J. Indus. Tech.*, vol. 12, no. 1, pp. 13–27, 2016. [in Thai]
- [15] P. Basnyat, B. Luster, C. Muratore, A. A. Voevodin, R. Haasch, R. Zakeri, P. Kohli and S.M. Aouadi, “Surface texturing for adaptive solid lubrication,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 203, pp. 73–39, Oct. 2008.
- [16] A. Khantachawana. (2018, July 6). Smart orthopedic fixation - NSTDA investors’ day 2018 [in Thai] . [Online] . Available: <https://www.nstda.or.th/investorsday/2018/projects/detail/13/index.html>.
- [17] M. Aramaki, N. Yamada and O. Furukimi, “Effect of combined shot treatment and nitriding on galling property of die used for

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

high strength steels,” *ISIJ Int.*, vol. 51, pp. 1137-1141, Jul. 2011.

- [18] J. Bech, N. Bay and M. Eriksen, “Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming,” *Wear*, vol. 232, pp. 134-139, Oct. 1999.