

อิทธิพลของช่องว่างแม่พิมพ์ตัดเฉือนที่มีผลต่อผิวงานตัดเรียบของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง Effects of shearing clearance on shaved surface of high strength steel

อักรพล สนทมิโน^{1*}, สุทัศน์ ทัพย์ปรักมาศ² และ จุลศิริ ศรีงามผ่อง²

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด พุ่งครุ
กรุงเทพฯ 10140

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด พุ่งครุ
กรุงเทพฯ 10140

*E-mail : stylus_f@hotmail.com

บทคัดย่อ

กระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในการแยกโลหะแผ่นออกจากกันโดยผิวรอยตัดที่ได้ยังคงมีส่วนของรอยแตกขาดและครีบซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายในการใช้งานได้ กระบวนการตัดเรียบเป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาในข้อนี้ อย่างไรก็ตามที่ผ่านมากกระบวนการตัดเรียบได้ถูกศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเหล็กทั่วไปเท่านั้น แต่เมื่อไม่นานมานี้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้เข้ามามีบทบาทต่ออุตสาหกรรมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของช่องว่างแม่พิมพ์ในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อผิวงานตัดเรียบของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง จากผลการศึกษาพบว่าช่องว่างแม่พิมพ์ตัดเฉือนส่งผลกระทบต่อลักษณะรอยตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความฉากของรอยตัดเฉือนที่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะผิวงานตัดเรียบ โดยช่องว่างแม่พิมพ์ตัดเฉือนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อให้ยังเกิดรอยฉีกขาดบนผิวงานตัดเรียบ ดังนั้นควรเลือกใช้ช่องว่างแม่พิมพ์ในการตัดเฉือนให้เหมาะสมเพื่อคุณภาพของผิวงานตัดเรียบ

คำหลัก: กระบวนการตัดเฉือน, กระบวนการตัดเรียบ, รอยแตกขาด, เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Abstract

The shearing is a major process to separate the sheet metal. This process causes the defects of crack and burr on cut surface. The shaving process is applied to solve these defects. However, the shaving process was studied on the conventional steel. But, in recent years, the high strength steel is increasingly used in many industrial fields, especially automotive industry. Therefore, in this study, the effects of shearing clearance on shaved surface of high strength steel were investigated. The results revealed that the shearing clearance affected on the sheared surface feature, especially the squareness of sheared surface. This resulted in the material flow characteristic during shaving process, as well as resulted in the shaved surface feature. The results illustrated that the small shearing clearance resulted in the tearing formation on the shaved surface and the large shearing clearance resulted in the large crack formation on the shaved surface. Therefore, to achieve the good quality of shaved surface, the suitable shearing clearance was strongly considered

Keywords: Shearing, Shaving, Crack, High strength steel

1. บทนำ

กระบวนการตัดเฉือนถือเป็นหนึ่งในหลายกระบวนการที่ใช้ในการแยกโลหะแผ่นออกจากกันแต่ผิวรอยตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนยังมีรอยแตกขาดและครีบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายขณะปฏิบัติงานได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มขั้นตอนการทำงานเพื่อ

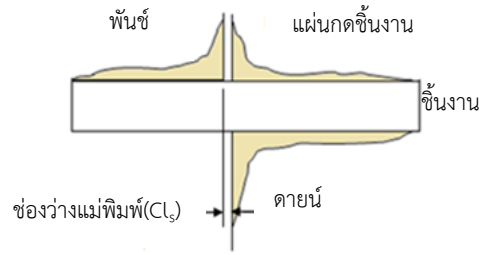
แก้ปัญหาดังกล่าว กระบวนการตัดเรียบถือเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังจากผ่านขั้นตอนการตัดเฉือนมาแล้ว [1-4] โดยชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการตัดเรียบจะมีส่วนเรียบตรงเพิ่มขึ้นและส่วนโค้งมนลดลงรวมทั้งไม่เกิดรอยแตกขาดเหมือนกระบวนการตัดเฉือน แต่กระบวนการตัดเรียบ

จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการทำงาน 1 ขั้นตอนบนแม่พิมพ์แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนการทำงานของกระบวนการการกำจัดหรือลดส่วนโค้งมนและรอยแตกขาดด้วยกระบวนการปาดผิววัสดุกระบวนการการตัดเรียบสามารถลดขั้นตอนการผลิต เวลาการผลิต และต้นทุนการผลิตได้มากกว่า ในอดีตกระบวนการตัดเรียบได้ถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงการศึกษาทดสอบกับวัสดุเหล็กกล้าทั่วไป แต่ในปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาระบบการตัดเฉือนและกระบวนการตัดเรียบกับวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง KMor และคณะได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการตัดเฉือนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานโดยการตัดเฉือนชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามการศึกษาความสัมพันธ์ของกระบวนการตัดเฉือนและกระบวนการตัดเรียบของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความเข้าใจและนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการให้ได้ผิวงานตัดที่เก็ดยเรียบตรงตลอดความหนาวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของช่องว่างแม่พิมพ์ในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อผิวงานตัดเรียบ

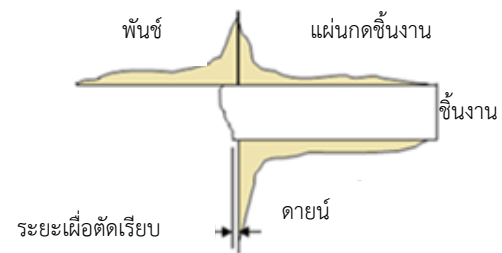
2.วิธีการทดลองและเครื่องมืออุปกรณ์

จากที่กล่าวมาผิวรอยตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้เนื่องจากลักษณะผิวรอยตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนยังมีส่วนที่เป็นรอยแตกขาดและครีบเมื่อเปรียบเทียบกับผิวรอยตัดจากกระบวนการตัดเฉือนกับกระบวนการปาดผิววัสดุ เช่น กระบวนการไส กระบวนการกลึง เป็นต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการปาดผิววัสดุสามารถผลิตชิ้นงานที่ไม่ก่อให้เกิดรอยแตกขาดที่ผิวรอยตัดเนื่องจากหลักการการทำงานของกระบวนการปาดผิววัสดุเป็นการตัดเอาเนื้อส่วนที่ไม่ต้องการออกทีละน้อยเพื่อให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างน้อยที่สุด จากหลักการที่กล่าวมาได้มีการประยุกต์นำหลักการของกระบวนการปาดผิววัสดุมาใช้ในกระบวนการตัดโลหะแผ่นเพื่อผลิตชิ้นงานที่ไม่เกิดรอยแตกขาดและครีบด้วยการเพิ่มขั้นตอนการทำงานอีกหนึ่งขั้นตอนเข้ามา หลังจากชิ้นงานผ่านการตัดด้วยขั้นตอนการตัดเฉือนแล้วนำชิ้นงานไปตัดอีกครั้งบริเวณรอยตัดเฉือนโดยทำการตัดออกเพียงเล็กน้อยซึ่งส่วนที่ถูกตัดออกไปจะถูกเรียกว่า “ระยะเผื่อตัดเรียบ” และในขั้นตอนการตัดเรียบใช้ระยะห่างระหว่างคมตัดพUNCH และคมตัดดาYIN หรือที่เรียกว่า “ช่องว่างแม่พิมพ์” ที่มีค่า

เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1 และเรียกกระบวนการตัดนี้ว่า “กระบวนการตัดเรียบ”

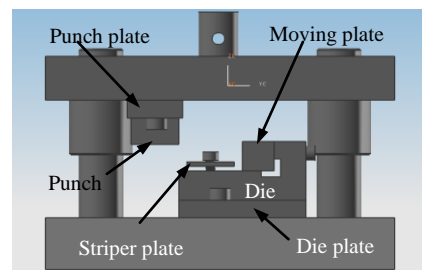


(ก) ขั้นตอนการตัดเฉือน

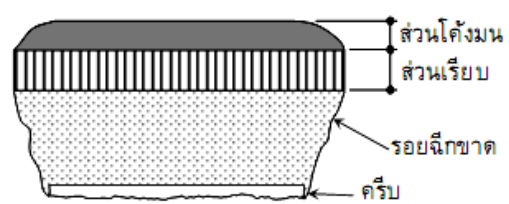


(ข) ขั้นตอนการตัดเรียบ

รูปที่ 1 หลักการกระบวนการตัดเรียบ โดยการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสองชนิด คือ SAPH 440 และ SPFH 590 ชิ้นงานมีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยจะทำการตัดเฉือนและตัดเรียบด้วยชุดแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2 กำหนดค่าช่องว่างแม่พิมพ์ (CL) ในขั้นตอนการตัดเฉือนคือ 5% 10% และ 20% ของความหนาชิ้นงาน หลังจากผ่านขั้นตอนการตัดเฉือนจะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างรอยตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 3 ต่อมาทำการตัดเรียบชิ้นงานด้วยช่องว่างแม่พิมพ์ 0% และกำหนดระยะเผื่อตัดเรียบ 0.1 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 รูปร่างรอยตัดชิ้นงานจากขั้นตอนการตัด

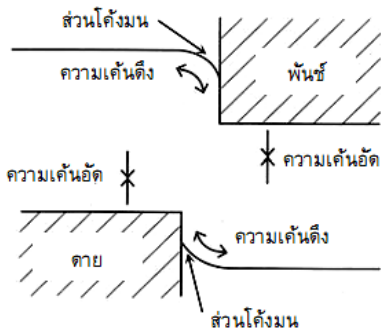
ชนิดวัสดุ	SPFH	SAPH
Tensile strength (N/mm ²)	615	460
Yield strength (N/mm ²)	481	339
Elongation (%)	26	34
Strain hardening exponent	0.15	0.14
Strength -coefficient	969.2	815

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรง

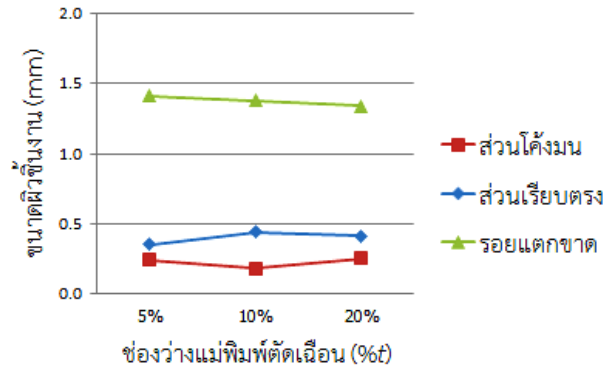
3. ผลการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการตัดเฉือน

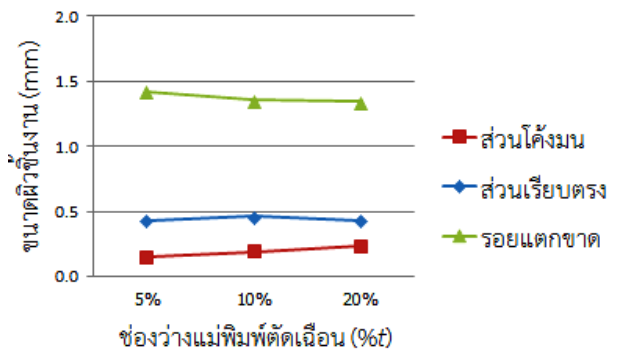
การตัดเฉือนมีกลไกการตัดโดยพันธเคลื่อนที่กดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยเกิดความเค้นอัดบริเวณคมตัดพันธและตายในขณะเดียวกันเกิดความเค้นดึงบริเวณด้านข้างของพันธทำให้เกิดลักษณะของส่วนโค้งมนดังแสดงในรูปที่ 4 ต่อมาเมื่อพันธเคลื่อนที่ต่อเนื่องลงมาทำให้เกิดความเค้นดึงเพิ่มขึ้นแต่ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุยังไม่มากพอที่จะกระทำให้วัสดุเกิดการแตกขาดทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า “ส่วนเรียบตรง” หลังจากนั้นความเค้นดึงจะเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าความแข็งแรงวัสดุส่งผลให้วัสดุเกิดการแตกขาดจากรูปที่ 5 แสดงขนาดผิวชิ้นงานส่วนต่างๆหลังผ่านขั้นตอนการตัดเฉือนของวัสดุ SAPH 440 และ SPFH 590 ที่ช่องว่างแม่พิมพ์ตัดเฉือน (CL_s) 5% 10% และ 20% ของความหนาชิ้นงาน นอกจากนี้ช่องว่างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อระยะกินลึกของรอยแตกบนรอยตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งระยะกินลึกของรอยแตกที่แตกต่างกันได้ส่งผลต่อปริมาณของเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกในขั้นตอนการตัดเรียบ ซึ่งส่งผลให้ได้ลักษณะผิวรอยตัดเรียบที่แตกต่างกัน โดยจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4 ทิศทางความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในกระบวนการตัดเฉือน

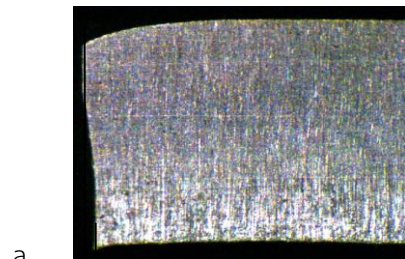


(ก) วัสดุ SAPH 440

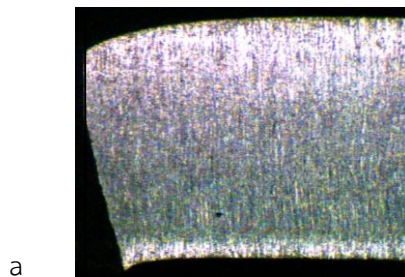


(ข) วัสดุ SPFH 590

รูปที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะผิวรอยตัดเฉือน



CL_s : 5%t (ระยะกินลึก 0.1 มิลลิเมตร)

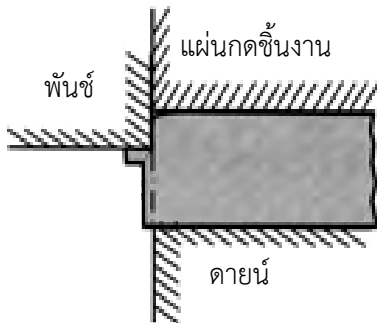


CL_s : 20%t (ระยะกินลึก 0.4 มิลลิเมตร)

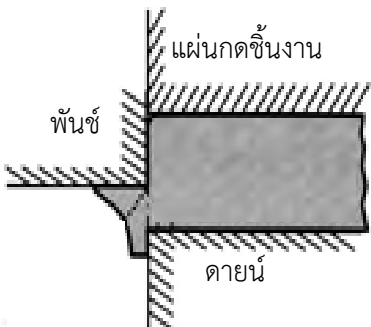
รูปที่ 6 เปรียบเทียบระยะกินลึกของรอยแตกขาด (SAPH 440) (a:ระยะกินลึกของรอยแตกบนรอยตัดเฉือน)

3.2 ขั้นตอนการตัดเรียบ

กลไกการตัดเรียบแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือช่วงการปาดผิววัสดุและช่วงการตัดเฉือนวัสดุ เริ่มการตัดโดยพันธ์เคลื่อนที่ตกลงบนชิ้นงานส่งผลให้วัสดุบริเวณที่พันธ์กดเคลื่อนที่ออกไปทางด้านนอกของฝั่งตายน์เนื่องจากระยะเมื่อตัดเรียบมีขนาดเล็กทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดเป็นส่วนเรียบตรงและไม่มีรอยแตกขาดเกิดขึ้นในขณะที่ด้านล่างของชิ้นงานไม่เกิดการตัดบริเวณคมตัดของตายน์เรียกช่วงการเคลื่อนที่ของพันธ์ในขั้นตอนการตัดเรียบช่วงนี้ว่า “ช่วงการปาดผิววัสดุ” ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) เมื่อเคลื่อนที่พันธ์กดตัดชิ้นงานต่อเนื่องลงมาทำให้ระยะห่างของพันธ์และตายน์แคบลงส่งผลให้เนื้อวัสดุบริเวณที่ถูกพันธ์กดตัดเกิดการเคลื่อนที่ลงมาตามทิศทางของพันธ์ส่งผลให้วัสดุในส่วนของระยะเมื่อตัดเรียบเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเพิ่มขึ้นและเกิดการตัดที่คมตัดของตายน์ทำให้เกิดส่วนเรียบตรงในลักษณะเดียวกับการตัดเฉือนจึงเรียกการเคลื่อนที่ของพันธ์ในช่วงนี้ว่า “ช่วงการตัดเฉือนวัสดุ” ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) จากกลไกการตัดทั้งสองช่วงที่ได้กล่าวไว้ส่งผลให้เกิดส่วนเรียบตรงตลอดทั้งความหนาชิ้นงาน



(ก) ช่วงการปาดผิววัสดุ

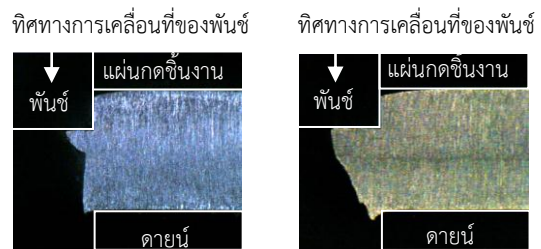


(ข) ช่วงการตัดเฉือนวัสดุ

รูปที่ 7 กลไกการตัดของกระบวนการตัดเรียบ

3.2.1 ลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออก

จากรูปที่ 8 แสดงความแตกต่างของระยะกินลึกของรอยแตกขาดที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ตัวของเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกในขั้นตอนการตัดเรียบเนื่องจากระยะกินลึกของรอยแตกส่งผลกระทบต่อปริมาณของเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกจากการกำหนดระยะเมื่อตัดเรียบถูกกำหนดจากปลายรอยแตกขาดเข้ามาในเนื้อชิ้นงาน จากเกณฑ์การกำหนดระยะเมื่อตัดเรียบที่กล่าวไว้ส่งผลให้ชิ้นงานจากการตัดเฉือนด้วยระยะช่องว่างแม่พิมพ์ 5% ของความหนาชิ้นงานมีปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกน้อยเนื่องจากมีระยะกินลึกของรอยแตกขาดน้อยส่งผลให้ขณะเริ่มการตัดโดยพันธ์กดตัดลงมาเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกเคลื่อนที่ออกทางด้านนอกของฝั่งตายน์โดยไม่เกิดการตัดที่คมตัดของตายน์ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ 20% ของความหนาชิ้นงานหลังจากกำหนดระยะเมื่อตัดเรียบให้เท่ากันพบว่าปริมาณของเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกมีปริมาณมากกว่าในกรณีแรกส่งผลให้ขณะทำการกดตัดด้วยพันธ์ เนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกได้เคลื่อนที่ลงมาตามการเคลื่อนที่ของพันธ์และเกิดการตัดที่คมตัดของตายน์ในลักษณะเดียวกับการตัดเฉือนวัสดุ สังเกตได้จากเนื้อวัสดุมีการเคลื่อนที่ไหลผ่านคมตัดตายน์



(ก) $Cl_s : 5\%t$

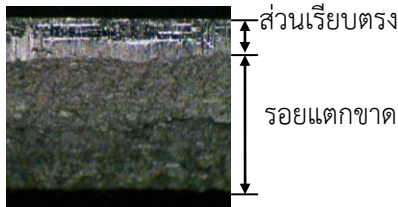
(ข) $Cl_s : 20\%t$

รูปที่ 8 เปรียบเทียบการไหลตัวของเศษ (SPFH 590) ระยะเมื่อตัดเรียบ 0.1 มิลลิเมตร

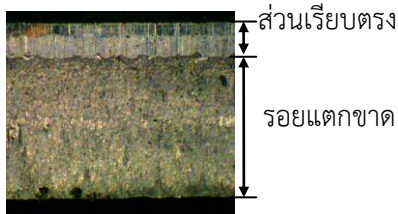
3.2.2 ลักษณะผิวรอยตัดเรียบ

จากที่กล่าวไว้ระยะกินลึกของรอยแตกขาดเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการตัดโลหะแผ่นเรียบที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะผิวรอยตัดเรียบเนื่องจากระยะกินลึกของรอยแตกขาดที่ต่างกันส่งผลให้ปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกมีขนาดต่างกัน กรณีปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกมีขนาดใหญ่ส่งผลให้กลไกการตัดเรียบมีลักษณะใกล้เคียงกับกลไกการตัดเฉือนจึงทำให้เกิดรอยแตกขาดขนาดใหญ่และได้ลักษณะผิวรอยตัดเรียบใกล้เคียงกับผิวรอยตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 9 ในทางตรงกันข้ามกรณีนี้

ปริมาณเนื้อวัสดุมีขนาดเล็กกลไกการตัดจะเป็นไปในลักษณะการปาดเอาเนื้อวัสดุออกในลักษณะเดียวกับกระบวนการไสส่งผลให้ได้ส่วนเรียบตรงบนผิวงานตัดเรียบเพิ่มขึ้นและรอยแตกขาดลดลง แต่บางกรณีการกำหนดตัวแปรในขั้นตอนการทำงานไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดรอยฉีกขาดและส่วนเรียบตรงที่สองดังแสดงในรูปที่ 10

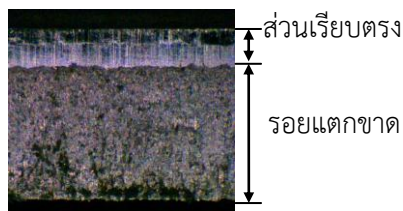


(ก) รอยตัดจากกระบวนการตัดเฉือน
(Cl_s : 20%t)

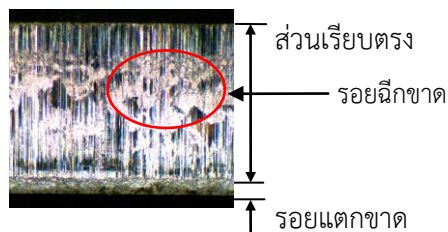


(ข) รอยตัดจากกระบวนการตัดเรียบ
(Cl_s : 20%t, ระยะเพื่อตัดเรียบ 0.1 มิลลิเมตร)

รูปที่ 9 เปรียบเทียบรอยตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนกับกระบวนการตัดเรียบ (SAPH 440)



(ก) รอยตัดจากกระบวนการตัดเฉือน
(Cl_s : 5%t)



(ข) รอยตัดจากกระบวนการตัดเรียบ
(Cl_s : 5%t, ระยะเพื่อตัดเรียบ 0.1 มิลลิเมตร)

รูปที่ 10 เปรียบเทียบรอยตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนกับกระบวนการตัดเรียบ (SPFH590)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของช่องว่างแม่พิมพ์ตัดเฉือนที่มีผลต่อผิวงานตัดเรียบของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง พบว่าช่องว่างแม่พิมพ์ในการตัดเฉือนส่งผลต่อลักษณะผิวรอยตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะกินลึกของรอยแตกขาด เมื่อขึ้นงานมีระยะกินลึกของรอยแตกขาดต่างกัน ส่งผลให้เนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกในขั้นตอนการตัดเรียบแตกต่างกันจากการกำหนดระยะเพื่อตัดเรียบโดยเมื่อเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกมีขนาดใหญ่ส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการแตกขาดอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดรอยแตกขาดขนาดใหญ่ แต่เมื่อเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกมีขนาดลดลงส่งผลให้รอยแตกมีขนาดลดลงและส่วนเรียบตรงบนผิวรอยตัดเรียบมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยระยะกินลึกของรอยแตกบนผิวตัดเฉือนยิ่งมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกปาดออกในขั้นตอนการตัดเรียบมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยชิ้นนี้ได้รับความเอื้อเฟื้อจากบุคคลต่างๆ ในการให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกภาคทวิวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เอื้อเฟื้อเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณแก่ผู้ที่ทำให้การสนับสนุนเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lange K.: Handbook forming. New York: McGraw-Hill Inc.: 1985
- [2] Schuler.: Metal forming handbook. Berlin, Heidelberg. New York: Springer-Verlag 1998.
- [3] Nobuhiro K. and Aoki T.: Press working-blanking operation, Tokyo: Nikkan Kougyou Shibun Sha; 2002 (In Japanese)
- [4] The Japan Society for Technology of Plasticity: Shearing process, Tokyo Coronasha; 1990.(In Japanese)
- [5] สุทัศน์ ทิพย์ปรกมาศ, 2554, เทคโนโลยีแม่พิมพ์ตัดความเที่ยงตรง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 77-87.