

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแบบการลากขึ้นรูปลึก เป็นการขึ้นรูปวัสดุให้ได้รูปทรงตามต้องการโดยไม่มีตำหนิ นั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากชิ้นงานอาจเกิดรอยย่น รอยขีดข่วน และนิกขาด วิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือการใช้ดรอว์บีดเป็นตัวช่วยควบคุมการไหลของเนื้อโลหะเพื่อลดรอยย่น และการนิกขาดที่เกิดขึ้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นิยามศัพท์ที่สำคัญ สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในการดึงขึ้นรูป ดรอว์บีด ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก การวิเคราะห์ความเครียด สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานขึ้นรูปลึก ซึ่งหัวข้อต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวแปรที่มีประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ [1] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีด (Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกัน เช่นรูปร่างและความสูงของดรอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอว์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงของดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบล็กโฮลเดอร์ (Blank holder) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะเกิดการนิกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่าเมื่อผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

ศิวกร อ่างทอง [2] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process ทดลองเพื่อหาจุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายในกรณีต่างๆภายใต้ข้อกำหนด เช่น ขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank size) แรงกดยึดชิ้นงาน (Blank holder force) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดและความสูงของดรอว์บีด (Draw bead) โดยทำการทดลองการขึ้นรูปผลของแรงที่ใช้ขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการกดยึด ความเสียหายสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายตามชนิดของสารหล่อลื่น ใช้ดรอว์บีดเพื่อลดการเกิดความเครียด (Strain) ในบางพื้นที่ที่จะเกิดความสมดุลของความเครียด และมีการประยุกต์เพื่อหาค่าของแผ่นตัดเปล่าโดยวิธีประมาณค่ากับรูปทรงของชิ้นงานสำเร็จในรูปทรงต่างๆ

สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ, ธนสาร อินทรกำจรชัย และวิโรจน์ ลิ่มตระกูล [4] (2004 : 79-81) แผนภาพจัดจำกับการขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการทำงานของโลหะแผ่น วิเคราะห์โดยใช้กริดทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขึ้นรูป โดยพิจารณาผลกระทบจากกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ จุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหา FLD ของโลหะแผ่นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ SPCC หนา 1 มม. เบื้องต้นศึกษาการทดลองเชิงตัวเลขหา FLD เป็นหลัก เสนอแนะผลการจำลองรูปร่างขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลองแสดงผลกระทบของขนาดขึ้นทดสอบและวิเคราะห์ความเครียดบริเวณที่เกิดแรงเสียดทาน

2.2 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.2.1 การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ในกระบวนการขึ้นรูปส่วนประกอบคือ พันช์ (Punch) ดาย (Die) และเบดล็กโฮลเดอร์ (Blank holder) การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการดึงและการกด โดยที่พันช์เคลื่อนที่กดแผ่นชิ้นงานเข้าไปในดาย เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวงกลม และความเค้นดึงในแนวรัศมีโดยมีเบดล็กโฮลเดอร์กดที่ขอบ (Flange) ของชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลของเนื้อโลหะ [6]

2.2.2 ดรอว์บีด (Draw bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในดาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูป นอกจากนั้นดรอว์บีดยังช่วยลดแรงกดของเบดล็กโฮลเดอร์ ตลอดจนเป็นตัวรีดโลหะให้มีความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [1]

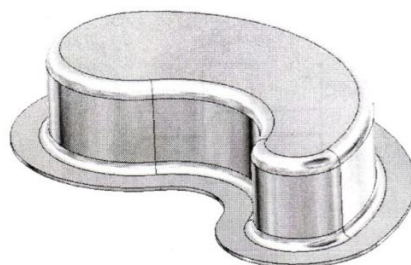
2.2.3 แรงกดของเบดล็กโฮลเดอร์ ขนาดของแรงกดของเบดล็กโฮลเดอร์ ที่พอเพียงสำหรับป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่นขึ้นได้นั้นหาได้จากการทดลอง (Trial and error) ถ้าขนาดของแรงกดไม่พอจะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะขึ้น ซึ่งรอยย่นเหล่านี้จะทำให้โลหะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ส่วนก้น (Bottom) ของชิ้นงานก็จะถูกพันช์ดันจนฉีกขาด ในขณะที่เดียวกันถ้าแรงกดของเบดล็กโฮลเดอร์มากเกินไป โลหะก็ไม่สามารถที่จะไหลตัวได้เช่นกัน ชิ้นงานก็จะถูกดันจนฉีกขาดอีก [6]

2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ

2.3.1 การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell) [2]

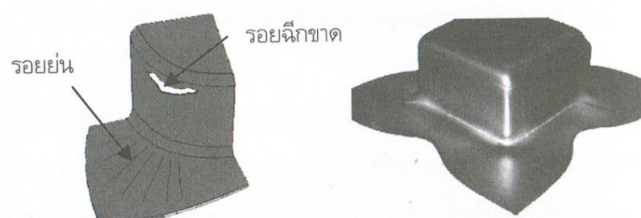
จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) ในรูปทรงต่างๆกันจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกแบบรูปทรงไม่สมมาตร ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ ที่ได้รับความเค้น (Stress) ที่แตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของ

ความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินไปจนควบคุมจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงาน เช่น การเกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร [2]

ชิ้นงานที่มีลักษณะการไหลตัวของวัสดุไม่สมมาตร เช่น รูปทรงถ้วยสี่เหลี่ยมหรือ ถ้วยวงรี ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนี้คือ เกิดรอยย่นที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันที่บริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [2]

ที่บริเวณส่วนปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีมุมโค้ง จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งตัว (Buckle) และเกิดรอยย่นได้มากที่สุด เพราะบริเวณที่เกิดความเค้นอัด (Compressive stress) ในแนวเส้นรอบวงมากและบริเวณรัศมีมุมโค้งก็เกิดความเค้นอัด (Bending stress) ด้วย ทำให้การไหลตัวช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วย จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอัดตัวบริเวณมุมโค้ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวหรือเกิดรอยย่น ดังนั้น การลากขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในบางครั้งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งที่ก้นถ้วย และรัศมีที่ปากของถ้วยสี่เหลี่ยม เพราะ

บริเวณนี้จะเกิดความเค้นดันทันสูง และความหนาของชิ้นงานบริเวณนี้ก็จะลดลงด้วย จึงทำให้เกิดการบิดขาดได้ง่าย

จากผลงานวิจัยของ K. Lange ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลากขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ไม่กลม คิดค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการลากขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่นโลหะบาง ($d_0/T > 25-40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยร้าวมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยร้าวต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($d_0/T > 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร้าวได้ยาก ทำให้สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับชิ้นงาน และวัสดุที่มีค่า r_m (Normal anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดบนของแผ่นจับชิ้นงานที่สูง และแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุมีค่า Δr (Planar anisotropy) สูงขึ้นด้วย

ดังนั้น การแก้ไขปัญหาคือการโก่งตัวหรือการเกิดรอยร้าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้รัศมีมุมโค้งของพันธ์และคายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือแก้ไขโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวที่ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาคือการเกิดรอยร้าวได้โดยการนำตัวครอว์ปิด เข้ามาใช้เพื่อช่วยกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณขอบปีกในแนวเส้นตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณของปีกตรงรัศมีมุมโค้ง

2.3.2 ปัญหาในการขึ้นรูป [8]

1) การแตก เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยืดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการขึ้นรูปลึก มากเกินขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะรับได้ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยืดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไป ถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่น โลหะแตก การเกิดรอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอการแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบลงก์ (Blanking) และการทริม (Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยืดขึ้นรูป [8]

2) การโก่งและการย่น ในการขึ้นรูปด้วยพันธักอัดบนแผ่นแบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่ง การโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน และบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพบปะกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบลงก์จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

3) การเสียรูป โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับการดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับกับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ (Springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่นแบลงก์ แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

4) โลหะหย่อน เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดงอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่นการดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสรอยนูนทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกันดังนั้นการยืดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

5) เนื้อผิวเสีย โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบมักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยืดที่จุดคราก นั่นคือวัสดุยืดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยนรูปที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะ

เรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders line) หรือรีวคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่มอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน

2.3.3 สาเหตุของการเกิดสิ่งบกพร่องในการดัดขึ้นรูป [1] ดังภาพที่ 2.3

1) เนื้อโลหะเกิดการฉีกขาดในระหว่างการดัดขึ้นรูป

- ความหนาของแผ่นวัสดุชิ้นงานไม่ถูกต้อง
- ความแข็ง ขนาดเม็ดเกรน หรือคุณภาพของแผ่นวัสดุชิ้นงานไม่เหมาะสม ซึ่งแก้ไขได้ด้วยการอบอ่อน หรือเปลี่ยนระดับชั้นคุณภาพของแผ่นวัสดุชิ้นงานให้สูงขึ้น
- ผิวของวัสดุชิ้นงานมีสิ่งบกพร่อง เช่น รอยข่วน, สิ่งสกปรก, หรือความเครียดแฝงอยู่ในแผ่นวัสดุชิ้นงานซึ่งในขณะทำการขึ้นรูปจะทำให้เกิดการเสียหายที่บริเวณนี้เพราะเกิดความเค้นผสมอยู่
- ผิวขอบคายบริเวณรัศมี, ผิวของดรอว์ปีด และผิวของแบดล็กโฮลเดอร์ไม่เรียบพอ ซึ่งในบางครั้งต้องทำการขัดผิวให้เรียบถึงในระดับ “อย่างสูงมาก” โดยต้องไม่มีรอยขีดข่วน, รอยนูน, รอยเชื่อม หรือรอยขนแมวอยู่เลย
- รัศมีขอบคายน้อยเกินไปทำให้เกิดแรงต้านการไหลของแผ่นวัสดุชิ้นงาน สูงจนทำให้เกิดผนังบางหรือฉีกขาด ซึ่งแก้ไขได้โดยการเพิ่มรัศมีขอบคายให้สูงขึ้น หรือเปลี่ยนรูปร่างของช่องทางเข้าคายจากรัศมีโค้งให้เป็นมุมเอียง หรือเป็นวงรีแทน
- ช่องว่าง หรือเคลือบแรนซ์ระหว่างพันทับคายนามากเกินไป, น้อยเกินไป หรือไม่สม่ำเสมอ
- แรงกดแบดล็กโฮลเดอร์มากเกินไป
- ใช้อัตราส่วนการดัดสูงเกินไป
- รัศมีขอบพันทันน้อยเกินไป
- การหล่อลื่นไม่ดีพอหรือไม่เหมาะสม

2) เกิดรอยย่นหรือรอยจีบที่ปีกของชิ้นงาน

- แรงกดแบดล็กโฮลเดอร์น้อยเกินไป
- รัศมีขอบพันทันและคายนามากเกินไป
- รัศมีขอบพันทันมากเกินไปชิ้นงานที่มีก้นเป็นรูปโดมครึ่งวงกลมมักจะเกิดปัญหานี้บ่อยๆ เพราะเหลือเนื้อโลหะอยู่ระหว่างรัศมีการดัดเป็นจำนวนมาก

3) ขอบหรือปีกของชิ้นงานมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

- รอยดิ่งหรือรอยยักที่เกิดขึ้นบนขอบของชิ้นงานเป็นผลมาจากค่าความเป็นแอนไอโซทรอปีของแผ่นวัสดุที่มีค่าต่างกันมาก
- แผ่นวัสดุที่นำมาดัดขึ้นรูปมีรอยแห้วหรือรอยเสี้ยนอยู่ที่ขอบ
- พันซ์และคายไม่อยู่ร่วมศูนย์หรือวางแผ่นวัสดุไม่อยู่ในตำแหน่ง
- มีสิ่งสกปรก, ฝุ่นผง, รอยขีดข่วนหรือ มีความเครียดแฝงอยู่บนพื้นผิวของแผ่นวัสดุ
- แรงกดแบบลงกัโฮลเดอร์ไม่สมดุลทำให้การไหลของแผ่นวัสดุไม่สม่ำเสมอ

4) เกิดรอยย่นหรือรอยจีบที่ขอบ

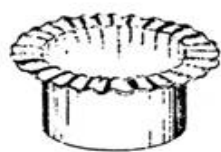
- ความหนาของแผ่นวัสดุไม่ตรงตามที่กำหนดหรือไม่อยู่ในช่วงพักความเค้น
- รัศมีการดิ่งมากเกินไป
- เคลียแรนซ์ (Clearance) ระหว่างพันซ์กับคายนมากเกินไป

5) เกิดผนังบางที่บริเวณใกล้ๆ กับก้นของชิ้นงาน

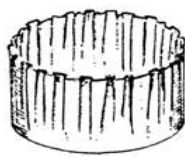
- ระดับคุณภาพของแผ่นวัสดุไม่เหมาะสม
- รัศมีการขอบคายนเกินไปทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผนังของชิ้นงานสูงมากจึงเกิดเป็นการดิ่งยึดแทน
- ใช้ค่าอัตราส่วนการดิ่งสูงมากเกินไป
- ใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสม หรือไม่พอเพียง

6) เกิดการฉีกขาดที่ก้นชิ้นงาน

- มีสิ่งสกปรกหรือจุดบกพร่องอยู่บนผิวแผ่นวัสดุ
- ผิวของรัศมีการขอบคายนและแบบลงกัโฮลเดอร์ไม่เรียบ, มีรอยขีดข่วนทำให้เกิดแรงด้านการไหลของแผ่นวัสดุที่จะเข้าไปในคายน
- รัศมีการขอบพันซ์และคายนน้อยเกินไปทำให้แผ่นวัสดุไหลได้ยาก
- ใช้สารหล่อลื่นไม่เหมาะสม หรือไม่เพียงพอ



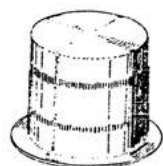
รอย่นที่ปีกถ้วย



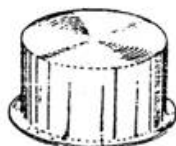
รอย่นที่พนักถ้วย



รอยรี้ว



วงแหวนเป็นชั้นตอน



รอยคำหนีจากการลากขึ้นรูป



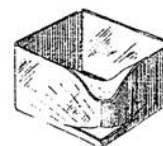
ผิวเปลือกส้ม



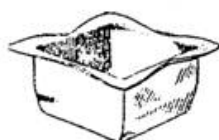
รอยขีดข่วน



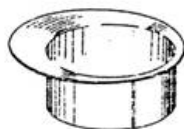
รอยแตกที่ขอบและที่ก้นถ้วย



รอยแตกที่มุม



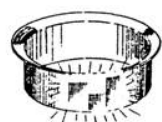
การเป็นคลื่น



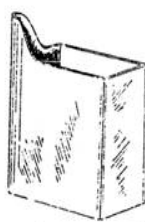
การผิดรูป



การเป็นคลื่นในทิศทางการลากขึ้นรูป



รอยขีดมันเงา



ส่วนเกินของโลหะเกิดขึ้น

ภาพที่ 2.3 สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดึงขึ้นรูป [1]

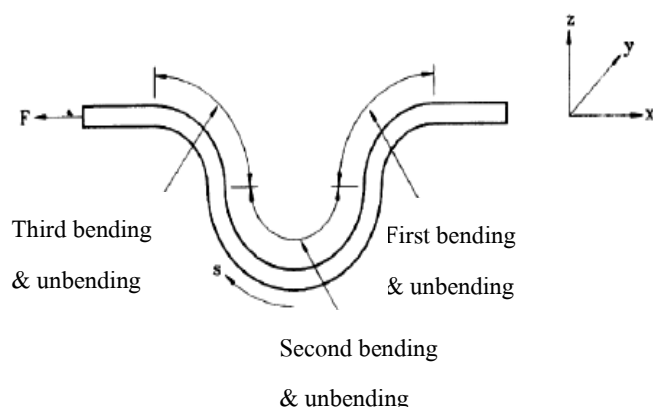
จะเห็นว่าปัญหาหลักๆ ในการดึงขึ้นรูปที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน คือการเกิดรอยย่น และการเกิดรอยจีบบนปีกของชิ้นงานอันเนื่องมาจากแรงกดแบบลงก์ไฮดรอล์น้อยเกินไปหรือเกิดการฉีกขาดอันเนื่องมาจากแรงกดแบบลงก์ไฮดรอล์มากเกินไปซึ่งเป็นการยากที่จะปรับให้เหมาะสม อีกทั้งยังต้องทำการปรับผิวของแบบลงก์ไฮดรอล์กับคายให้ขนานกัน ให้มากที่สุดด้วยเพื่อให้แรงกดกระจายทั่วทั้งพื้นที่ทำให้ชุดแม่พิมพ์มีราคาแพง รวมทั้งยังเกิดการสึกหล่อสูงด้วย ดังนั้นจึงมีการคิดค้นดรอว์บีดขึ้นเพื่อใช้สร้างแรงด้านการดึงขึ้นรูป มาติดตั้งไว้ในชุดแม่พิมพ์ดรอว์บีดเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก ทำให้สามารถ ลดราคาแม่พิมพ์ลงได้มาก แล้วดรอว์บีดยังช่วยลดแรงกดแบบลงก์ไฮดรอล์ลงได้อีกด้วย หน้าที่ของดรอว์บีดคือ ช่วยควบคุมการไหลของแผ่นวัสดุและช่วยสร้างแรงด้านการดึงขึ้นรูปในแผ่นวัสดุที่กำลังจะไหลเข้าช่องเปิดคาย

2.3.4 ดรอว์บีด (Draw bead)

การควบคุมปริมาณวัสดุที่ถูกดึงเข้าไปในคายเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น หรือรอยย่นน้อยที่สุด ทำได้โดยใช้ดรอว์บีด ทำหน้าที่จำกัดการเคลื่อนที่ของวัสดุที่จะเข้าไปในคาย ขณะที่วัสดุไหลผ่าน [10]

ดรอว์บีด จะมีการตัดครั้งแรกในทิศทางหนึ่ง จากนั้นจึงตัดในทิศทางตรงกันข้าม แล้วตัดอีกครั้งหนึ่งในทิศทางแรก สุดท้ายจึงตัดตรง

แรงด้านมีสองแรงคือ แรงแรกเกิดจากงานที่ใช้ตัดและตัดกลับของแผ่นวัสดุขณะไหลผ่านดรอว์บีด และแรงที่สองเกิดจากความเสียดทาน การประเินแรงต่อความยาว ที่เกิดจากการตัดและตัดกลับอย่างหยาบๆสามารถทำได้พิจารณาจากความเป็นจริงว่า ขณะที่แผ่นวัสดุไหลผ่านดรอว์บีด จะเกิดการตัดสามครั้ง และตัดกลับสามครั้ง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการตัดของดรอว์บีด [10]

สำหรับการดัดหนึ่งครั้ง งานต่อความยาวของดรอว์บีด และต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ของแผ่นวัสดุสามารถประเมินได้โดยใช้สมมติฐานต่อไปนี้คือ ไม่มีการทำให้แข็งด้วยความเครียด ไม่มีแกนยืดหยุ่น (Elastic core) และระนาบสะเทินยังคงอยู่ที่ระนาบศูนย์กลาง และไม่มีความแตกต่างระหว่างความเครียดกับความเครียดวิศวกรรม ($\epsilon = e$) ในกรณีนี้ งานต่อปริมาตรในเอลิเมนต์ที่เคลื่อนที่เป็นระยะ Z จากจุดศูนย์กลางคือ $Y(z/r)$ เมื่อ Y คือความต้านการคราก และ r คือรัศมีของดรอว์บีดอินทิเกรตเอลิเมนต์ทั้งหมดระหว่างศูนย์กลาง ($z=0$) ถึงที่ผิว ($z = t/2$) ได้งานต่อความยาวของการดัด

$$\frac{dW}{dL} = 2 \int \frac{Y}{r} z dz = \frac{Yt^2}{4r} \quad (2.1)$$

แรงที่เหลือจากการดัดสามครั้งและดัดกลับสามครั้ง รวมเป็นหกครั้งคือ

$$F_b = \frac{6dW}{dL} = \frac{1.5Yt^2}{r} \quad (2.2)$$

การคำนวณที่ผ่านมานี้ไม่คิดผลของเบาะชิงเจอร์ การหาค่าของแรง F_b ที่แม่นยำมากขึ้นสามารถทำได้โดยการทดลองวัดแรงที่ต้องใช้ดึงแผ่นวัสดุผ่านฟิกเจอร์ (Fixture) ที่มีกระบอกหมุนได้อย่างอิสระ เลียนแบบดรอว์บีดที่ไม่มีความเสียดทาน แรงจากความเสียดทานที่มีส่วนสนับสนุนดรอว์บีดเป็นสัดส่วนกับแรงแบล็กโฮลเดอร์ (Blank Holder Force; F_h) ซึ่ง $F_f = \mu F_h$ แรงต้านรวมหาได้จากผลรวมของแรงทั้งสองคือ $F = F_b + F_f$

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบสองจังหวะ (Double-action) จังหวะแรกแบล็กโฮลเดอร์เคลื่อนที่ลงมากดแผ่นขึ้นงานรอบๆ ดาย ในจังหวะที่สองพันธ์เคลื่อนที่ขึ้นรูปขึ้นงาน กดเข้าไปในดาย มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องควบคุมอัตราการไหลของเนื้อโลหะเข้าสู่ดาย [3]

Nine ค้นพบว่าทิศทางของแรงเสียดทานจะตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Coulomb friction) เกิดขึ้นสำหรับโลหะมากที่สุด แต่ไม่เกิดกับโลหะบางชนิดเช่น AI 2036-T4 เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปบริเวณดรอว์บีด Wang เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงที่ดรอว์บีดสำหรับการคำนวณแรง ที่แผ่นขึ้นงานที่ผ่านดรอว์บีดโดยมีหน้าตัดคงที่ Triantafy เสนอการวิจัยแบบจำลองและประยุกต์เทคนิควิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปของโลหะแผ่นบริเวณดรอว์บีด

Levy ได้เสนอสมการของแรงหน่วงเหนี่ยว (Draw Bead Restraining Force; DBRF) แสดงสมการได้ดังนี้

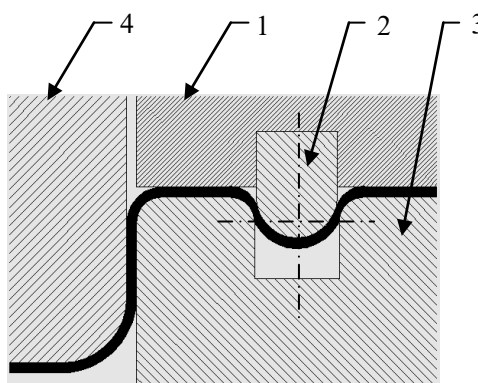
$$DBRF = a_0 + a_1x_1 + a_2\mu x_1 \quad (2.3)$$

เมื่อให้ a_i คือ สามารถกำหนดได้จากผลการทดลอง μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย และ x_1 คือ แสดงได้โดย การเท่ากันของงาน ที่ดึงแผ่นชิ้นงาน ผ่านครอว์บีด สมบัติของวัสดุ ชิ้นงาน โดยสมการความเครียดแข็ง (Holloman hardening) กับค่าอัตราเครียดของวัสดุ (Strain-rate)

1) การออกแบบครอว์บีด [1]

แสดงการใช้ครอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปขึ้นส่วนรถยนต์เมื่อเริ่มทำงาน แบลงก์โฮลเดอร์ (1) ที่มีครอว์บีด (2) ยึดติดอยู่จะเลื่อนลงมากดแผ่นวัสดุชิ้นงานทำให้แผ่นวัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปไปตามรูปพรรณของครอว์บีดหลังจากที่ แบลงก์โฮลเดอร์ประกบสนิทเข้ากับคาย (3) แล้วพUNCH (4) ก็จะเลื่อนลงมา เพื่อกดขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป ดังภาพที่ 2.5

ความเร็วของการไหลของโลหะแผ่นที่อยู่ระหว่างผิวของแบลงก์โฮลเดอร์และคาย ขึ้นอยู่กับความลึกในการดึงขึ้นรูป ซึ่งสามารถปรับได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างครอว์บีด กับร่องและรัศมีของร่อง [5]

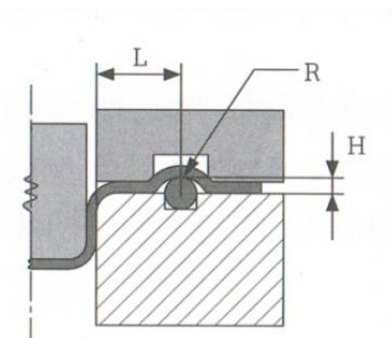


ภาพที่ 2.5 ลักษณะของครอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป [5]

2) ชนิดของครอว์บีด

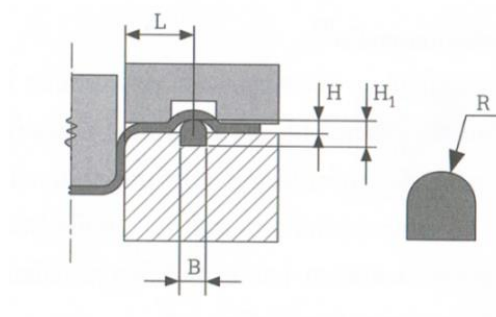
ครอว์บีดแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ตามรูปร่างหน้าตัดของครอว์บีดดังนี้

- ครอว์บีดแบบหน้าตัดกลม (Round draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบ คือ รัศมีของครอว์บีด (R) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีดประเภทนี้นิยมใช้งานวิจัยเพื่อช่วยลดความเสียหาย และร่องรอยที่เกิดจากครอว์บีดบนแผ่นโลหะมีน้อย แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริง ดังภาพที่ 2.6



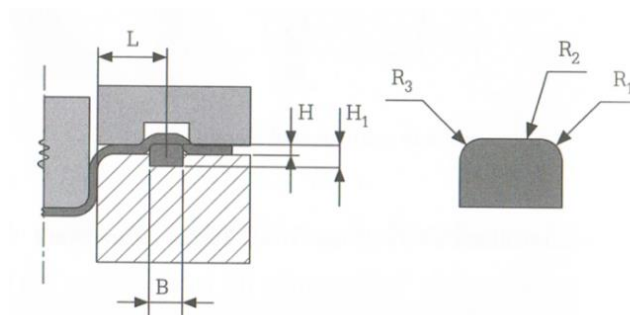
ภาพที่ 2.6 ครอว์บีดแบบหน้าตัดกลม [5]

- ครอว์บีดแบบหน้าตัดครึ่งกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมีของครอว์บีด (R) ความกว้าง ($B = 2R$) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) ความสูงของครอว์บีด (H_1) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีดประเภทนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริง ดังภาพที่ 2.7



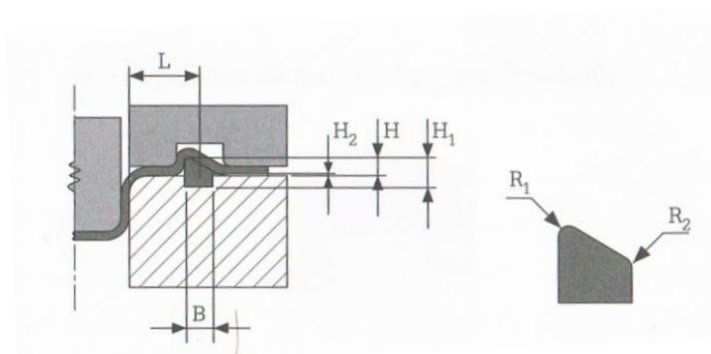
ภาพที่ 2.7 ครอว์บีดแบบหน้าครึ่งตัดกลม [5]

- ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3) ความกว้าง (B) ความสูง (H_1, H_2) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.8



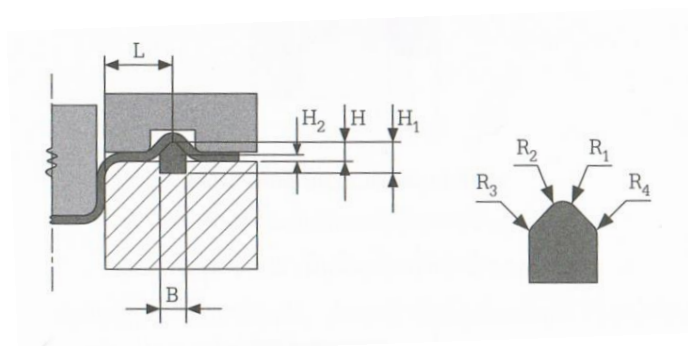
ภาพที่ 2.8 ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [5]

- ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Trapeziform draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากตาย (L) ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ครอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [5]

- ครอว์บีดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-shaped draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3, R_4) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากตาย (L) ครอว์บีดแบบหน้าตัดรูปตัววี ดังภาพที่ 2.10

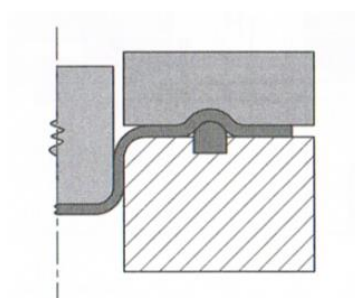


ภาพที่ 2.10 ครอว์ปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี [5]

3) ร่องปิด

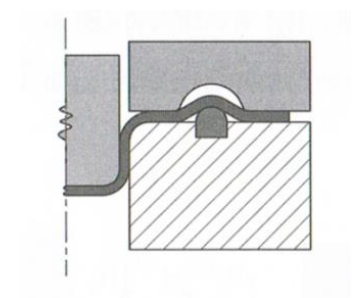
ส่วนของร่องปิด (Grooves) สามารถแบ่งตามรูปร่างหน้าตัดได้ 5 แบบเช่นกันคือ

- ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอว์ปิด ดังภาพที่ 2.11



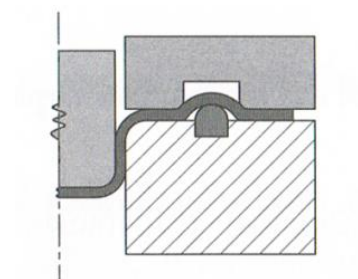
ภาพที่ 2.11 ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอว์ปิด [5]

- ร่องปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ดังภาพที่ 2.12



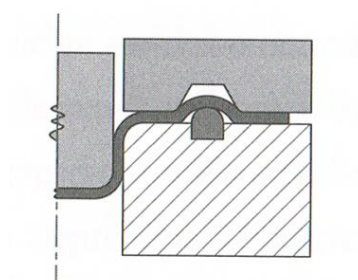
ภาพที่ 2.12 ร่องปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม [5]

- ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.13



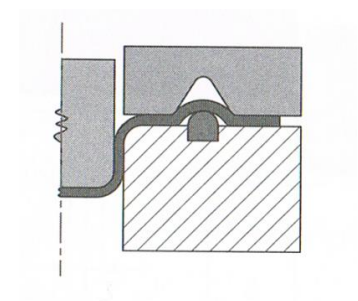
ภาพที่ 2.13 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [5]

- ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู [5]

- ร่องปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.15

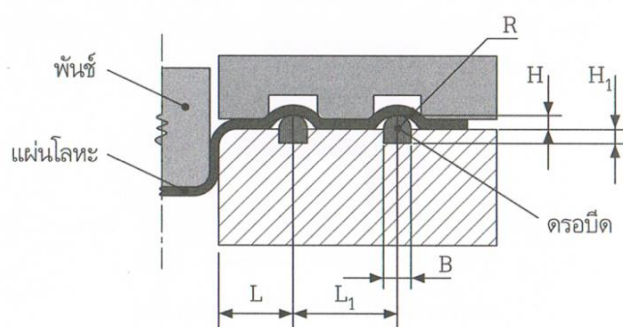


ภาพที่ 2.15 ร่องปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม [5]

รื่องปิดที่นิยมใช้มากที่สุดคือ แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งหน้าตัดของรื่องปิดอาจเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งตามความยาวของแฉกได้

4) ตำแหน่งในการติดตั้งตัวครอว์ปิด [6]

สามารถติดตั้งตัวครอว์ปิดเพื่อการใช้งานได้ 2 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งไว้บนหน้าคายหรือติดตั้งไว้บนผิวหน้าของแผ่นจับชิ้นงาน แล้วแต่รูปแบบและความเหมาะสมในการทำงาน ดังภาพที่ 2.16 โดยต้องคำนึงถึงขั้นตอนในการตัดขอบด้วย ตำแหน่งของครอว์ปิดต้องไม่เป็นอุปสรรคกับการทำงานในขั้นตอนอื่น การวางครอว์ปิดอาจใช้ 1, 2, 3 แฉก หรือ มากกว่านั้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับความลึกของงานที่ขึ้นรูป ความหนา และพื้นที่ในการไหลตัวของแผ่นโลหะ หรือความต้องการในการดำเนินการไหลตัวของแผ่นโลหะ ดังตารางที่ 2.1 จะแนะนำขนาด ระยะห่างจากขอบ และสกรูในการจับยึดครอว์ปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม โดยตัวแปรต่างๆ



ภาพที่ 2.16 ตำแหน่งและระยะของครอว์ปิด [6]

ตารางที่ 2.1 ขนาดของครอว์ปิดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด [6]

ขนาดของแม่พิมพ์	L (mm)	L ₁ (mm)	B (mm)	R (mm)	H (mm)	H ₁ (mm)	D
เล็ก-กลาง	25-32	25-30	14	7	6	5	M6
กลาง-ใหญ่	28-35	28-32	16	8	7	6	M8
ใหญ่มาก	32-38	32-38	20	10	8	7	M10

2.3.5 คุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดแผ่นกับการขึ้นรูป

1) ความสามารถในการขึ้นรูป (Limiting Draw Ratio : LDR)

ค่า LDR แสดงถึงความสามารถในการขึ้นรูป (Drawability) โดยคิดจากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุดของโลหะแผ่น ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด ที่สามารถขึ้นรูปได้โดยขึ้นงานสุดท้ายไม่เกิดความเสียหายได้จาก Swift cup test โดย

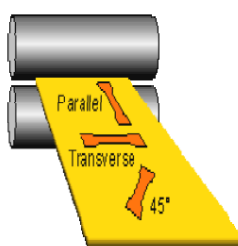
$$\text{LDR} = \frac{D}{d} \quad (2.4)$$

2) ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic strain ratio : r value)

ค่า r คิดจากอัตราส่วนของ ความเครียดในด้านกว้าง ($\ln(w/w_0)$) ต่อความเครียดในด้านหนา ($\ln(t/t_0)$) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง [12]

$$r = \frac{\ln(\frac{w}{w_0})}{\ln(\frac{t}{t_0})} \quad (2.5)$$

คิดจากอัตราส่วนของ ความเครียดในด้านกว้าง ($\ln(w/w_0)$) ต่อความเครียดในด้านหนา ($\ln(t/t_0)$) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ซึ่งค่า r แสดงถึงความต้านทานต่อการหดตัวตามความหนาของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงในทิศทางต่างของโลหะแผ่น [12]

ในเหล็กแผ่นหนึ่งๆ ค่า r ตามทิศทางต่างๆ ของเหล็กแผ่น เช่น ทิศทางตามขนานกับแนวรีด ทิศทางตั้งฉากกับแนวรีดและทิศทาง 45° กับแนวรีดจะไม่เท่ากัน แต่เหล็กที่ขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า r_m สูง r_m คิดจากค่าเฉลี่ยของ r ในทิศทางต่างๆ โดย

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.6)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{2} \quad (2.7)$$

ถ้าเหล็กแผ่นที่จะใช้ขึ้นรูปมีค่า Δr สูงจะทำให้วัสดุแปรรูปในทิศทางต่างๆ ไม่เท่ากัน เป็นผลให้ขอบของชิ้นงานหลังการแปรรูปไม่เท่ากันหรือส่วนที่เป็นครีบ (Earring) ทำให้ต้องตัด ออกมากซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อวัสดุ

3) ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent : n)

ค่า n แสดงถึงระดับของความเค้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อโลหะมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นในช่วงการแปรรูปถาวรที่สม่ำเสมอ (Uniform plastic deformation) คือยังไม่เกิดการคอด ดังนั้น โลหะแผ่นที่มีค่า n สูงจะสามารถขึ้นรูปได้ดี โดยความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแปรรูปจะช่วยยับยั้งการแปรรูปเฉพาะบริเวณ (Local deformation) ทำให้วัสดุคอดตัวและขาดที่ปริมาณการแปรรูปสูงขึ้น

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.8)$$

4) ความเร็วของอัตราความเครียด (Strain rate sensitivity : m)

ค่า m แสดงถึงระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแปรรูปของโลหะเร็วขึ้น ทำให้แรงที่ต้องใช้ในการแปรรูปที่ความเร็วต่างๆ แตกต่างกัน ที่ค่าความเครียดและอุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ ความเค้นที่ใช้ในการแปรรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดในการแปรรูปสูงขึ้นดังสมการ

$$\sigma = K\varepsilon^m |\dot{\varepsilon}, T \quad (2.9)$$

5) แรงของครอว์บีด (Draw bead force)

ในทางปฏิบัติงานปั๊ม (Stamping) โดยทั่วไป เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของขอบของแบดลงก์ไปสู่ช่องของแม่พิมพ์ ครอว์บีดมักถูกใช้ในแบดลงก์ไฮดรอลิก มันประกอบด้วยสันกึ่งทรงกระบอกในส่วนบนของ แบดลงก์ไฮดรอลิกและช่อง ซึ่งเป็นปากกลมในส่วนล่างครอว์บีดทำให้แบดลงก์อและตรง 3 ครั้งขณะที่มันผ่านแต่ละครอว์บีด

การดัดงอและการดัดซ้ำๆ ทำให้เกิดแรงเหนี่ยวรั้ง (Restraining) ประกอบกับความเสียดทานที่ผิว วิธีการหนึ่งสำหรับวัดแรงเหนี่ยวรั้ง เนื่องจากการแปรรูปไม่ขึ้นกับผล ของแรงเสียดทานใช้

2.3.6 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปลึก

1) ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die clearance) [3]

ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อความสำเร็จในการลากขึ้นรูปลึก โดยสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณระยะเพื่อ ช่องว่างของแม่พิมพ์ของวัสดุต่างๆ ได้แก่

$$U_D = S_0 + 0.07\sqrt{10xS_0} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก}$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10xS_0} \quad \text{สำหรับแผ่นอลูมิเนียม}$$

$$U_D = S_0 + 0.04\sqrt{10xS_0} \quad \text{สำหรับแผ่นโลหะอื่นๆ ที่ไม่ใช่เหล็ก}$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10xS_0} \quad \text{สำหรับโลหะผสมที่ใช้งานในอุณหภูมิสูง}$$

ข้อจำกัดสำคัญของสมการข้างต้นนี้ คือ สามารถใช้ได้เฉพาะกับการลากขึ้นรูปที่ไม่เกิดการกรดรีดโลหะ (Ironing) เท่านั้น ในการลากขึ้นรูปลึกหาก U_D มีขนาดใหญ่มากเกินไปจะมีผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดตรงตามการออกแบบ โดยอาจมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดรอยย่นขึ้น แต่หาก U_D มีขนาดเล็กมากเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาจากการลากขึ้นรูปที่ไม่เกิดการกรดรีดโลหะ ซึ่งจะส่งผลให้ขอบของชิ้นงานถูกกริดลดขนาด ทำให้ในบริเวณนั้นได้รับความเค้น และความเครียดที่สูงมาก ซึ่งอาจส่งผลให้ชิ้นงานแตกได้

2) ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป (β_{max}) มันเป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุและขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงาน d_0 และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพันธ d_1 [16]

$$(\beta_{max}) = \left[\frac{d_0}{d_1} \right]_{max} \quad (2.10)$$

ค่านี้เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดคืออัตราส่วนความหนาของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นงานที่มีความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางพันธ d_p/s_0 ค่าโดยปกติ ค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด จะสูงขึ้นถ้าค่าความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางของพันธ d_p/s_0 มีค่าต่ำลง ดังนั้นการปฏิบัติงานในระบบของการหล่อขึ้นรูปในการ

ดึงขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนขึ้นรูปสูงสุดด้วย ดังนั้นค่าความเสียดทานที่คานและแผ่นจับยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่พันธ มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูปสูงสุด [3]

วัสดุ	ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูปจำกัด (β_{max})
เหล็กแผ่น ขึ้นอยู่กับคุณภาพ	1.8-2.2
อะลูมิเนียม ทองแดง โลหะผสมอะลูมิเนียม ทองแดงและแมกนีเซียม	2.1
ทองเหลือง ขึ้นอยู่กับคุณภาพ	1.7-2.2

สำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เป็นชิ้นงานที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม จะต้องเว้นระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ในบริเวณมุมให้มากกว่าที่ด้านข้างผนัง เพราะการไหลตัวของเนื้อโลหะจะอยู่ในวงจำกัด

3) แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก (Punch force)

แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพันธ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป สำหรับการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก แรงขึ้นรูปสูงสุดหาได้จากสมการ 2.11 และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงที่ไม่สมมาตรดังสมการที่ 2.12

$$F_{d,max} = \pi \times d_m \times S_0 \times \left[1.1 \frac{1.3xS_u}{\eta_{def}} \left[\ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.11)$$

$$F_d = \frac{S_y + S_u}{2} \times L_t \times S_0 \quad (2.12)$$

2.3.7 แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder pressure)

แรงนี้จะกระทำบริเวณขอบของแผ่นโลหะในขณะที่ทำการลากขึ้นรูปลึก โดยกระทำในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมี เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของเนื้อโลหะไม่ให้เกิดการไหลตัวมากเกินไป เนื่องจากการไหลตัวของเนื้อโลหะที่มากเกินไปจะมีผลต่อการเกิดรอยย่นในบริเวณขอบของชิ้นงาน [3]

แรงคันทันนี้จะกระทำผ่านตัวล็อกชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (Hold down ring) แรงกดนี้จะสัมพันธ์กับความหนา และอัตราส่วนของการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณ ได้แก่

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times S_u \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 \times d_0}{S_0} \right] \quad (2.13)$$

$$LDR = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.14)$$

2.3.8 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก

เหล็กกล้าคาร์บอน จะมีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักในเหล็ก โดยธาตุอื่นๆนอกจากนี้จะไม่เจาะจงผสมลงไป ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนนี้อาจจะแบ่งตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ได้อีก 3 ประเภท คือ [8]

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่น้อยไม่เกิน 0.2% มีลักษณะอ่อนและมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้สามารถรีดตีเป็นแผ่นได้ง่าย ปรกติแล้วเหล็กเส้นที่ใช้ในงานก่อสร้างหรือเหล็กแผ่นที่ใช้ในงานวิศวกรรมทั่วไปนั้น เป็นเหล็กประเภทนี้

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่วไป สามารถอบชุบแข็งได้

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีปริมาณของคาร์บอนตั้งแต่ 0.5% ขึ้นไป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง สามารถใช้กระบวนการทางความร้อนเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ ส่วนมากจะใช้งานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างดี

สำหรับแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เป็นโลหะที่ใช้มากในงานปั๊มขึ้นรูป ทั้งนี้เพราะมีผิวเรียบและละเอียด ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีความสวยงาม การที่เรียกว่าแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นนั้น เนื่องมาจากได้ผ่านกระบวนการรีดเย็นมา ซึ่งการรีดเย็นนั้นก็คือการรีดที่อุณหภูมิต่ำกว่า

อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS G3141 ได้แบ่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นเพื่อใช้งานขึ้นรูป ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจัดแบ่งประเภท และส่วนผสมทางเคมี [8]

ชั้น	สัญลักษณ์	ลักษณะการใช้งาน	ส่วนผสมทางเคมี (%)				
			C	Si	Mn	P	S
1	SPCC	ใช้งานทั่วไป	0.12 Max.	-	0.50 Max.	0.040 Max.	0.045 Max.
2	SPCD	ใช้งานลากขึ้นรูป ลึก (Deep drawing)	0.10 Max.	-	0.45 Max.	0.035 Max.	0.035 Max.
3	SPCE	ใช้งานลากขึ้นรูป ลึกมาก (Extra deep drawing)	0.08 Max.	-	0.40 Max.	0.030 Max.	0.030 Max.

ในสัญลักษณ์ที่แสดงในตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าตามมาตรฐาน JIS นั้น ตัวอักษรแต่ละตัวนั้นมีความหมาย ยกตัวอย่างเช่น SPCC

S หมายถึง เหล็กกล้า (Steel)

P หมายถึง แผ่น (Plate)

C หมายถึง รีดเย็น (Cold-rolled)

C หมายถึง ทั่วไป (Commercial quality)

ซึ่งแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นทั้งสามชนิด มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดเท่ากัน คือ 275 MPa และมีความหนาตามมาตรฐานอยู่ที่ 0.4 ถึง 3.2 มม. ในบางกรณีอาจจะมีตัวอักษรต่อท้าย ซึ่งมีความหมายเพิ่มเติมดังนี้

SPCCT หมายถึง SPCC ที่รับรองคุณสมบัติการดึง (Tensile test value)

SPCCN หมายถึง SPCC ที่รับรองคุณสมบัติ (Non-aging)

นอกจากนี้ ผิวของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นนี้จะสามารถแบ่งออกเป็น ชนิดผิวด้าน (Dull finish) และ ชนิดผิวมันวาว (Bright finish) และค่าความต้านทานแรงดึง การยึดตัวของโลหะแต่ละชนิดยังมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว [8]

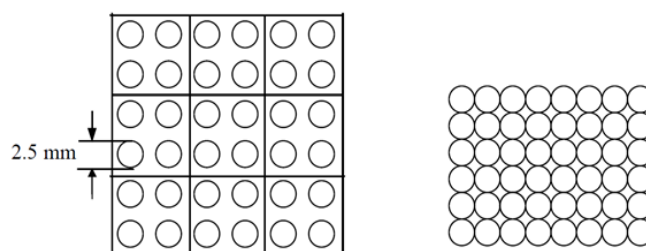
Tensile Test	Tensile Strength N/mm ²	Elongation (%)						Tensile Test Piece
Division by nominal thickness mm	0.25 and over	0.25 or over to 0.40, excl.	0.40 or over to 0.60, excl.	0.60 or over to 1.0, excl.	1.0 or over to 1.6, excl.	1.6 or over to 2.5, excl.	2.5 or over	
Symbol of class								
SPCC	(270 Min.)	(32 Min.)	(34 Min.)	(36 Min.)	(37 Min.)	(38 Min.)	(39 Min.)	No, 5 in the direction of rolling
SPCD	270 Min.	34 Min.	36 Min.	38 Min.	39 Min.	40 Min.	41 Min.	
SPCE	270 Min.	36 Min.	38 Min.	40 Min.	41 Min.	42 Min.	43 Min.	

2.3.9 การตีกริดและวิเคราะห์กริดวงกลม

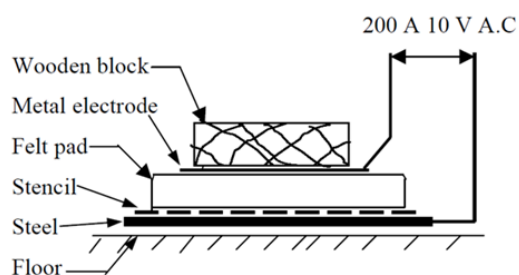
1) การตีกริดด้วยกระแสไฟฟ้า [3]

อาศัยตะแกรง (Stencil) เพื่อให้มันง่ายและใช้แรงดันของไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นรูปแบบของแผ่นขึ้นงานที่วางเปล่า ดังรูปที่ 2.18 มีผ้าขนสัตว์ (Felt pad) วางทับลูกกลิ้งหรือแผ่นทับ (Wooden block) เดินซ้ำๆ ชุ้มนับสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อยู่วางทับทางด้านบนของความว่างแผ่น ตะแกรง และขั้วไฟฟ้าใช้กับแผ่นเหล็ก (Metal electrode) สารเข้าร่วมขั้วไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกับอิเล็กโทรด สามารถปรับกระแสและแรงดันปรับจาก 15 ถึง 200 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับ ขนาดของตะแกรง และความหนาแน่นของเส้นบรรทัด หลังจากให้ทำผ้าขนสัตว์กับขั้วไฟฟ้าเดินซ้ำๆ จนสิ้นสุดแผ่นของแผ่นงาน

สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะทำให้เคลื่อนผ่านตะแกรง และเข้ามาติดต่อบนแผ่นเหล็กของชิ้นงาน การตีกริดโดยใช้กรดให้กัดกร่อน (Electrochemically) ผ่านผ้าสักหลาดที่ต้องเป็นตัวกลางผ่านสารละลายไปยังแผ่นโลหะ [2] ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.18 รูปแบบของกริดวงกลม [14]



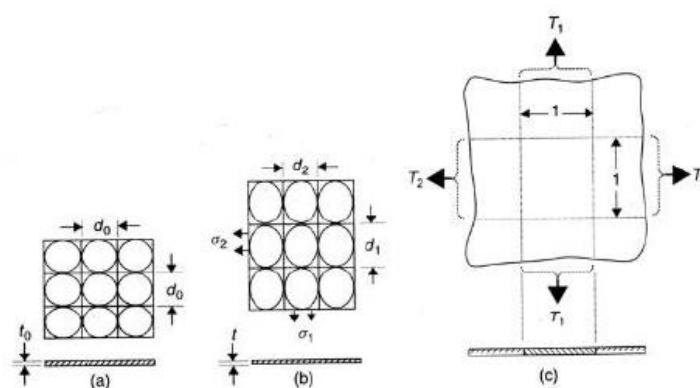
ภาพที่ 2.19 อิเล็กโทรไลต์ [2]

สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเหมาะสมของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าควรจะเป็นซึ่งถูกใช้เป็นชนิดโลหะโดยเฉพาะสารละลายเป็นค่าของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะมีส่วนผสมของสารละลายดังนี้

โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride)	: 80 กรัม
โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)	: 90 กรัม
กรดไนตริก (Nitric acid)	: 100 มล.
กรดเกลือ (Hydrochloric acid)	: 100 มล.
น้ำ (Water)	: 4.5 ลิตร

2) การวิเคราะห์กริดวงกลม (Analysis of circle grid) [3]

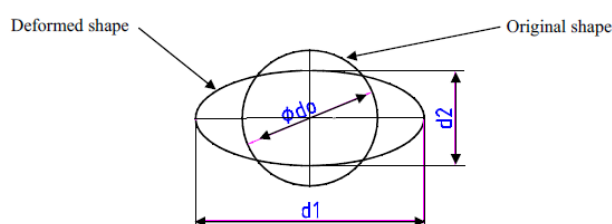
การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น ในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ d_1 แกนรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนความหนาคือ t ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด [3]

3) ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤตของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม [3]

ค่าความเครียดหลัก (Major)

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.15)$$

ค่าความเครียดรอง (Minor)

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.16)$$

ค่าความเครียดที่ความหนา (Thickness strain)

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (2.17)$$

ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (2.18)$$

2.3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นซึ่งเป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อม ๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใด ๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวแปรหนึ่งหรือไม่ ดังตารางที่ 2.5 เมื่อทำการคำนวณค่าต่างๆ ตามสูตรแล้วนำค่าที่ได้มาใส่ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ [13]

		Factor B				รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2		c		
Factor A	1	X_{111} X_{112} ... X_{11n}	X_{121} X_{122} ... X_{12n}		X_{1c1} X_{1c2} ... X_{1cn}	$T_{1.}$	$\bar{X}_{1.}$
	2	X_{211} X_{212} ... X_{21n}	X_{221} X_{222} ... X_{22n}		X_{2c1} X_{2c2} ... X_{2cn}	$T_{2.}$	$\bar{X}_{2.}$
	..			X_{ij1} X_{ij2} ... X_{ijn}		$T_{i.}$	$\bar{X}_{i.}$
	..						
	..						
	r	X_{r11} X_{r12} ... X_{r1n}			X_{rc1} X_{rc2} ... X_{rcn}	$T_{r.}$	$\bar{X}_{r.}$
รวม		$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.j}$	$T_{.c}$	T	
เฉลี่ย		$\bar{X}_{.1}$	$\bar{X}_{.2}$	$\bar{X}_{.j}$	$\bar{X}_{.c}$		$\bar{X}$

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง [11]

แหล่งความแปรผัน	df	SS	MS	F_0
Factor A	r-1	SS_A	$MS_A = SS_A / r - 1$	MS_A / MS_E
Factor B	c-1	SS_B	$MS_B = SS_B / c - 1$	MS_B / MS_E
Error	rc(n-1)	SS_E	$MS_E = SS_E / rc(n-1)$	
รวม	rcn-1	SS_t		

1) การคำนวณ SS_A , SS_B , SS_E และ SS_t

$$SS_t = \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}^2 - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.19)$$

$$SS_A = \sum_i \frac{T_{i.}^2}{cn} - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.20)$$

$$SS_B = \sum_j \frac{T_{.j}^2}{rn} - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.21)$$

$$SS_E = SS_t - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.22)$$

2) สมมติฐาน

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ (ประชากรทั้ง k กลุ่มมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน)

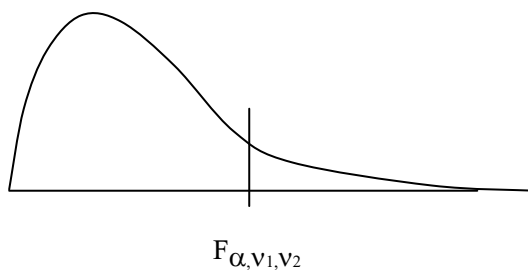
H_1 : ประชากรอย่างน้อย 1 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากัน หรืออาจเขียนเป็นดังนี้

3) สถิติที่ใช้ทดสอบ

$$F = \frac{MS_A}{MS_E} \quad ; \text{ df} = r-1, rc(n-1) \quad (2.23)$$

$$F = \frac{MS_B}{MS_E} \quad ; \text{ df} = c-1, rc(n-1) \quad (2.24)$$

4) อาณาเขตวิกฤตและการสรุปผล



ในทุกการทดสอบสมมติฐาน จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อค่า F_0 ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า F_{α, V_1, V_2} จากตาราง เมื่อ V_1 และ V_2 คือ degree of freedom ในการทดสอบนั้นๆ

2.3.11 สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานขึ้นรูปลึก

สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของของเหลว [1]

การหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปลึกไม่ใช่เป็นเพียงการลดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับผิวเครื่องมือเท่านั้น แต่ยังเป็นการลดการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการพอกตัวของเศษโลหะจากแผ่นวัสดุเกาะเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวหน้าของคานและแบลงก์โฮลเดอร์

การพอกเกาะของเศษโลหะนี้มีผลมาจาก ความหยาบผิวของคานและแบลงก์โฮลเดอร์ แรงกดดันระหว่างผิวคู่สัมผัสและการหล่อลื่น มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยขีดข่วนบนผิวงานสำเร็จซึ่งเกิดจากการพอกของเศษโลหะ เมื่อคิดเป็นตัวเงินนั้นมีค่ามหาศาลเลยทีเดียว เช่น การซ่อมเครื่องมือ การหยุดสายการผลิต เป็นต้น ซึ่งสามารถลดความเสียหายนี้ได้ด้วยการหล่อลื่นที่เหมาะสม

1) สารหล่อลื่นมีความสำคัญต่องานขึ้นรูป โดยมีหน้าที่ดังนี้

- ลดและจำกัดการสัมผัสโดยตรงระหว่างแม่พิมพ์ และโลหะแผ่นแบลงก์และยังลดการสึกหรอ (Wear) และป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนบนโลหะไหลตัว
- ควบคุมความเสียดทาน
- ทำให้การกระจายของความเครียดสม่ำเสมอและเพิ่มระดับการแปรปรวมลดความร้อน

2) การเลือกใช้สารหล่อลื่น [9]

สารหล่อลื่นจะใช้ในการลากขึ้นรูปส่วนใหญ่ มันมีตั้งแต่น้ำมันเครื่องจักรธรรมดาถึงสารประกอบเม็ดสี (Pigmented compounds) การเลือกสารหล่อลื่นขึ้นกับความสามารถในการป้องกันความเสียหาย การย่น (Wrinkling) การฉีกขาดระหว่างการขึ้นรูปลึก โดยการใช้ตามระดับความยาก-ง่าย ของการขึ้นรูปและชนิดของโลหะที่นำมาขึ้นรูป นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีกได้แก่

- ความหนืดที่เหมาะสมตลอดช่วงของอุณหภูมิและความดันที่ใช้
- ความเข้ากันได้ทางเคมี และทางกายภาพกับวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปและแม่พิมพ์
- ความง่ายต่อการใช้งาน และการขจัดออก

ไม่มีสารหล่อลื่นใดที่เหมาะสมกับทุกประเภทของงานขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปและแม่พิมพ์ ความแตกต่างในประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นจะขึ้นกับส่วนผสมของพื้นผิว ความหยาบ (Roughness) และลักษณะเนื้อของวัสดุที่ต้องการขึ้นรูปและแม่พิมพ์ และความแตกต่างของความเครียด ในแต่ละขั้นของการขึ้นรูปและอัตราการแปรรูปที่ต่างกัน เช่น การขึ้นรูปแบบการยืดขึ้นรูป (Stretching) จะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เกือบ 100% แต่ในงานเขียนแบบ อาจมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เพียงเล็กน้อย ยิ่งกว่านั้นอัตราที่วัสดุไหลเลื่อนผ่านแม่พิมพ์ยังแตกต่างกันมาก

3) สารหล่อลื่นแข็ง (Solid lubricant) [9]

ปกติชั้นของสารหล่อลื่นแข็งจะถูกแยกด้วยฟิล์มต่างๆ เช่น น้ำ ออกซิเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ มิฉะนั้นก็จะเกิดความเสียหายสูง แต่ก็สามารถแก้ไขด้วยการเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ (Additive) ลงไป

ผิวโลหะปกติเมื่อสัมผัสกันและรับน้ำหนัก จะมีบางจุดที่รับน้ำหนักนี้ เมื่อผิวสัมผัสถูกดให้แตกกันที่ผิวบางจุดจนเชื่อมติดกัน ถ้าเราเคลื่อนผิวโลหะชิ้นหนึ่งไปมา รอยเชื่อมนี้ก็จะถูกฉีกออกจากกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ และเราอาศัยแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันกับการลากพาของผิวโลหะทั้งสองช่วยพยุงน้ำหนักนี้ เป็นหลักในการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนไหวย จะช่วยป้องกันการเสียดสีระหว่างผิวโลหะจึงช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี สารหล่อลื่นแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่แกรไฟต์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และพลาสติก สารหล่อลื่นชนิดแข็งที่ใช้ในการทำงานคือโพลีเอทิลีน

โพลีเอทิลีน (Polyethylene : PE) มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว สามารถพับงอได้ดี ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใส่ผสมได้ง่ายมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกร้าวดังง่ายขึ้น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นสามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ตามต้องการ

สมบัติทั่วไป ยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดี ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี หดตัวแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสงได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส