

การประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น

Evaluation of Formability of Sheet Metals

ชาญ ถนัดงาน

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กรุงเทพฯ 10802

โทร 02-9132500, โทรสาร 02-5870029, E-Mail : chn@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

การประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น ทำได้โดยการทดสอบการดึง, การทดสอบการดัดอย่างง่าย, การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน, การทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง, การทดสอบรูปถ้วยของฟูกูอิ และการทดสอบการโก่งของโยชิเดะ เมื่อนำโลหะแผ่นหนา 1 mm ที่ทำจากวัสดุ 6 ชนิดได้แก่ เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400, เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCE, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430, อะลูมิเนียม A1200P H12 และ A1100P H14 มาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบดังกล่าวพบว่า วัสดุที่มีความสามารถในการดัด, การดรอว์ และการชเทรตซ์สูงสุดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 รองลงมาคือ เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCE ส่วนวัสดุที่มีความสามารถในการชเทรตซ์กับการดรอว์ร่วมกันสูงสุดคือเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCE จากการหาสัมพัทธ์ของวิธีการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบการดัดอย่างง่ายสามารถใช้ประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะในการดรอว์และการชเทรตซ์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ของสเปียร์แมน 0.943

Abstract

Evaluation of sheet formability can be accomplished by using tensile test, simple bending test, Olsen cupping test, high speed drawing test, Fukui conical cup test and Yoshida buckling test. After testing 1-mm thick sheet metal made from 6 different materials: structural steel SS 400, cold rolled carbon steel SPCE, stainless steel SUS 304 and SUS 430, aluminium A1200P H12 and A1100P H14, it is found that stainless steel SUS 304 has the highest ability in bending, drawing and stretching, while cold rolled carbon steel SPCE in stretch-drawing. For the correlation aspect among the testing methods, it is found

that simple bending test has correlation with drawability and stretchability tests by Spearman's rank correlation coefficient of 0.943.

1. บทนำ

งานขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมของประเทศส่วนใหญ่ในปัจจุบัน มักใช้วิธีการลองผิดลองถูก และถ่ายทอดความชำนาญเฉพาะตัวเป็นส่วนใหญ่ การเลือกวัสดุชิ้นงานให้สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมที่สุด จะต้องพิจารณาทั้งทางด้านการผลิตและการใช้งานวัสดุนั้นๆซึ่งจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมของวัสดุเป็นอย่างดี วิธีการที่เหมาะสมคือเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลตามที่ต้องการ แล้วนำมาทดสอบสภาพขึ้นรูปได้ (formability) แต่เนื่องจากวิธีการทดสอบสภาพขึ้นรูปได้ที่มีอยู่มาก เป็นการทดสอบที่มีค่าใช้จ่ายสูง และยังคงต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงสมควรศึกษาวิธีการทดสอบสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นและกำหนดวิธีการประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นในเบื้องต้น ซึ่งสามารถประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นได้อย่างถูกต้องพอสมควรโดยที่มีความประหยัดและสามารถทำได้ในโรงงานอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษา วิเคราะห์ และรวบรวมข้อมูลในการประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น พร้อมทั้งกำหนดวิธีการประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นอย่างง่าย โลหะแผ่นที่นำมาประเมินสภาพขึ้นรูปได้ประกอบด้วย เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400, เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCE, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430, อะลูมิเนียม A1200P H12 และ A1100P H14 หนา 1 mm กรรมวิธีการขึ้นรูปที่ทดสอบคือ การดัด, การดรอว์ (drawing), การชเทรตซ์ (stretching) และการชเทรตซ์กับการดรอว์ร่วมกัน โดยศึกษาวิธีการทดสอบที่ใช้ประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น ออกแบบและสร้างเครื่องมือทดสอบ ทดสอบโลหะแผ่น วิเคราะห์ผล

การทดสอบ และกำหนดวิธีการทดสอบอย่างง่าย

2. ทฤษฎี

การขึ้นรูปโลหะแผ่นคือ กรรมวิธีในการเปลี่ยนรูปทรงของแผ่นโลหะแบนราบให้เป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงตามที่ต้องการ โดยปราศจากการแตกหรือการบางเฉพาะแห่ง กรรมวิธีการขึ้นรูปอาจเป็นกรรมวิธีอย่างง่ายเช่นการดัด หรืออาจมีขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อนมาก แต่การขึ้นรูปทั้งหมดมักประกอบไปด้วยวิธีการขึ้นรูปพื้นฐานซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันหรือต่อเนื่องกันคือ การดัด, การชเทอร์ตซ์, การดรอว์ และการอัดกระแทก ดังนั้นจึงไม่มีวิธีการทดสอบวิธีใดวิธีหนึ่งที่สามารถประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของวัสดุในการขึ้นรูปทั้งหมดทุกวิธี

2.1 ปัญหาสภาพขึ้นรูปได้

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือ การแตก, การโป่ง (buckling) และการย่น (wrinkling), การเสียรูป, โลหะหย่อน (loose metal) และผิวเสีย เมื่อมีปัญหาเหล่านี้โดยอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างเกิดขึ้นบนชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานนั้นใช้ไม่ได้

คุณสมบัติของโลหะแผ่นเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะพื้นฐาน, ธาตุเจือ, กรรมวิธี, กรรมวิธีทางความร้อน, ความหนา และระดับของการแปรรูปเย็น ดังนั้น การเลือกวัสดุเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างมักต้องประเมินประนีประนอมระหว่างคุณสมบัติที่ต้องการใช้งานกับคุณสมบัติในการขึ้นรูปของวัสดุ วัสดุที่มีสภาพขึ้นรูปได้เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานทั่วไปควรมีคุณสมบัติดังนี้

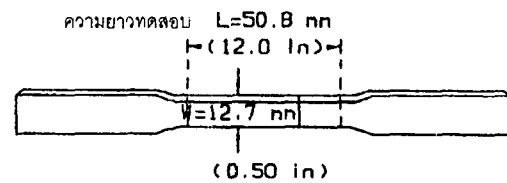
1. กระจายความเครียดได้สม่ำเสมอ
2. ทำให้มีระดับความเครียดได้มากโดยปราศจากรอยคอดหรือรอยแตก
3. รับความเค้นกดในระนาบได้มากโดยปราศจากการย่น
4. รับความเค้นเฉือนในระนาบได้มากโดยปราศจากการแตก
5. รักษารูปทรงของชิ้นงานไว้ได้หลังจากออกจากแม่พิมพ์
6. ผิวเรียบและทนต่อความเสียหายที่ผิว

2.2 การทดสอบสภาพขึ้นรูปได้

การทดสอบสภาพขึ้นรูปได้แบบพื้นฐานมีอยู่ 2 ชนิดคือ การทดสอบคุณสมบัติภายใน (intrinsic tests) ซึ่งเป็นการวัดคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับสภาพขึ้นรูปได้ของวัสดุ และการทดสอบจากการจำลอง (simulative test) ซึ่งทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปคล้ายกับการเปลี่ยนรูปจริงที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปเฉพาะอย่าง

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติภายใน

การทดสอบคุณสมบัติภายในเพื่อหาสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นที่ใช้กันกว้างขวางมากที่สุดคือ การทดสอบการดึงในแกนเดียว วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM E8 ขั้นตอนทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 1 คุณสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบคือ โมดูลัสยืดหยุ่น E , ความต้านแรงคราก R_p , ความต้านแรงดึง R_m , ความยืดสม่ำเสมอ e_u , ความยืดรวม e_T , การลดทอนพื้นที่เฉลี่ยที่กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด n , อัตราส่วนความเครียดพลาสติก r



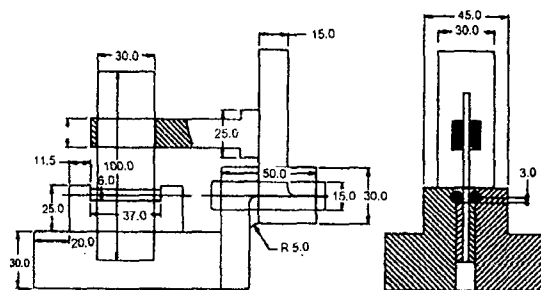
รูปที่ 1 ขั้นตอนทดสอบการดึง

2.2.2 การทดสอบจากการจำลอง

การทดสอบจากการจำลองการทำงานจริงของการขึ้นรูปหลายวิธี มีประโยชน์และตรงจุดมากกว่าการทดสอบคุณสมบัติภายใน เนื่องจากวัสดุชิ้นงานเปลี่ยนรูปใกล้เคียงกับการผลิตจริงซึ่งแบ่งออกได้ตามพื้นฐานของการขึ้นรูปได้แก่การดัด, การชเทอร์ตซ์, การดรอว์ และการชเทอร์ตซ์กับการดรอว์ร่วมกัน

2.2.2.1 การทดสอบการดัดอย่างง่าย

การทดสอบนี้ทำตามมาตรฐาน ASTM E920-92 เครื่องมือทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 2

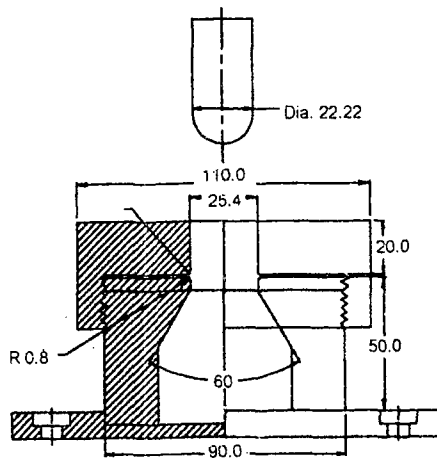


รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบการดัดอย่างง่าย

การทดสอบทำโดยการดัดชิ้นทดสอบเป็นมุม 90° แล้ววัดกลับ จนกระทั่งเกิดรอยแตกขึ้นที่ชิ้นทดสอบ จำนวนครั้งของการดัดมุม 90° จนกระทั่งแตกเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดัดของวัสดุ

2.2.2.2 การทดสอบการชเทอร์ตซ์

การทดสอบนี้เรียกว่า การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซนตามมาตรฐาน ASTM E643 เครื่องมือทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 3

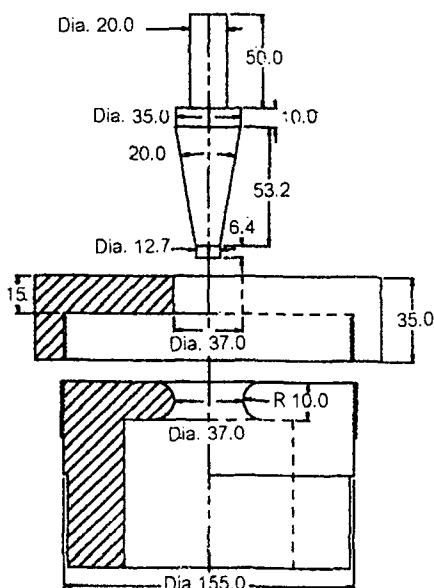


รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน

การทดสอบนี้ใช้พื้นที่ปลายบอลกดขึ้นทดสอบลงในตายจนกระทั่งขึ้นทดสอบแตก ความสูงของถ้วยที่จุดแตกเป็นเครื่องวัดสภาพขเห็ดได้ของวัสดุ

2.2.2.3 การทดสอบการดรอว์

การทดสอบนี้เรียกว่า การทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง เครื่องมือทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4



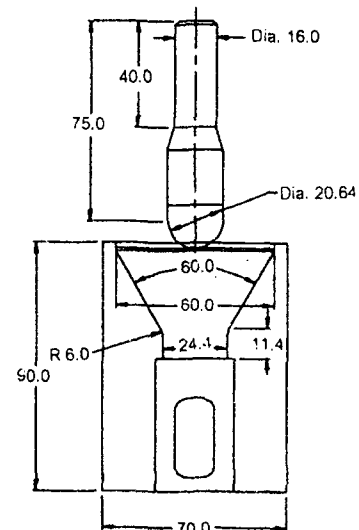
รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง

การทดสอบทำโดยจับยึดชิ้นทดสอบซึ่งมีรูเจาะที่ศูนย์กลางไว้บนตาย จากนั้นใช้พื้นที่รีเว 20° ดันผ่านรูเจาะ ทำให้รูเจาะขยายออกและขึ้นขอบโดยรอบ การทดสอบสิ้นสุดลงเมื่อขอบอิสระของรูมีรอยแตก เปอร์เซนต์การขยายรู $pct HE$ คำนวณได้จากสมการ

$$pct HE = \frac{D_f - D_o}{D_o} \times 100$$

2.2.2.4 การทดสอบการขเห็ดกับการดรอว์ร่วมกัน

การทดสอบนี้เรียกว่าการทดสอบรูปถ้วยของฟูคูอิ ทำตามมาตรฐาน JIS Z 2249 เครื่องมือทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 5

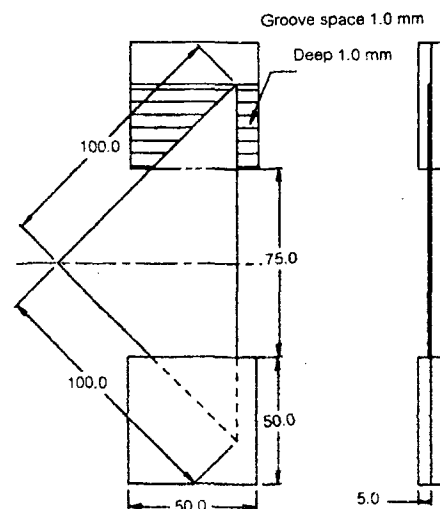


รูปที่ 5 เครื่องมือทดสอบรูปถ้วยของฟูคูอิ

การทดสอบทำโดยขึ้นรูปขึ้นทดสอบกลมในตายรูปกรวย โดยใช้พื้นที่ปลายบอลกดจนกระทั่งรูปถ้วยแตก ค่ารูปถ้วยของฟูคูอิ (Fukui conical cup value, ccv) หาได้จากการหารเส้นผ่านศูนย์กลางด้านฐานของรูปถ้วยทรงกรวยด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมของชิ้นทดสอบ

2.2.2.5 การทดสอบการโก่งของโยชิตะ

การทดสอบนี้ทำตามผลงานวิจัยเรื่อง Yoshida Buckling Test เครื่องมือทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องมือทดสอบการโก่งของโยชิตะ

การทดสอบทำโดยใช้ชิ้นทดสอบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มี

มุมเป็นมุมฉาก ดึงในแนวยาวให้ยืดออก 5% แล้ววัดความสูงของรอยโก่ง

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบการดึง

เมื่อทดสอบการดึงวัสดุทั้ง 6 ชนิด คำนวณหาค่าของ n และ r แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า n และ r ของวัสดุ						
ค่า	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P	A1100P
n	0.116	0.174	0.249	0.175	0.010	0.024
r	0.811	0.912	3.110	1.222	0.108	0.528

จากผลการทดสอบพบว่า เหล็กกล้า SS 400 มีค่า n น้อยกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่นซึ่งแสดงว่า หลังการขึ้นรูป เหล็กกล้า SS 400 เกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียดน้อยกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่น, แต่เกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียดมากกว่าอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด

ส่วนค่า r ของเหล็กกล้า SS 400 มีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่น แต่มากกว่าอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงว่าเหล็กกล้า SS 400 ลดความหนาได้ง่ายกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่นและลดความหนาได้ยากกว่าอะลูมิเนียม

3.2 ผลการทดสอบการดัดอย่างง่าย

เมื่อทดสอบการดัดอย่างง่ายวัสดุทั้ง 6 ชนิด นับจำนวนครั้งของการดัดจนกระทั่งเกิดรอยแตก แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการดัดอย่างง่าย						
	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P	A1100P
จำนวนครั้ง	14.17	15.00	18.00	13.17	10.67	13.33

หมายเหตุ: วัสดุทดสอบกว้าง 30 mm ยาว 100 mm และหนา 1 mm.

จากผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านการดัดของเหล็กกล้า SS 400 ต่ำกว่าเหล็กกล้า SPCE และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 และอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

3.3 ผลการทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน

เมื่อทดสอบรูปถ้วยของโอลเซนกับวัสดุทั้ง 6 ชนิด วัดความสูงของรูปถ้วยจากการทดสอบจนกระทั่งเกิดรอยแตก แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน

	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P	A1100P
ความสูงถ้วย	11.90	13.18	14.77	11.22	8.52	9.96

หมายเหตุ: วัสดุทดสอบหนา 1 mm.

จากผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านการขีทรีดซ์ของเหล็กกล้า SS 400 น้อยกว่าเหล็กกล้า SPCE และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขีทรีดซ์ได้มากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 และอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด เหล็กกล้า SUS 340 ขีทรีดซ์ได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

3.4 ผลการทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง

เมื่อทดสอบการดรอว์ความเร็วสูงกับวัสดุทั้ง 6 ชนิด วัดขนาดรูเมื่อมีรอยแตก แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง						
	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P	A1100P
ค่า $pct HE$	72.14	96.06	101.86	70.97	65.12	74.80

หมายเหตุ: วัสดุทดสอบหนา 1 mm.

จากผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านการดรอว์ของเหล็กกล้า SS 400 น้อยกว่าเหล็กกล้า SPCE เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และอะลูมิเนียม A1100P H14 ดรอว์ได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 และอะลูมิเนียม A1200P H12 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 340 ดรอว์ได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

3.5 ผลการทดสอบรูปถ้วยของฟูจิว

เมื่อทดสอบการขีทรีดซ์กับการดรอว์ร่วมกันกับวัสดุทั้ง 6 ชนิด วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและต่ำสุดเมื่อมีรอยแตก แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของ ccv จากผลการทดสอบ ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบรูปถ้วยของฟูจิว						
	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P	A1100P
ค่า ccv	42.29	46.11	43.22	44.00	41.28	43.87

หมายเหตุ: วัสดุทดสอบหนา 1 mm.

จากผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านการขีทรีดซ์กับการดรอว์ร่วมกันของเหล็กกล้า SS 400 น้อยกว่าเหล็กกล้า SPCE เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 และอะลูมิเนียม A1100P H14 ขีทรีดซ์กับการดรอว์ร่วมกันได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 และอะลูมิเนียม A1200P H12

เหล็กกล้า SPCE เซพรีตซ์กับดรอว์ร่วมกันดีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

3.6 ผลการทดสอบการโค้งงอของโยชิตะ

เมื่อทดสอบการโค้งงอของโยชิตะกับวัสดุทั้ง 6 ชนิด วัดความสูงรอยโค้งงอของอะลูมิเนียมเมื่อมีอัตราบิด 2% ส่วนวัสดุอื่นวัดเมื่อมีอัตราบิด 5% แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการโค้งงอของโยชิตะ

	SS 400	SPCE	SUS 304	SUS 430	A1200P H12	A1100P H14
ความสูง	1.36	1.62	1.38	2.37	2.26	1.45

หมายเหตุ: วัสดุทดสอบหนา 1 mm. อะลูมิเนียมบิด 2% วัสดุอื่นบิด 5%

จากผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านต้านทานการย่นและการโค้งงอของเหล็กกล้า SS 400 ดีกว่าเหล็กกล้า SPCE เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 และอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด เหล็กกล้า SS 400 ด้านต้านทานการย่นและการโค้งงอมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

3.7 ผลการหาค่าสหสัมพันธ์ของการทดสอบ

การหาค่าสหสัมพันธ์ของการทดสอบ ทำโดยการจับคู่ผลการทดสอบแต่ละวิธี คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันและสเปียร์แมน และการทดสอบแบบ 2 ทาง ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 7.

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการจับคู่การทดสอบ

คู่การทดสอบ	สพ. ของ เพียร์สัน	สพ. ของ สเปียร์แมน
ค่า n กับ การทดสอบการดัดอย่างง่าย	0.899	0.657
ค่า n กับ การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน	0.849	0.829
ค่า n กับ การทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง	0.743	0.600
ค่า r กับ การทดสอบการดัดอย่างง่าย	0.843	0.754
ค่า r กับ การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน	0.927	0.899
ค่า r กับ การทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง	0.723	0.696
การทดสอบการดัดอย่างง่ายกับการทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน	0.962	0.943
การทดสอบการดัดอย่างง่ายกับการทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง	0.893	0.943

4. สรุป

ผลจากการศึกษา วิเคราะห์ ทดลอง และรวบรวมข้อมูล ในการประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น 6 ชนิดได้แก่ เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400, เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCE,

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430, อะลูมิเนียม A1200P H12 และ A1100P H14 แต่ละชนิดหนา 1 mm สามารถสรุปผลได้ดังนี้.

1. เหล็กกล้ามีคุณสมบัติการทำให้แข็งด้วยความเครียดดีกว่าอะลูมิเนียม ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าอะลูมิเนียม แต่ขึ้นรูปยากกว่าอะลูมิเนียม. นอกจากนี้เหล็กยังมีคุณสมบัติเป็นแอนไอโซทรอปิกน้อยกว่าอะลูมิเนียมจึงยึดตัวได้สม่ำเสมอกว่าอะลูมิเนียม.

2. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีความสามารถในการดัดสูงสุด.

3. เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 และอะลูมิเนียม A1100P H14 มีความสามารถในการดัดใกล้เคียงกับ เหล็กกล้ารีดเย็น SPCE ดังนั้นจึงนำไปขึ้นรูปด้วยการดัดได้ดีพอกับเหล็กกล้ารีดเย็น. ส่วนอะลูมิเนียม A1200P H12 มีคุณสมบัติด้านการดัดต่ำสุด.

4. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีความสามารถในการเซพรีตซ์สูงสุด, รองลงมาคือเหล็กกล้ารีดเย็น SPCE. เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400 และ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีความสามารถในการเซพรีตซ์ใกล้เคียงกัน และมากกว่าอะลูมิเนียม A1100P H14. ส่วนอะลูมิเนียม A1200P H12 มีคุณสมบัติด้านการเซพรีตซ์ต่ำสุด.

5. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีความสามารถในการดรอว์สูงสุด, รองลงมาคือเหล็กกล้ารีดเย็น SPCE และ อะลูมิเนียม A1100P H14. เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400 และ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีความสามารถในการดรอว์ใกล้เคียงกัน. ส่วนอะลูมิเนียม A1200P H12 มีคุณสมบัติด้านการดรอว์ต่ำสุด.

6. เหล็กกล้ารีดเย็น SPCE มีความสามารถในการเซพรีตซ์กับการดรอว์ร่วมกันสูงสุด, รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430, อะลูมิเนียม A1100P H14, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ เหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400 ตามลำดับ. ส่วนอะลูมิเนียม A1200P H12 มีคุณสมบัติด้านการเซพรีตซ์กับการดรอว์ร่วมกันต่ำสุด.

7. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีแนวโน้มในการโค้งเมื่อรับแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือเหล็กกล้ารีดเย็น SPCE, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400 ตามลำดับ.

8. การทดสอบการดัดอย่างง่ายมีสหสัมพันธ์กับการทดสอบรูปถ้วยของโอลเซน และการทดสอบการดรอว์ความเร็วสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน 0.962 และ 0.893 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสเปียร์แมน 0.943 เท่ากัน. การทดสอบการดัดอย่างง่ายจึงแสดงผลถึงความสัมพันธ์กับการทดสอบรูปถ้วยของโอลเซนและการทดสอบ

การตรวจวัดความเร็วสูง. ดังนั้นวิธีการทดสอบการดัดอย่างง่ายจึงสามารถใช้ประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะในการเซพรีตซ์และการดรอว์.

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญ ถนัดงาน, “การประเมินค่าสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น”, รายงานวิจัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2528
- [2] ณัฐพล ศิริสว่าง, “การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น”, วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541
- [3] ASTM E290, Standard Method of Semi Guide Bend Test for Ductility of Metallic Metal, “1993 Annual Book of ASTM Standards Vol. 3.01 Mechanical Testing”, American Society for Testing of Material, 1993
- [4] ASTM E517-92a, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, “1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01 Mechanical Testing”, American Society for Testing of Material, 1993
- [5] ASTM E643, Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Sheet Material, “1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01 Mechanical Testing”, American Society for Testing of Material, 1993
- [6] ASTM E646-91, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials, “1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01 Mechanical Testing”, American Society for Testing of Material, 1993
- [7] JIS Z 2249, Method of Conical Cup Test, “JIS Handbook 1984 Ferrous Materials and Metallurgy”, Japanese Industrial Standard, 1984
- [8] “ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing,” American Society for Metals, 1995
- [9] H.E. Boyer, “Atlas of Stress-Strain Curves”, ASM International, Ohio, 1990
- [10] G. Ferron and M. Touati, “Determination of the Forming Limits in Planar-Isotropic and Temperature Sensitive Sheet Metals,” International Journal of Material Science, Vol. 27, no. 3, 1985, pp. 121-133
- [11] S. Fukui, K. Yoshida and S. Kobayashi, “Sheet Metal Forming Research in Japan,” Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, February 1966, pp. 101-110
- [12] A. Ghosh A, “How to Rate Stretch Formability of Sheet Steel,” Metal Progress, May 1975, pp. 52-54
- [13] J. Harvanek, “Wrinkling Limit of Tapered Pressings,” Journal Australian Institute of Metals, Vol. 20, 1975, pp. 114-119
- [14] B. Kaftanoglu, “A Method for Estimating the Limiting Drawing Ratio in Deep-drawing,” International Journal for Production Research, Vol. 12, no. 1, 1974, pp. 89-98
- [15] A. Kastelyn, “Just Another Look At Forming Limits,” Sheet Metal Industries, January 1966, pp. 44-47
- [16] A. Klein and E. Hitchler, “The Hole-Enlargement Test Determines Sheet Formability on The Line,” Metal Engineering Quarterly, August 1973, pp. 25-27
- [17] K. Poehlandt, “Materials Testing for the Metal Forming Industry,” Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [18] K. Siegert, “Grenzen des Ziehens von Karosserieteilen,” Werkstatt und Betrieb 118, 1985, pp. 709-713
- [19] K. Yoshida, “Yoshida Buckling Test,” International Symposium on New Aspects Sheet Metal Forming, Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1981