

การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ปริญญานิพนธ์
ของ
สวัสดี โสตามุข

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2550

การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ปริญญานิพนธ์
ของ
สวัสดี โสตามุข

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2550
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป สำเร็จลุล่วงลงได้นั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต บัวแก้ว และ ดร. สุวัฒน์ จีระธีรนาถ ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการและทางภาษาแก่ผู้วิจัย จนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน ในฐานะอาจารย์ที่ได้แนะนำหัวข้อในการทำวิจัย คำปรึกษาและคำแนะนำในการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมก่อนเดินทางไปต่างประเทศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ชาญ ถนัดงาน ในฐานะประธานคณะกรรมการสอบปากเปล่า และกรรมการบริหารหลักสูตร พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีวัชร วีระแก้ว ในฐานะกรรมการสอบปากเปล่า ช่วยให้งานวิจัยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒกับโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถทางวิชาการและเป็นแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่าย วัสดุ อุปกรณ์และประสานงานกับบริษัทเอกชน ขอขอบคุณพนักงานและเจ้าหน้าที่ในส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนทดสอบแรงดึงและส่วนกลึงจุลทรรศน์แบบแสง ที่ช่วยในการปรับแต่งอุปกรณ์และสอนวิธีใช้งาน ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องเพรสไฮดรอลิคนขนาด 80 ตัน

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทไทยรุ่งยูเนี่ยนคาร์จำกัด และ บริษัทสยามไอซินจำกัด จังหวัดปราจีนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้วิจัย แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานและเครื่องเพรสไฮดรอลิคนขนาด 200 และ 300 ตัน

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ น้อง ครอบครัวและเพื่อนๆทุกคนรวมทั้งในวิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง ที่เป็นกำลังใจในขณะที่ศึกษาและทำวิจัยอย่างสม่ำเสมอด้วยดีตลอดมา

สวัสดิ์ โสตามุข

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก	4
แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	22
การวิเคราะห์ปัญหาของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	28
การขึ้นรูปชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์	41
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
3 วิธีดำเนินการวิจัย	53
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	53
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	54
4 ผลการวิจัย	64
ผลการหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้วิจัย	64
ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD) ที่ได้จากการทดลอง- ขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม	66
ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง	69
ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	73
ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและ การขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	78
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	86
สรุปผล	86
อภิปรายผล	87
ข้อเสนอแนะ	88

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ- ตามมาตรฐาน JIS G 3141.....	94
ภาคผนวก ข ความผิดพลาดของการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จากการทดลอง.....	97
ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแรงดึง.....	100
ภาคผนวก ง เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปกิริตวงกลม.....	104
ภาคผนวก จ เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ-ชิ้นงาน.....	108
ภาคผนวก ฉ เครื่องมือและอุปกรณ์วัดความเครียด.....	114
ภาคผนวก ช ลักษณะกิริตวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม บนแผ่นเหล็ก SPCC.....	118
ภาคผนวก ซ ลักษณะกิริตวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม บนแผ่นเหล็ก SPCE.....	121
ภาคผนวก ฌ ลักษณะกิริตวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม บนแผ่นเหล็ก SPC270.....	124
ภาคผนวก ญ ลักษณะของชิ้นงานจริงที่ใช้ในการวิจัย.....	127
ภาคผนวก ณ วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02.....	130
ภาคผนวก น การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา	157
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย.....	161
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	164

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น.....	9
2 สมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำการวิจัย.....	64
3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141.....	94
4 สมบัติเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141.....	94
5 สมบัติเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	95

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะการขึ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน	4
2 อิทธิพลตัวแปรเสริมความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	7
3 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า n ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต.....	13
4 วิธีประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	20
5 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm.	23
6 รูปแบบทฤษฎีสำหรับคำนวณแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	25
7 อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	27
8 รูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ.....	29
9 การประมาณรูปเหมือนของโดมครึ่งทรงกลมโดยวิธีอันดับของ Conical Frustum...	37
10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในวิธีปฏิบัติทางอุตสาหกรรม.....	43
11 โครงสร้างของระบบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถ- ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	44
12 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปด้วย FLD.....	45
13 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ Hecker.....	46
14 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	55
15 ขั้นตอนทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M.....	56
16 ขนาดของแผ่นขั้นตอนการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม.....	57
17 ขั้นตอนทดสอบหลังการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม.....	60
18 กริดที่เป็นจตุรรอยคอดและรอยแตก.....	61
19 แผนภาพความเค้นจริง-ความเครียดจริง.....	65
20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC หนา 0.8 mm. ที่ได้จากการ ทดลองโดยวงกลมโปรงหมายถึงจุดที่ปลดปล่อย สีเหลืองสีเขียวหมายถึง จุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย.....	66
21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE หนา 0.8 mm. ที่ได้จากการ ทดลองโดยวงกลมโปรงหมายถึงจุดที่ปลดปล่อย สีเหลืองสีเขียวหมายถึง จุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย.....	67
22 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 หนา 1.4 mm. ที่ได้จากการ ทดลองโดยวงกลมโปรงหมายถึงจุดที่ปลดปล่อย สีเหลืองสีเขียวหมายถึง จุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย.....	68

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC กับการขึ้นรูป ชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1 (แบล็กโฮลเดอร์ = 10 kg/cm^2 , Stroke = 10 mm.)	69
24 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูป ชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1 และ Draw 2.....	70
25 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูป ถ้วยทรงกรวยโดยใช้แบล็กโฮลเดอร์แรงกดความดัน 125 kg/cm^2	71
26 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 กับ การขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกของชิ้นงาน G	72
27 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 กับ การขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกของชิ้นงาน B.....	73
28 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC ในขั้นตอน Draw 1 สีแดงเกิดรอยแตก(Cracks) สีเหลืองเข้มเกิด การบางมากเกินไป(Excess Thinning) สีเหลืองแนวโน้มนเกิดรอยแตก (Risk of Cracks) สีเขียวมีความปลอดภัย(Safe) สีเทาเกิดการยืดมาก เกินไป(Insuff. Stretching) สีน้ำเงินแนวโน้มนเกิดการย่น (Wrinkling Tendency) สีม่วงเกิดการย่น(Wrinkles)	74
29 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเหล็ก SPCE ในขั้นตอน Draw 1.....	75
30 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเหล็ก SPCE ในขั้นตอน Draw 2.....	76
31 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปถ้วยทรงกรวย.....	77
32 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ เหล็ก SPC270กับการขึ้นรูปหม้อลมเบรก.....	78
33 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC และ SPCE หนา 0.8 mm. จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	79
34 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 หนา 1.4 mm. ที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	80
35 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 1 ของเหล็ก SPCC.....	81

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดขึ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPCC.....	81
37 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 1 ของเหล็ก SPCE.....	82
38 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 2 ของเหล็ก SPCE.....	82
39 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 2 ของเหล็ก SPCE สภาพเสียหาย....	83
40 การเปรียบเทียบชิ้นงานในการขึ้นรูปด้วยทรงกรวยของเหล็ก SPCE.....	83
41 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดขึ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPCE.....	84
42 การเปรียบเทียบชิ้นงานในการขึ้นรูปหม้อลมเบรกของเหล็ก SPC270.....	84
43 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดขึ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPC270.....	85
44 ลักษณะการซ้อนทับกันของกริดวงกลมก่อนและหลังการเปลี่ยนรูป.....	97
45 เครื่องทดสอบเนกประสงค์แบบพลวัต(Universal test machine, Dynamic type) ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801.....	100
46 ชิ้นทดสอบแรงดึง(Tensile specimen)	100
47 การติดตั้งตัวสอบเทียบ.....	101
48 ตัวสอบเทียบ(Calibrater)	101
49 การติดตั้งเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์(Extensometer)	102
50 หน้าจอมอนิเตอร์แสดงการวัดความเค้น-ความเครียด.....	102
51 แผ่น Stencils ขนาด 10x12 นิ้ว.....	104
52 รูปร่างและขนาดของกริดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm.	104
53 แผ่นเบาะรองโยสึงเคราะห์.....	105
54 เครื่องแปลงไฟที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน.....	105
55 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อตีกริดวงกลม.....	106
56 ลักษณะการจัดวางแผ่น Stencils.....	106
57 ลักษณะการขึ้นรูปกริดวงกลมโดยใช้ลูกกลิ้งกด.....	107
58 แม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม.....	109
59 ขนาดของแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม.....	109
60 แม่พิมพ์ชิ้นทดสอบ(Specimen)ตามมาตรฐาน ASTM E8 M.....	110

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
61 เครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 80 ตัน.....	110
62 เครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 300 ตัน.....	111
63 แม่พิมพ์ตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1.....	111
64 แม่พิมพ์ตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 2.....	112
65 แผ่นไมล้า(Myla Tape)วัดความเครียด.....	114
66 แวนขยายและวิธีการวัด.....	114
67 กล้อง Microscope พร้อมอุปกรณ์.....	115
68 กล้อง Visualizer พร้อมอุปกรณ์.....	115
69 การวัดขนาดกริดวงรีด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing.....	116
70 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPCC โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer.....	118
71 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPCC โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer(ต่อ)	119
72 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPCE โดยการถ่ายรูปด้วย Microscope.....	121
73 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPCE โดยการถ่ายรูปด้วย Microscope(ต่อ)	122
74 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPC270 โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer.....	124
75 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบน แผ่นเหล็ก SPC270 โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer(ต่อ)	125
76 ชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน หน้า 0.8 mm.....	127
77 ชิ้นงานรูปถ้วยทรงกรวย หน้า 0.8 mm.	127
78 ชิ้นงานขึ้นรูปหม้อลมเบรกของเหล็ก SPC270 หน้า 1.4 mm.....	128
79 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จาก ASTM E 2218-02.....	131
80 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLC)สำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมคัลล์สตีล ชนิดรีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์ หน้า 0.866 mm.	132

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
81 แบบตัวอย่างสำหรับวัดความยาวทดสอบใช้ในการกำหนด เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	133
82 รูปร่างของแบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ที่เกี่ยวกับโลหะแผ่น.....	134
83 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมคัลล์สตีล ชนิดรีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์ หน้า 0.990 mm.	153
84 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมเจือชนิด 3003-0.....	154
85 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นทองเหลือง C 260.....	155

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ของ
สวัสต์ โสตามุข

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)
วันที่.....เดือน มีนาคม พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต บัวแก้ว)

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ชาญ ฤกษ์งาน)

.....กรรมการ
(ดร. สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต บัวแก้ว)

.....กรรมการ
(ดร. สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ)

.....กรรมการ
(พันโท ผศ. ดร. ทวีวัชร วีระแก้ว)

สวัสดี โสตามข. (2550). การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป. ปรินญาณิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว, ดร. สุวัฒน์ จีระเยียรนาถ.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram, FLD) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์และเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCE หนา 0.8 mm. และ SPC270 หนา 1.4 mm. ขึ้นรูปกิริตวงกลมบนแผ่นแบลงก์ทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า เปลี่ยนขอบของแผ่นแบลงก์ด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิคด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์ 100 mm. กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วัดขนาดการเปลี่ยนรูปของกิริตวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปและประยุกต์ใช้ขึ้นรูปขึ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในเปรียบเทียบกับโปรแกรม AUTOFORM 3.26

ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลองสร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 เมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน 12 % ณ ความเครียดในระนาบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปขึ้นงานจริงได้ ทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหายและความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับผลจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Sawad Sodamuk. (2007). *Formability Prediction of Automotive Parts Using Forming Limit Diagrams*. Master thesis, M.Eng.(Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:Asst. Prof. Vichit Buakaew, Dr. Suwat Jirathearanat.

The aims of this research are to experimentally determine Forming Limit Curves (FLC) of low carbon steels commonly used in Thai industry, namely SPCC and SPCE with 0.8 mm thickness, and SPC270 with 1.4 mm thickness, verify these FLCs with real part forming experiments, and compare these experimentally obtained FLCs against empirical ones available in FEA software database. Circular grids were electrochemically etched onto the surface of sheet samples with different circular cuts as a mean to measure part forming strains. Subsequently, the sheet samples were stretch-formed into a hemispherical-dome shape with a 100mm-diameter in a hydraulic press. The pressing process was stopped when a local neck or cracks were observed on the forming sample. Dimensions of the grid circles at the necked areas were accurately measured to obtain engineering major and minor strains at failure for different sample shapes. These major and minor strains measured then formed a forming limit curve for that sheet metal material. The forming limit curves determined for these sheet metals were put to test in formability evaluations of automotive inner parts forming in both real experiment and numerical simulation (Finite Element software: AUTOFORM 3.26).

The results were found that the experimental FLDs have predicted failures in forming process consistently with the real experiments. The experimentally obtained forming limit curves - FLCs (determined following ASTM E 2218-02) differ from empirical ones (from FEA software) by about 12% at the corresponding plane strain values.

การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

บทคัดย่อ
ของ
สวัสดี โสตามุข

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2550

**FORMABILITY PREDICTION OF AUTOMOTIVE PARTS
USING FORMING LIMIT DIAGRAMS.**

**ABSTRACT
BY
SAWAD SODAMUK**

**Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University**

March 2007

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์และชิ้นงานต่าง ๆ ในปริมาณมากโดยมีคุณภาพที่เหมือนกันและมีต้นทุนการผลิตต่ำเช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น แม่พิมพ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบันสามารถผลิตได้เองภายในประเทศและนำเข้าจากต่างประเทศเป็นจำนวน 8,426 ล้านบาทในปีพ.ศ. 2546(สถาบันไทยเยอรมัน. 2547 : 1-2) และมีแนวโน้มจะมากขึ้น เพราะว่าอุตสาหกรรมรถยนต์และจักรยานยนต์ย้ายฐานการผลิตเข้ามาในประเทศไทยจำนวนมาก แต่การสั่งซื้อแม่พิมพ์จากต่างประเทศมีราคาแพง มีความยุ่งยากมากกว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตในประเทศและไม่สามารถกำหนดระยะเวลาการส่งมอบที่แน่นอนได้ ผู้ผลิตก็ยังคงมีความต้องการใช้แม่พิมพ์ที่ผลิตในประเทศ ดังนั้นคุณภาพของแม่พิมพ์จึงต้องพิจารณาก่อนปัจจัยอื่นๆ

องค์ประกอบที่ทำให้แม่พิมพ์มีคุณภาพดีคือ

1. การออกแบบต้องดี ถูกต้องและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
2. วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์เหมาะสมกับการใช้งานและชนิดของวัสดุชิ้นงาน
3. กระบวนการผลิต การเลือกใช้วิธีการผลิตเพื่อควบคุมความเที่ยงตรงของงาน
4. กรรมวิธีทางความร้อน เลือกใช้ความแข็งที่เหมาะสมกับการใช้งาน
5. การนำไปใช้งาน เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตต้องเหมาะสมกับแม่พิมพ์
6. การบำรุงรักษาและการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ของแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการ

บำรุงรักษา วิธีการบำรุงรักษา การเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ๆเพื่อทดแทนของเดิม

การขึ้นรูปโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์เช่น ตัวถังรถยนต์ซึ่งมีขนาดใหญ่ การตีปดอร์ว(Deep drawing)หม้อลมเบรก มีปัญหาค่อนข้างมากเนื่องจากสาเหตุหลายประการที่ทำให้การขึ้นรูปโลหะไม่ได้ผล ประการแรกกระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ ประการต่อมาคือวัสดุชิ้นงาน เมื่อนำโลหะแผ่นมาขึ้นรูปชิ้นงานที่ออกมาไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เกิดการย่น(Wrinkling)และการคอด(Necking)เนื่องมาจากการยืดและหดตัวของโลหะแผ่น ดังนั้นก่อนการสร้างแม่พิมพ์ออกมามควรทดลองและประเมินผลจนกระทั่งแน่ใจว่าชิ้นงานมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสามารถใช้งานได้

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram,FLD) ซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนรูปของกริดวงกลมตามลักษณะของแรงที่กระทำต่าง ๆ กันจนเกิดความเสียหาย แล้วจึงนำค่าความเครียดหลัก(Major strain, ϵ_1)และความเครียดรอง(Minor strain, ϵ_2) ของชั้นทดสอบมาพล็อต(Plot)กราฟ เกิดเป็นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Curve,FLC) ที่แสดงถึงสภาพการ

ขึ้นรูปของชิ้นงาน ทำให้สามารถประเมินการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้ ดังนั้นแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำนายว่าชิ้นงานจะเกิดความเสียหายหรือไม่ สามารถขึ้นรูปได้มากน้อยแค่ไหน และปรับวิธีการขึ้นรูปอย่างไร นอกจากนั้นยังช่วยวิเคราะห์ปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อนในขณะขึ้นรูปชิ้นงานจริงหลังจากการทดลอง(Tryout)แม่พิมพ์แล้ว

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรมยังมีน้อยมากเพราะว่าไม่เห็นความจำเป็นหรือประโยชน์ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ผู้ออกแบบสร้างแม่พิมพ์ยังใช้ความสามารถและประสบการณ์ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้ลำดับขั้นตอนในการหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จึงยังไม่มีการใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแพร่หลายเหมือนกับอุตสาหกรรมในต่างประเทศ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสร้างจากการทดลองเฉพาะวัสดุนั้นๆเพียงวัสดุเดียว ถ้าวัสดุต่างชนิดกัน โครงสร้างต่างกัน ความหนา กรรมวิธีการผลิตและตัวแปรของวัสดุอื่นๆต่างกัน ทำให้พฤติกรรมของแผ่นโลหะไม่เหมือนกัน แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจึงไม่สามารถใช้วิเคราะห์แทนกันได้ แต่อาจจะเทียบเคียงวัสดุของต่างประเทศกับวัสดุที่ใช้ในประเทศที่มีพฤติกรรมของแผ่นโลหะเหมือนกันหรือชนิดเดียวกันได้ ปัจจุบันโปรแกรมวิเคราะห์มีราคาแพงมาก แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่มีอยู่ในโปรแกรมสร้างจากสมการทางคณิตศาสตร์และพารามิเตอร์ของวัสดุ ทำให้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่ตรงกับการขึ้นรูปจริงจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นทำให้นักวิจัยนี้เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02
2. ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์
3. เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิดของเหล็ก SPCC และ SPCE หน้า 0.8 mm. และ SPC270 หน้า 1.4 mm. โดยใช้แม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม (Hemispherical dome dies)
2. ขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน(Automotive inner-part) ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC และ SPCE หน้า 0.8 mm. เปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย(Conical cups) ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCE หน้า 0.8 mm. เปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ขึ้นรูปหม้อลมเบรก(Body booster) ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPC270 หน้า 1.4 mm. เปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ความสามารถในการขึ้นรูปหมายถึง สภาพการขึ้นรูปได้โดยชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย
2. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปหมายถึง เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นโดยการเปรียบเทียบความเครียดหลักและความเค้นตรงของกริดวงกลมที่มีการเปลี่ยนรูปในลักษณะต่างๆ ทำให้ทราบว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายหรือไม่

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานก่อนการสร้างแม่พิมพ์ ช่วยให้การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
2. สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง(Tryout)ชิ้นงานจริง
3. สามารถประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานอื่นที่ทำจากวัสดุ SPCC และ SPCE หน้า 0.8 mm. และ SPC270 หน้า 1.4 mm.
4. สามารถประยุกต์ในการขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามหัวข้อดังต่อไปนี้

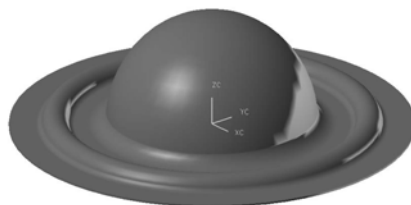
1. ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก
2. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
3. การวิเคราะห์ปัญหาของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. การขึ้นรูปชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก(Sheet Formability of Steel)

ดับเบิลยู จี แกรนโซว; แอมโค; และอินซ์ (W.G. Granzow; Armco; & Inc. 1990 : 573-580)กล่าวไว้ว่า แผ่นเหล็กเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมและเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในด้านต่างๆอีกจำนวนมากเพราะว่าเหล็กมีความแข็งแรง การต่อทำได้ง่าย หาได้ในราคาที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามไม่ใช่ปัจจัยเหล่านี้เพียงอย่างเดียว ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเป็นความสำคัญอันดับแรกๆที่ทำให้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางและยังคงไว้ซึ่งโครงสร้างที่มีสภาพสมบูรณ์ขณะมีการเปลี่ยนรูปช่วงพลาสติก แต่ไม่ใช่รูปร่างทั้งหมดที่ต้องการลักษณะการขึ้นรูปที่เหมือนกัน เหล็กมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีในการประยุกต์ใช้งานสิ่งหนึ่งก็อาจมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ไม่ดีในการประยุกต์ใช้งานอีกสิ่งหนึ่งก็ได้ ดังนั้นความสามารถในการขึ้นรูปจะต้องเหมาะสมกับการเลือกเกรดของเหล็กที่มีลักษณะการขึ้นรูปตามรูปร่างที่ต้องการ



a



b



c

ภาพประกอบ 1 ลักษณะการขึ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามลักษณะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 1

ชั้น a ขึ้นรูปโดยการดรอว์(Drawing)จากแผ่นแบลงก์(Blank)เรียบมีขอบปิกยื่นออกมา รูปร่างลักษณะนี้ทำให้อัตราส่วนความเครียดพลาสติกหรือค่า r มีค่าสูงเพื่อต้านทานการทำให้บางในระหว่างการขึ้นรูปโลหะ ชั้น b ขึ้นรูปโดยการดึงยืดขึ้นรูป(Stretching) ยืดขอบแผ่นแบลงก์ ความหนาของโลหะจะลดลง ชั้นส่วนลักษณะนี้มีการยืดตัวได้ดีในเหล็กกล้า ค่า r ควรจะต่ำเพราะว่าถ้าค่า r สูงจะเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนได้ ชั้น c มีการเสียหายเกิดขึ้นที่ความเครียดในระนาบ(Plane strain) ซึ่งเป็นการดึงยืดขึ้นรูป ชั้นส่วนที่มีความเครียดที่ดีในลักษณะนี้เช่นประตูรถยนต์ซึ่งต้องการการยืดตัวได้ดี

ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ชิ้นงานมีสภาพหลังการขึ้นรูปแตกต่างกัน ลักษณะที่เกิดขึ้นควรหาสาเหตุและวิธีแก้ไขซึ่งสามารถทดสอบและประเมินผลจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

1. ปัญหาในการขึ้นรูป

ไบรอัน เทย์เลอร์ (Brian Taylor. 1988 : 878) กล่าวว่า ปัญหาหลักที่พบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือการแตก การโก่ง(Buckling)และการย่น การเสียรูป(Shape distortion) โลหะหย่อน(Loose metal)และเนื้อผิวเสีย(Undesirable surface textures) เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโลหะแผ่นนั้นใช้ไม่ได้ ผลของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1.1 การแตก เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยืดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการดรอว์มากเกินไปจนจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะได้รับ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยืดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตก การเกิดรอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้ และทำให้โครงสร้างอ่อนแอ

การแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย(Slitting) การแบลงก์(Blanking)และการทริม(Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยืดขึ้นรูป

1.2 การโก่งและการย่น ในการขึ้นรูปด้วยพื้นที่กดอัดบนแผ่นแบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่ง การโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกระทันหันและบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้

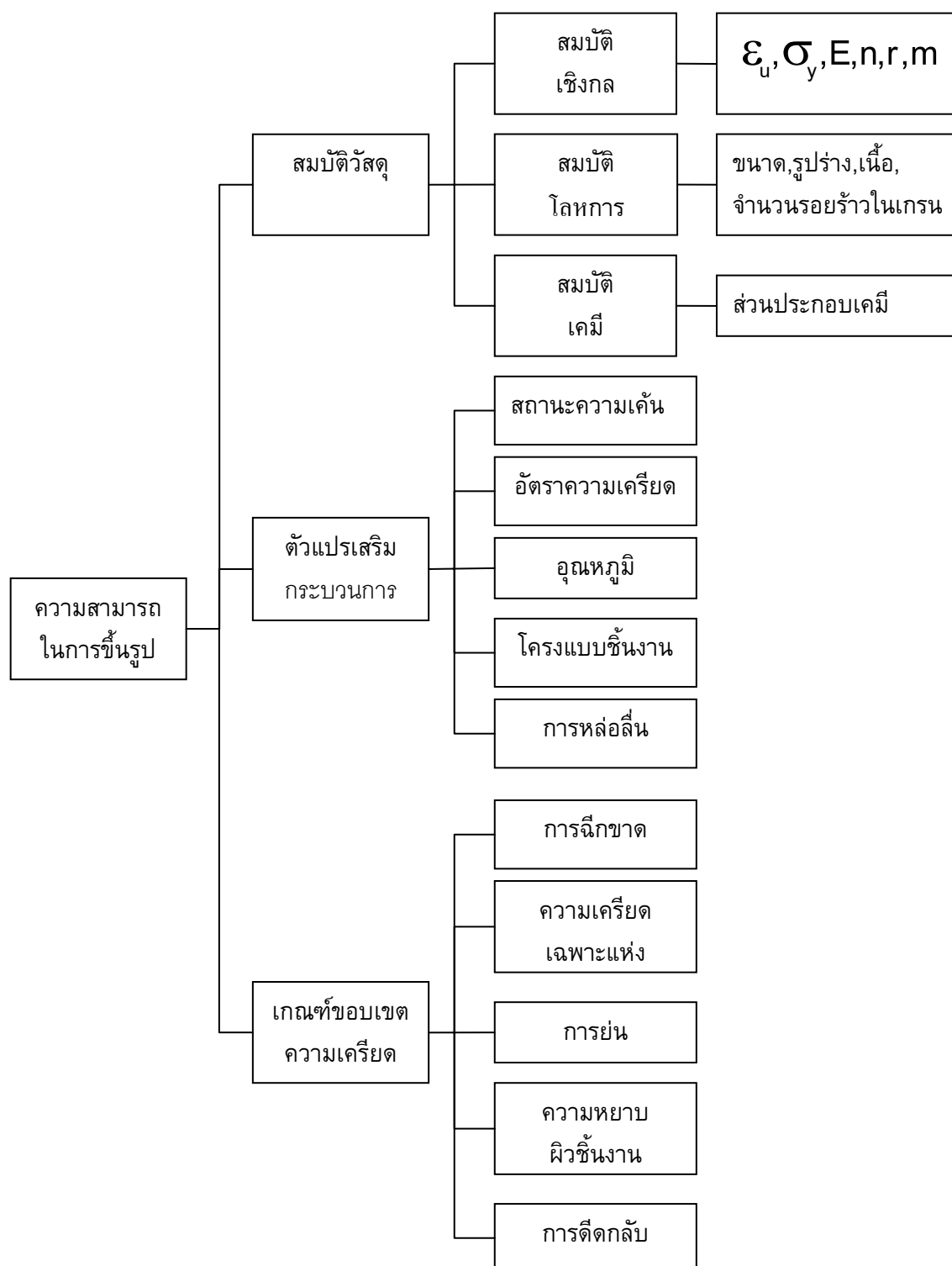
บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแปลงก็จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

1.3 การเสียรูป โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับการดัด(Bending)มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ(Springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากแผ่นแปลงแต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

1.4 โลหะหย่อน เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์แคนนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดองเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่น การดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสรอยนูนทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการยืดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแปลงก็ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

1.5 เนื้อผิวเสีย โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบมักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม(Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยืดที่จุดคราก นั่นคือวัสดุยืดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยนรูปที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะเรียกว่าเส้นลือเดอร์(Lueders line)หรือรีคราก(Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำ ความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่ม อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน

ในบางกรณีเหล็กเคลือบสังกะสีจะมีความบกพร่องผิวเรียกว่าผิวแววาว (Spangles) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ชุบร้อน(Hot dipped)เท่านั้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากสังกะสีที่เคลือบผิวมีเกรนหยาบทำให้สามารถมองเห็นเกรนแต่ละเกรนได้ชัดเจน ปัญหานี้สามารถทำให้ดีได้ในกระบวนการเคลือบผิว นอกจากปัญหาที่กล่าวข้างต้นแล้วยังอาจเกิดความเสียหายจากการขนย้าย, รอยที่เกิดจากสิ่งสกปรกหรือเศษเล็กๆในตาย(Die)และรอยตามยาว(Scoring) หรือรอยแผล(Galling) ที่เกิดจากผิวตายหยาบหรือการหล่อลื่นไม่เพียงพอทำให้ผิวชิ้นงานเสียใช้ไม่ได้



ภาพประกอบ 2 อิทธิพลตัวแปรเสริมความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

บานาบิค; และคนอื่นๆ(Banabic; et al. 2000 : 176) ได้สรุปว่าอิทธิพลของตัวแปรเสริมต่อความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นดังแสดงในภาพประกอบ 2 จะเห็นว่าความสามารถในการขึ้นรูปเกี่ยวข้องกับสมบัติวัสดุ ตัวแปรกรรมวิธีการผลิตและเกณฑ์ขอบเขตความเครียด ซึ่งจะได้กล่าวในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. สมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูป(Mechanical properties and Formability)

ไบรอัน เทย์เลอร์ (Brian Taylor. 1988 : 879) กล่าวว่าสมบัติของโลหะแผ่นแปรผันได้อย่างมากขึ้นอยู่กับเหล็กกล้า ธาตุเจือ กระบวนการผลิต กรรมวิธีทางความร้อน เกจและระดับของการขึ้นรูปเย็น การเลือกวัสดุเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติกลาง ระหว่างสมบัติที่ต้องการในชิ้นงานกับสมบัติในการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานช่วงกว้างๆ ควรมีสมบัติดังนี้

- ก. การกระจายความเครียดได้อย่างสม่ำเสมอ
- ข. ทำให้ระดับความเครียดมีค่าสูงโดยปราศจากการคอดหรือการแตก
- ค. ต้านทานความเค้นกดในระนาบโดยปราศจากการย่น
- ง. ต้านทานความเค้นเฉือนในระนาบโดยปราศจากการแตก
- จ. รักษารูปทรงของชิ้นงานไว้ได้หลังจากนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
- ฉ. ผิวเรียบและต้านทานความเสียหายที่ผิว

กรรมวิธีการผลิตบางอย่างสามารถทำให้สำเร็จได้เมื่อสมบัติการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงานอยู่ในช่วงแคบๆ โดยมากสามารถปรับกรรมวิธีให้เหมาะสมเข้าหากันกับสมบัติวัสดุของชิ้นงานจากช่วงหนึ่งไปยังอีกช่วงหนึ่ง ถึงแม้ว่าบางครั้งค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าและสูญเสียวัสดุมากกว่า แต่กรรมวิธีการผลิตบางอย่างก็สามารถทำให้สำเร็จได้โดยใช้วัสดุของชิ้นงานที่มีสมบัติในช่วงกว้างๆ โดยทั่วไปแล้วความแน่นอนในสมบัติการขึ้นรูปของวัสดุคือตัวแปรที่สำคัญของชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องในการผลิตจำนวนมากๆ

สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กมีอิทธิพลกับลักษณะการขึ้นรูปไม่ทางตรงก็ทางอ้อมอย่างใดอย่างหนึ่ง สามารถวัดโดยการทดสอบการดึงตามแนวแกนเช่น มีการอธิบายใน ASTM E8 ผลการทดสอบการดึงที่น่าสนใจเป็นพิเศษประกอบไปด้วย ความต้านแรงคราก ความต้านแรงดึงสูงสุด การยืดรวม การยืดสม่ำเสมอ การยืดจุดคราก อัตราส่วนความเครียดพลาสติก แอนไอโซทรอปีกในระนาบและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนทำจากชิ้นทดสอบที่หาได้ตามความยาว(0 องศา) เส้นทะแยงมุม(45 องศา) ตามขวาง(90 องศา)หรือการกำหนดทิศทางอื่นที่สัมพันธ์กับทิศทางการรีด

2.1 ความต้านแรงคราก(Yield strength)ของแผ่นเหล็กเป็นตัววัดความสามารถในการขึ้นรูปและความแข็งแรงหลังการขึ้นรูป พฤติกรรมการครากหลายๆชนิดสังเกตจากแผ่นเหล็กเมื่อเกิดการยืดที่จุดครากเป็นค่าที่ต่ำที่สุดระหว่างการครากที่ไม่ต่อเนื่อง

ในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปความต้านแรงคราก 240 MPa หรือมากกว่ามีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการดีดกลับที่มากเกินไปและเกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุที่มีความต้านแรงครากน้อยกว่า 140 MPa อาจจะมีผลกับชิ้นงานได้ซึ่งมีระดับความแข็งแรงไม่เพียงพอ เหล็กแผ่นที่มีความแข็งแรงสูงๆ สามารถปรับปรุงการขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อให้ทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม ความต้านแรงครากของเหล็กความแข็งแรงสูงโดยทั่วไปประมาณ 345 ถึง 690 MPa

2.2 การยืดรวม(Total elongation) เป็นการวัดขึ้นทดสอบการดึงโดยวัดความยาวเกจ (Gauge length) ภายหลังเกิดการแตกหัก การยืดเป็นการคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของความยาวทดสอบเดิม ซึ่งปกติ 50 mm.(อาจจะใช้ความยาวทดสอบ 200 mm. สำหรับโลหะเกรดแข็งแรง) ขึ้นทดสอบโลหะแผ่นโดยปกติจะใช้ทดสอบการดึงช่วงความยาวทดสอบสั้นๆ ด้านข้างขนาน หน้าตัดจะลดลง แต่หน้าตัดจะลดเป็นลักษณะรีียวเพียงเล็กน้อยบางครั้งใช้ควบคุมตำแหน่งการเกิดรอยคอดและรอยแตกหัก วัสดุที่เหมือนกันแต่นาขขึ้นทดสอบที่แตกต่างกัน ค่าของผลการยืดจากการทดสอบอาจจะเปลี่ยนไปเพราะว่าความยาวทดสอบ ความหนาแผ่น การเตรียมผิวขอบสำเร็จ วิธีทดสอบหรืออื่นๆ แตกต่างกัน

ตาราง 1 สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น

ชนิด หรือ ภาพ	ลักษณะพิเศษ	ความเค้นคราก(MPa)	การยืดตัวใน 50 mm. (%)	ความแข็งแรง (HRB)	n	r _m	m
Commercial	Standard properties	234	35	45	0.18	1.0	0.012
Drawing(Rimmed)	Stretchable	207	42	40	0.22	1.2	0.014
Drawing(Special killed)	Deep drawing	172	42	40	0.22	1.6	0.015
Interstitial free (IF)	Extra deep drawing	152	42	45	0.24	2.0	0.015
Medium strength	Formable	414	25	85	0.20	1.2	
High strength	Moderately formable	689	10	25(HRC)	...	...	

ตัวอย่างค่าการยืดของความยาวทดสอบ 50 mm. ดังแสดงในตาราง 1 ซึ่งเป็นการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเกรดธรรมดา โดยทั่วไปการยืดตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำปกติจะอยู่ที่ 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ในความยาวเกจ(gauge length) 50 mm. ค่าที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่า

2.3 การยืดสม่ำเสมอ(Uniform elongation) การยืดรวมของแผ่นขึ้นทดสอบแรงดึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือการยืดสม่ำเสมอและหลังการยืดสม่ำเสมอ สำหรับวัสดุที่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกฎกำลัง ($\sigma = K\epsilon^n$) การยืดสม่ำเสมอ(วัดในความเครียดจริง)เป็นค่าที่เหมาะสมต่อเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n) ภายหลังการยืดสม่ำเสมอเกิดขึ้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียดและความไวของอัตราความเครียดทั้งสองชนิดของโลหะต่อ

ความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราส่วนความเครียดภายในรอยคอดจะมีค่ามากกว่าบริเวณภายนอก เมื่อการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่ามากขึ้นวัสดุจะถึงจุดต้านทานแรงไ้ได้น้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านความหนาลดลง ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนรูปบริเวณด้านนอกของรอยคอด

การยืดวิศกรรมที่แรงสูงสุด (e_u) เกี่ยวข้องกับเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) โดยสมการ $n = \ln(1 + e_u)$ ตัวอย่างค่าของ e_u สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ e_u และค่า n ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันแสดงอัตราส่วนการทำให้แข็งของงานโลหะแผ่น ดังนั้นโลหะสามารถเปลี่ยนรูปในการยืดแบบระนาบความเครียดและการตัด

2.4 การยืดที่จุดคราก (Yield point elongation) เป็นส่วนหนึ่งของการยืดรวมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการครากแบบไม่ต่อเนื่องที่ความเค้นคราก ตามด้วยการก่อรูปของรอยร้าวที่พื้นผิวซึ่งรู้จักกันว่าเส้นลือเดอร์หรือริ้วคราก ซึ่งเป็นการแสดงข้อผิดพลาดในวิธีใช้หลายอย่างของโลหะแผ่น การยืดที่จุดครากระหว่างการทดสอบแรงดึงที่ไม่ปรากฏให้เห็น จะแสดงให้เห็นเส้นลือเดอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป

การยืดที่จุดครากส่วนใหญ่จะต้องมีเศษแทรกในธาตุเจือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้เหล็กที่มีสารแทรกต่ำจะไม่แสดงออก การยืดที่จุดครากสามารถระงับได้โดยการอบคืนตัวรอบๆแผ่นโลหะขณะทำการบด เว้นเสียแต่ไนโตรเจนมีส่วนผสมของธาตุอื่น (ปกติอะลูมิเนียม) เหล็กกล้าจะมีความแข็งขึ้นหลังจากมีการเก็บไว้นานๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆในการเก็บ) เหล็กกล้าที่มีการเปลี่ยนตามอายุสามารถใช้ในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด

2.5 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic strain ratio) ค่า r มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง (ϵ_w) ต่อความเครียดจริงในแนวความหนา (ϵ_t) ของความเครียดช่วงพลาสติกในโลหะแผ่นบริเวณการยืดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง เกี่ยวข้องกับความสามารถในการดรอว์ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนา (Thinning) ในการดรอว์วัสดุบริเวณริมขอบชิ้นงานจะเกิดการยืดในทิศทางเดียว (แนวรัศมี) เกิดการกดในทิศทางตั้งฉาก (แนวเส้นรอบวง) ค่า r สูงแสดงว่าวัสดุมีสมบัติการดรอว์ได้ดี

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \left(\frac{w}{w_o} \right)}{\ln \left(\frac{t}{t_o} \right)} \quad (1)$$

อัตราส่วนความเครียดพลาสติกเกี่ยวข้องกับการกำหนดทิศทางโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งค่าจะเปลี่ยนไปตามทิศทางการทดสอบ(สัมพันธ์กับทิศทางการรีด) ในโลหะที่เป็นแอนไอโซทรอปิก(Anisotropic) ค่าเฉลี่ย r_m (บางครั้งเรียกว่า $\bar{r}$) แทนด้วยแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉากของแผ่นเหล็ก ค่า r ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามทิศทางของแผ่นวัสดุในการดรอว์ขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ผนังของถ้วยสูงไม่เท่ากัน เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่ารอยดิ่ง(Earing) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักวัดค่า r เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปี้ตั้งฉากเฉลี่ย r_m (Normal anisotropy) และแอนไอโซทรอปี้ระนาบ ค่า Δr (Planar anisotropy)

สมบัติของ r_m มีนิยามว่า

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

เมื่อตัวห้อยที่อ้างถึงคือมุมระหว่างแกนขึ้นทดสอบการดึงกับทิศทางการรีดแผ่นวัสดุ

เหล็กที่ร้อนและรีดเย็นอบคืนตัวอุณหภูมิสูงคือไอโซทรอปิกทั่วไป($r_m = 1.0$) เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์(รีมส์ตีล)ปกติมี r_m เท่ากับ 1.2 แต่อาจจะมีค่าสูงขึ้นในกรณีพิเศษเช่นผลิตภัณฑ์ที่มีเมังกานีสและซิลเฟอร์ผสมอยู่ต่ำๆ เหล็กกล้าเนื้อแน่น(อะลูมิเนียมคิลล์ตีล)จะมีแอนไอโซทรอปิก r_m เท่ากับ 1.6 หรือค่าอาจจะสูงกว่า(สูงถึง 2.5) ซึ่งได้มาโดยความคุมส่วนประกอบและขบวนการผลิต ชีตจำกัดค่าสูงสำหรับเหล็กกล้าเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.0 ถึงแม้ว่าค่าใกล้เคียง 3.0 จะได้ใช้นานๆครั้ง เหล็กกล้า Interstitial free Steel จะมี r_m ประมาณ 2.0 ค่า r_m ใช้ทำนายความสามารถในการดรอว์ขึ้นรูปโลหะ

แอนไอโซทรอปี้ในระนาบ ค่า Δr มีนิยามว่า

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (3)$$

แอนไอโซทรอปี้ในระนาบเป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของ r ด้วยทิศทางในแผ่นระนาบของจำนวนจุดสูงๆหรือรอยดิ่ง ซึ่งจะพัฒนาขอบของการดีปดรอว์ถ้วยทรงกระบอกหรือชิ้นส่วนง่ายๆ จุดสูงๆในทิศทางการรีดตามเกรนและขวางเกรน แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แผ่นเหล็กกล้าคุณภาพการดรอว์และแผ่นเหล็กกล้าเนื้อแน่น Δr จะเป็นบวก สำหรับเหล็กความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าเจือต่ำ Δr เป็นลบจะเกิดเป็นรอยดิ่งที่ 45 องศาทิศทางรีด ค่า Δr เข้าใกล้ศูนย์มีการใช้มากที่สุดเพราะว่ามีแนวโน้มจะเกิดรอยดิ่งน้อยที่สุดเมื่อโลหะถูกดรอว์เข้าไปในถ้วยทรงกระบอก

r_m เป็นค่าที่กำหนดความลึกเฉลี่ย(ความสูงของผนัง)ของการดรอว์ลิ่งที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ Δr เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของรอยดึง วัสดุที่มีค่า r_m สูงและค่า Δr ต่ำในขณะเดียวกันทำให้มีความสามารถการดรอว์ลิ่งที่เหมาะสม

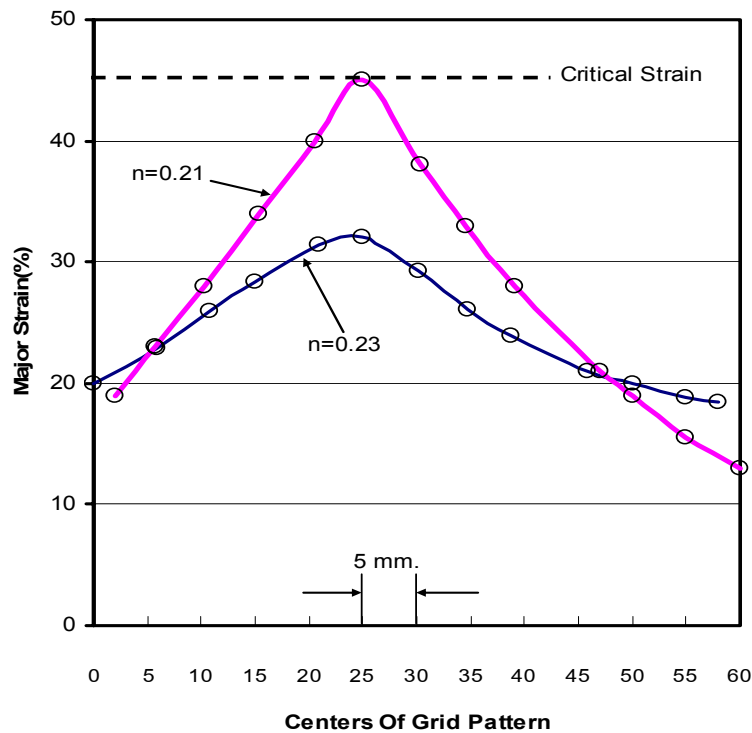
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อนมีค่า r_m ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์รีดเย็น(Cold-rolled rimmed steel)มีค่าในช่วง 1.0 ถึง 1.4 เหล็กกล้าเนื้อแน่นรีดเย็นกำจัดออกซิเจน(Cold-rolled aluminium-killed steel, deoxidized)มีค่าในช่วง 1.4 ถึง 2.0 เหล็กกล้า Interstitial free Steel มีค่าในช่วง 1.8 ถึง 2.5 และอะลูมิเนียมเจือมีค่าในช่วง 0.6 ถึง 0.8 ค่า r_m สูงสุดในทางทฤษฎีสำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ไรต์(Ferritic steel)คือ 3.0

2.6 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(Strain Hardening Exponent) n , คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริงเมื่อมีการพล็อตบนค่าลอการิทึม เป็นการกำหนดโดยขึ้นอยู่กับความเค้นไหล(Flow stress)บริเวณจุดครากบนระดับความเครียด ในวัสดุค่า n มีค่าสูงความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียด ซึ่งควรระวังการกระจายความเครียดที่เพิ่มขึ้นในบริเวณความเครียดและความเค้นไหลที่ต่ำกว่า ค่า n ที่สูงจะเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความหมายตามสมมุติฐานของสมการ

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (4)$$

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่า n โดยทั่วไปประมาณ 0.22 ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ยุงยากซับซ้อน ค่าที่สูงกว่า(ขึ้นไปถึง 0.26) จะระบุถึงความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์โดยทั่วไปค่า n เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีการรีดที่ดีกว่าหลังการประกันอายุและมีค่าน้อยกว่า บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีขบวนการผลิตไม่เพียงพอสำหรับความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะเกรดรีดร้อนจะมีค่า n ต่ำ เท่ากับ 0.10 แต่เกรดที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า n มากกว่า 0.14

ผลของค่า n ที่แตกต่างกันสำหรับการกระจายความเครียดในบริเวณวิกฤตของชิ้นงานขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กด้วยค่า n ที่ต่ำ(0.21)อาจจะเกิดการบางและรอยแตกที่มากเกินไปในบริเวณวิกฤต การขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมือนกันทุกประการจากแผ่นที่มีค่า n สูง(0.23)หลายครั้ง จะเกิดความแข็งแรงขึ้นในพื้นที่วิกฤตถ่ายทอดความเครียดไปยังพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงอาจทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างการผลิตขึ้นรูป



ภาพประกอบ 3 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า n ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต

ในบริเวณการยืดสม่ำเสมอ นิยามของค่า n คือ:

$$n = \frac{d \ln \sigma_{\gamma}}{d \ln \varepsilon} \quad (5)$$

เมื่อ σ_{γ} คือ ความเค้นจริง(True stress, แรง/พื้นที่ที่เกิดขึ้นจริง)

ความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญกับเส้นโค้งความเค้นจริง-ความเครียดจริงของวัสดุ สามารถประมาณโดยสมการกฏกำลัง(Power law)คือ $\sigma_{\gamma} = k \varepsilon^n$ เมื่อ k คือ ค่าคงที่ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์ความต้านการดึง(Strength coefficient) สมการนี้ให้ผลการประมาณค่าที่ดีสำหรับเหล็กกล้าเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่แม่นยำสำหรับเหล็กกล้าสองเฟส(Dual-phase steel)และอะลูมิเนียมเจือบางชนิด สำหรับวัสดุดังกล่าวนี้ต้องใช้ค่า n สองหรือสามค่าเพื่อคำนวณในบริเวณความเครียดต่ำ ปานกลางและสูง

เมื่อสมการกฏกำลังแทนพฤติกรรมของวัสดุได้อย่างแม่นยำ ค่า n จึงเท่ากับ $\ln(1+e_u)$ เมื่อ e_u คือการยืดสม่ำเสมอหรือการยืดที่แรงสูงสุดในการทดสอบการดึง จากนิยาม $\ln(1+e_u)$ จึงมีค่าเท่ากับ ε_u ซึ่งก็คือความเครียดจริงที่การยืดสม่ำเสมอ

เหล็กกล้าส่วนมากที่มีความต้านแรงครากน้อยกว่า 345 MPa และอะลูมิเนียมเจือ ส่วนมากมีค่า n ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 สำหรับเหล็กกล้าความต้านแรงครากสูงขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า n คือ

$$n \approx \frac{70}{\text{Yield strength in MPa}} \quad (6)$$

การที่ค่า n สูง ทำให้เกิดความแตกต่างมากขึ้นระหว่างความต้านแรงดึงครากกับความต้านแรงดึงสูงสุด ดังนั้นอัตราส่วนนี้จึงใช้วัดความสามารถในการขึ้นรูปได้อีกสิ่งหนึ่ง

2.7 ความไวของอัตราความเครียด(Strain rate sensitivity)ค่า m ไบรอัน เทย์เลอร์ (Brian Taylor. 1988 : 879-882) กล่าวว่า ค่า m มีนิยามดังนี้

$$m = \frac{d \ln \sigma_{\gamma}}{d \ln \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

เมื่อ $\dot{\epsilon}$ คือ อัตราความเครียด, $d\epsilon/dt$

ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ในรูป

$$\sigma_{\gamma} = f(\epsilon) \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (8)$$

เมื่อนำสมการกฎกำลังมาแทนลงไปจะได้สมการที่ 9 ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\sigma_{\gamma} = k \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (9)$$

ความไวของอัตราความเครียดที่เป็นบวกแสดงว่า ความเค้นไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดอัตราการเปลี่ยนรูป(Deformation) ผลที่ตามมาทั้งสองอย่างคือหนึ่ง การขึ้นรูปขึ้นส่วนที่อัตราการเปลี่ยนรูปสูงกว่าต้องการความเค้นไหลที่สูงกว่า สอง อัตราการขึ้นรูปที่กำหนดวัสดุจะต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปที่เพิ่มขึ้นในบริเวณที่ได้รับความเครียดเร็วกว่าบริเวณข้างเคียง โดยความเค้นไหลที่เพิ่มขึ้นในบริเวณนี้จะช่วยทำให้การกระจายความเครียดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

โดยปกติความต้องการความเค้นในการขึ้นรูปที่สูงขึ้นไม่ใช่สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นหลัก แต่ความสามารถในการกระจายความเครียดคือสิ่งที่สำคัญมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสำคัญในบริเวณหลังจากการยืดสม่ำเสมอ จะเกิดรอยคอดและความเครียดเฉพาะจุดที่สูงขึ้น

(High strain concentration) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m กับการยืดหลังการยืดสม่ำเสมอสำหรับ เหล็กกล้าหลายชนิดและโลหะเจือนอกกลุ่มเหล็ก สามารถประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น เมื่อค่า m เพิ่มจาก -0.01 ถึง $+0.06$ การยืดหลังการยืดสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 40 %

โลหะในช่วงซูเปอร์พลาสติก(Superplastic) มีค่า m อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.7 ซึ่งมีค่ามากกว่าเหล็กกล้า 2 เท่า ที่อุณหภูมิโดยทั่วไปโลหะบางชนิดเช่นอะลูมิเนียมเจือและทองเหลืองมีค่า m ต่ำหรือเป็นลบเล็กน้อย ซึ่งอธิบายได้ว่าการยืดหลังการยืดสม่ำเสมอมีค่าต่ำ

ค่า n และค่า m สูงทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีในการดึงยืดขึ้นรูป แต่มีผลเล็กน้อยกับความสามารถการดรอว์ ในการดรอว์ขึ้นรูปโลหะที่บริเวณริมขอบจะต้องดรอว์ขึ้นรูปได้โดยปราศจากสาเหตุการแตกหักที่ผนัง ในกรณีที่ค่า n และค่า m สูงทำให้ผนังแข็งแรงซึ่งเป็นประโยชน์ แต่มีผลทำให้บริเวณขอบแข็งแรงขึ้นและดรอว์ได้ยากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

3. สมบัติวัสดุและการย่น

ผลของสมบัติวัสดุต่อการเกิดรอยไม่เรียบหรือการย่นเป็นสิ่งที่ทำการวิจัยกันมากสำหรับการทดลองขึ้นพื้นฐาน โดยทั่วไปในการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกและทรงกรวย(Conical cups) มีการยอมรับผลการทดลองกันมาก ค่า r_m สูงและค่า Δr ต่ำจะลดการย่นทั้งในบริเวณขอบและผนัง นอกเหนือจากนั้นเมื่ออัตราส่วนของความเค้นไหลต่อโมดูลัสยืดหยุ่น(σ_f / E) มีค่าต่ำจะช่วยลดการย่นที่ผนัง ส่วนค่า n มีผลทางอ้อมแต่เมื่อแรงยึดแผ่นแบล็ก(Binder force)คงที่ค่า n ก็ไม่มีผล แต่อย่างไรก็ตามค่า n มากทำให้ต้องใช้แรงยืดมากจึงลดการย่นได้

สถานการณ์ที่เกิดขึ้นในการดึงยืดขึ้นรูปที่แตกต่างกัน การเกิดรอยย่นที่ระดับความเครียดต่ำมีสหสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอัตราส่วนของความต้านแรงครากกับความต้านแรงดึงสูงสุดในทางกลับกันค่า n ที่ความเครียดต่ำมีสหสัมพันธ์กับค่า r_m และการยืดสม่ำเสมอ ความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์เหล่านี้อาจช่วยสนับสนุนความจริงที่เกิดจากการทดลองเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปถ้วยที่ความเครียดสูงและความเค้นกดสูง เช่นเดียวกับการทดลองโดยการดึงยืดขึ้นรูปที่ระดับความเครียดต่ำและความเค้นกดต่ำ ปัญหาทั้งสองจะมีมากยิ่งขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นโลหะลดลง

4. สมบัติวัสดุและรอยแตกจากการเฉือน

รอยแตกจากการเฉือนเนื่องจากความเค้นเฉือนในระนาบเกิดขึ้นโดยทั่วไปกับวัสดุรีดเย็น ความต้านแรงสูงมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความบกพร่องภายในเช่น มีสารฝังใน ความเครียดที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกเนื่องจากการเฉือนบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีระดับความเครียดสูงในบริเวณใกล้ๆกับ $\epsilon_2 = \pm \epsilon_1$ ความเสียหายจากการเฉือนเกิดขึ้นก่อนเริ่มเกิดการคอด

5. การแพร่กระจายความเครียด(Strain distribution)

การแพร่กระจายความเครียดในการขึ้นรูปเป็นสาเหตุมาจากสมบัติวัสดุ 3 ประการคือ

5.1 สัมประสิทธิ์การทำให้แข็งด้วยความเครียดหรือเรียกว่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดหรือ ค่า n

5.2 ความไวของอัตราความเครียดหรือ ค่า m

5.3 อัตราส่วนความเครียดพลาสติกหรือตัวประกอบแอนไอโซทรอปิกหรือ ค่า r

ความสามารถในการแพร่กระจายความเครียดอย่างสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับค่า n และค่า m ความสามารถในการทำให้ระดับความเครียดทั้งหมดบรรลุถึงค่าสูงๆได้ ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่างเช่น วัสดุพื้นฐาน ธาตุเจือ อบคืบตัว ค่า n , ค่า m , ค่า r , ความหนา ลักษณะที่เหมือนกันทั้งแผ่นและปราศจากจุดบกพร่องหรือสิ่งแปลกปลอม

6. คุณภาพผิว

เนื้อผิวไม่เป็นที่ต้องการสามารถทำให้ลดลงหรือป้องกันได้เช่น การเกิดผิวส้มในบริเวณที่มีการขึ้นรูปมากสามารถลดลงได้โดยใช้วัสดุเกรนละเอียด เส้นลวดเดอร์ที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์สามารถป้องกันได้โดยการรีดอบคืบตัว(Temper rolling) 0.25 ถึง 1.25% ของการยืดตัวหรือโดยการรีดตัด(Flex rolling) ซึ่งทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ในช่วงเวลาหนึ่งจนกระทั่งอะตอมในโตรเจนเข้าไปรวมตัว กรรมวิธีนี้ทำให้การยืดลดลงเล็กน้อย ปัญหานี้เกิดขึ้นน้อยลงเมื่อใช้การหล่อ(Casting)อย่างต่อเนื่องซึ่งได้เหล็กกล้าเนื้อแน่น เหล็กกล้าเหล่านี้มีในโตรเจนอิสระน้อยที่จะมีผลต่อดิสโลเคชันและไม่ทำให้เกิดเส้นลวดเดอร์ วิธีปฏิบัติในการทำงานเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องนี้

7. ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการขึ้นรูป

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉพาะแห่งที่แตกต่างกันภายในการเปลี่ยนรูปของแผ่นแบล็ก ทำให้สมบัติวัสดุเฉพาะแห่งแตกต่างกัน มีผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปด้วย

อุณหภูมิสูงกว่าครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวซึ่งเป็นมาตราส่วนอุณหภูมิสัมบูรณ์ อะลูมิเนียมเกรนละเอียดมาก ทองแดง แมกนีเซียม นิกเกิล เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้า ไทเทเนียม สังกะสี และโลหะเจืออื่นๆกลายเป็นซูเปอร์พลาสติก สภาพซูเปอร์พลาสติกเป็นลักษณะการยืดมากเป็นพิเศษซึ่งอยู่ในช่วงหลายร้อยถึงมากกว่า 1000% แต่อัตราความเครียดต่ำ(ปกติต่ำกว่าประมาณ 10^{-2} S) ที่อุณหภูมิสูง ความต้องการอุณหภูมิสูงและอัตราการขึ้นรูปต่ำจึงเป็นข้อจำกัดของการขึ้นรูปซูเปอร์พลาสติกต่อการผลิตจำนวนน้อย การขึ้นรูปไทเทเนียมในอุตสาหกรรมอากาศยานใช้วิธีนี้ กรรมวิธีนี้น่าสนใจสำหรับสังกะสีเจือเพราะต้องการเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิต่ำคือประมาณ 270 °C หรือ 520 °F

ระหว่างที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เหล็กกล้าและโลหะเจืออื่นๆจำนวนมากมีการยืดน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือมีการยืดใกล้อุณหภูมิห้อง โลหะเจือเหล่านี้ที่มีการขึ้นรูปเชิงพาณิชย์จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 250 °C หรือ 480 °F อัตราความไวของความเครียด(ค่า m)และการยืดหลังการยืดสม่ำเสมอได้พบว่ามีเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้

การขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำเป็นข้อได้เปรียบสำหรับวัสดุบางชนิด แต่มีปัญหาในทางปฏิบัติกับการใช้งานอย่างจำกัดบนพื้นฐานของแรงดึง เกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉพาะแห่งระหว่างการขึ้นรูป เพราะความเสียดทานที่ผิวและความร้อนภายในจากการเปลี่ยนรูป โดยทั่วไปแล้วถือเป็นผลเสียเพราะทำให้ความเค้นไหลลดลงบริเวณที่มีความเครียดมาก และมีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนรูปเฉพาะแห่ง

วิธีการปรับปรุงความสามารถในการดรอว์โดยทำให้อุณหภูมิแตกต่างกันเฉพาะบางแห่ง ซึ่งได้มีการพัฒนาใช้กับวัสดุในเชิงพาณิชย์ด้วย การตีปดรอว์จะใช้น้ำหล่อเย็นที่ตัวพื้นผิว อุณหภูมิของแผ่นแปลงก็สัมผัสกับพื้นผิวลดลง ซึ่งเป็นบริเวณที่เสียหายหลักและทำให้ความเค้นไหลเพิ่มขึ้นเฉพาะแห่ง การให้ความร้อนกับดรอว์ทำให้ความเค้นไหลลดลงในบริเวณการเปลี่ยนรูปขอบผนังด้านบน ซึ่งพบว่าได้ประโยชน์มาก การนำเอาวิธีดำเนินการทั้ง 2 อย่างมารวมกันทำให้ความสามารถในการดรอว์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นมากกว่า 20%

8. ผลกระทบของส่วนประกอบเหล็กกล้าบนความสามารถในการขึ้นรูป(Effect of Steel Composition on Formability)

แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปจะมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์และมีธาตุเจือที่ตึงใจและไม่ได้ตึงใจรวมน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จำนวนแมงกานีสเป็นธาตุเจือหลักที่เพิ่มขึ้นปกติประมาณ 0.15-0.35 เปอร์เซ็นต์ ธาตุที่ถูกควบคุมเช่น ซิลิกอน ไนโอเบียม ไทเทเนียมหรืออะลูมิเนียมอาจจะเพิ่มอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อขจัดออกซิเจนหรือพัฒนาสมบัติที่ต้องการความเหนียว ธาตุเหลือเช่น ซัลเฟอร์ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม ทองแดง ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส มีความเป็นไปได้อย่างมากที่ต้องจำกัดไว้ ซึ่งจำนวนนี้เป็นค่าพื้นฐานโดยทั่วไปของคุณภาพแผ่นผลิตภัณฑ์ ซึ่งแผ่นเหล็กเจือนี้อาจจะมีธาตุเจือหนึ่งธาตุหรือมากกว่าก็ได้

8.1 คาร์บอน(Carbon) เป็นที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีอยู่ในเหล็กซึ่งมีเจตนาจะใช้ในการขึ้นรูปที่ยุ่ยากซับซ้อน การเพิ่มคาร์บอนในเหล็กจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในเหล็กและลดความสามารถในการขึ้นรูป ผลกระทบของสาเหตุนี้โดยเกิดการก่อรูปของคาร์ไบด์ในโครงสร้างเฟรไรต์และผลทำให้ขนาดเม็ดเกรนเล็กลง โดยทั่วไปจำนวนของคาร์บอนในเหล็กจะจำกัดไว้ที่ 0.10 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าเพื่อให้แผ่นโลหะมีความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงขึ้น

8.2 แมงกานีส(Manganese) เพิ่มลักษณะของเหล็กที่ร้อนและช่วยทำให้ง่ายในการพัฒนาขนาดเกรนตามที่พอใจ บางครั้งแมงกานีสก็มีความจำเป็นต่อผลกระทบของความเสียหายที่เกิดจากซัลเฟอร์ทำให้ไม่มีผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับความสามารถในการขึ้นรูปร้อน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีแมงกานีสในช่วง 0.15-0.35 เปอร์เซ็นต์ อาจจะขึ้นไปถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในเหล็กเจือต่ำความต้านแรงสูง เมื่อซัลเฟอร์ต่ำมากแมงกานีสก็ต่ำด้วย ซึ่งเป็นกระบวนการช่วยให้เหล็กกล้าพัฒนาให้ค่า r สูงได้

8.3 ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์(Phosphorus and Sulfur) ไม่เป็นที่ต้องการในแผ่นเหล็กสำหรับการดรอว์หรือการตัด เพราะว่าเป็นไปได้อาจจะเพิ่มการแตกร้าวหรือแยกออก ระดับที่ยอมรับให้ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เกิดขึ้นในระดับคุณภาพที่น่าพอใจ ตัวอย่างเช่น เหล็กที่เย็นคุณภาพ

เชิงพาณิชย์จะมีฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์น้อยกว่า 0.035%P และ 0.040 %S ตามลำดับ สำหรับการ ใช้บางครั้งฟอสฟอรัสอาจจะเพิ่มเข้ามาในเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซัลเฟอร์โดยปกติจะปรากฏ เป็นแมงกานีสซัลไฟด์ร่วมกันในโครงสร้างขนาดละเอียด การเกิดร่วมกันนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดรอย แยกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ว่าเมื่อใดก็ตามที่ไม่ควบคุมปริมาณไว้ก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปได้

8.4 ซิลิกอน(Silicon) ที่อยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะเปลี่ยนตามกรรมวิธีการขจัด ออกซิเจนระหว่างการผลิตในเหล็กผิวยุติวิธ(รีมัสตีล ที่เรียกตั้งนั้นเพราะว่าในขณะที่เปลี่ยนจาก สถานะหลอมเหลวเป็นของแข็งใช้แก๊สควบคุมบริเวณขอบหรือผิวด้านนอก) ซิลิกอนที่มีอยู่โดยทั่วไป น้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอนค่อนข้างจะมากกว่าอะลูมิเนียมที่ใช้ในการขจัดออกซิเจนกระทำที่ รีมขอบ ซิลิกอนเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กตั้งนั้นมันจะลดความสามารถในการขึ้นรูป

8.5 โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วานาเดียมและธาตุเจืออื่นๆที่มีอยู่ในเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำเท่ากันที่เป็นธาตุเหลือ ในการผลิตเหล็กควรจะควบคุมธาตุเหลือที่เหมาะสม ธาตุเหล่านี้ โดยทั่วไปถือว่ามีจำนวนเล็กน้อย แต่ละธาตุเหล่านี้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและลดความสามารถ ในการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก เหล็กความต้านแรงสูง เหล็กเจือต่ำอาจจะประกอบด้วยลักษณะเฉพาะ จำนวนหนึ่งหรือมากกว่าของธาตุเหล่านี้

8.6 ทองแดง(Copper) โดยทั่วไปพิจารณาเป็นธาตุตกค้างที่ไม่เป็นพิษเป็นภัยในแผ่น เหล็ก ผลกระทบของทองแดงทำให้แข็งแรงขึ้น ในจำนวนเศษตกค้างเกือบทั้งหมดทองแดงพอจะ มองข้ามไปได้เพราะมีค่าน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าทองแดงที่เพิ่มเข้ามาในเหล็กจำนวน 0.20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศดีขึ้น

8.7 ไนโอเบียม(Niobium) ทำให้เหล็กเจือต่ำความต้านแรงสูงมีความแข็งแรงมากขึ้น ตลอดจนการก่อรูปของไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนไตรต์ ซึ่งสามารถใช้อย่างใดอย่างหนึ่งตามลำพัง ได้หรือผสมกับไทเทเนียมเพื่อพัฒนาให้ค่า r สูงขึ้น ในเหล็กกล้า Interstitial free ธาตุเจือนี้จะแยก ออกจากธาตุที่แทรกในคาร์บอนและไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้ทำให้เหล็กไม่มีการยึดที่จุดคราก

8.8 ไทเทเนียม(Titanium) เป็นการก่อรูปของคาร์ไบด์และไนไตรต์แข็ง ช่วยทำให้ค่า r สูงและขจัดการยึดที่จุดคราก เป็นการประกันอายุการใช้งานของแผ่นเหล็กรีดเย็นที่ถูก อบอ่อน ไทเทเนียมอาจจะมีปัญหาในเกรดบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของจุดบกพร่องที่ พื้นผิว

8.9 อะลูมิเนียม(Aluminium) เป็นการเพิ่มในเหล็กเพื่อการกำจัดออกซิเจนบริเวณริม ขอบดังนั้นผลิตภัณฑ์เหล็กจะสะอาดมาก ที่รู้จักคือเหล็กกล้าเนื้อแน่นหรือเหล็กกล้าเนื้อแน่นชนิด พิเศษ อะลูมิเนียมผสมด้วยออกซิเจนและไนโตรเจนในขณะที่เหล็กหลอมละลาย เพื่อหยุดการ รวมตัวในขณะหลอมละลายหรือขณะเทโลหะลงแบบ อะลูมิเนียมช่วยพัฒนาการกำหนดเม็ดเกรน เพื่อทำให้ค่า r ได้ตามต้องการ ในแผ่นเหล็กรีดเย็นและแผ่นเหล็กที่อบอ่อนการประมาณของการยึด เม็ดเกรนตาม ASTM 7 เป็นการพบว่าเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีกระบวนการที่ดีที่สุด เพราะว่า อะลูมิเนียมผสมด้วยไนโตรเจนจะไม่มีการเปลี่ยนตามอายุความเครียด

8.10 ไนโตรเจน(Nitrogen) มีความสำคัญสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามอายุความเครียดในเหล็ก ผลกระทบของไนโตรเจนที่สามารถควบคุมได้โดยการกำจัดออกซิเจนในขณะหลอมละลายด้วยอะลูมิเนียม

8.11 ซีเรียมและธาตุโลหะที่มีเลขอะตอมมิก 57-71 อื่นๆ(Cerium and Other rare earth element) อาจเพิ่มเข้าไปในเหล็กเพื่อเปลี่ยนรูปร่างสิ่งแปลกปลอมที่รวมอยู่กับแมงกานีสซัลไฟด์ จากลักษณะเหมือนเข็มหรือปมให้เป็นลูกกลมๆ สิ่งแปลกปลอมที่รวมเป็นลูกกลมๆมีความเป็นไปได้ที่จะลดการเกิดรอยร้าวถ้าการขึ้นรูปแผ่นเหล็กไม่มีการจำกัดที่ขอบ

8.12 ออกซิเจน(Oxygen) เกิดขึ้นในเหล็กขณะหลอมละลายรวมตัวเป็นของแข็งอยู่ในแท่งหล่อ(Ingot) ถ้ามีจำนวนมากเกินไปจะขัดขวางการก่อตัวของไนโตรเจนกับธาตุอื่นและปฏิเสธผลกระทบของธาตุเจือที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงตามอายุความเครียดลดต่ำลง ธาตุที่กักออกซิเจนไว้เช่น ซิลิกอน อะลูมิเนียมและไทเทเนียม ขนาดของออกซิเจนจะถูกควบคุมเมื่อออกซิเจนรวมตัวกับสารที่กำจัดออกซิเจน ทำให้สารที่ไม่ใช่โลหะอื่นๆก่อตัวขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าสารที่ไม่ใช่โลหะจำนวนมากจะจางหายไปในการถลุง(Slag) บางครั้งอาจจะกลายเป็นหลุมเล็กๆในเหล็กทำให้ผิวเป็นรอยได้

9. การเลือกแผ่นเหล็ก(Selecting of Steel Sheet)

การเลือกแผ่นเหล็กควรจะอยู่บนพื้นฐานของความเข้าใจซึ่งหาได้จากเกรดของเหล็กและความต้องการการขึ้นรูป ปัจจัยอื่นๆควรจะพิจารณาสำหรับการขึ้นรูปในเฉพาะชิ้นส่วน ประกอบไปด้วย

- ก. วัตถุประสงค์ของชิ้นส่วนและความต้องการใช้งาน
- ข. ความหนาของโลหะแผ่นและพิกัดความเผื่อที่อนุญาตให้
- ค. ขนาดและรูปร่างของแผ่นแบลงก์สำหรับกระบวนการขึ้นรูป
- ง. อุปกรณ์ที่หาได้สำหรับการขึ้นรูป
- จ. ปริมาณความต้องการ
- ฉ. อุปกรณ์การเคลื่อนย้ายที่หาได้สำหรับแผ่นและม้วน
- ช. มีแผ่นผลิตภัณฑ์ในท้องถิ่นอย่างเพียงพอในการนำไปใช้งานได้
- ซ. ลักษณะพื้นผิวหน้าของแผ่นเหล็ก
- ฅ. ลักษณะชิ้นงานสำเร็จพิเศษ, ลักษณะการเคลือบหรือสำหรับความต้านทาน

การกัดกร่อน

- ญ. ความโน้มเอียงในการเปลี่ยนแปลงตามอายุและความเกี่ยวข้องกับเวลาก่อนการใช้
- ฎ. ความแข็งแรงของแผ่นเหล็กที่ประกอบเข้าด้วยกัน
- ฏ. ความต้องการความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูป

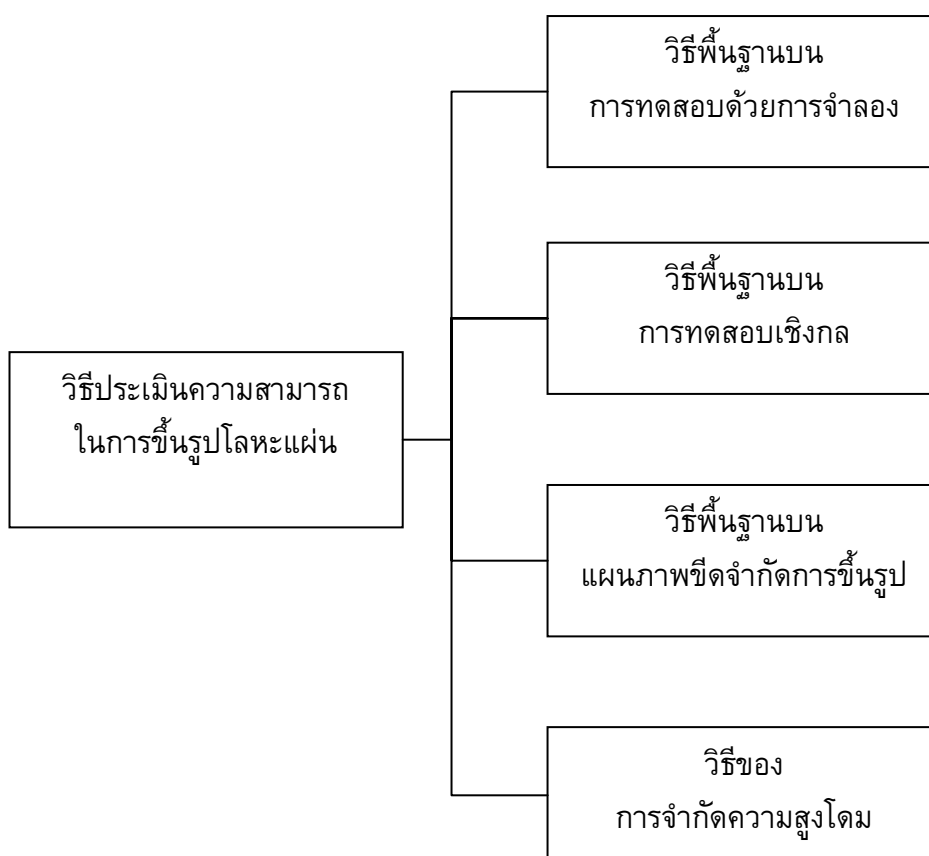
เพราะว่าปัจจัยเหล่านี้จะต้องพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน โดยทั่วไปจะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีจำนวนมากๆ ซึ่งจะพบได้บ่อยในการเลือกใช้เหล็กในการทำชิ้นงานอย่างใดอย่างหนึ่งหลังจากปรึกษาหารือกับตัวแทนจำหน่ายหรือบริษัทผู้ผลิต ชิ้นส่วนบางชิ้น

ต้องการใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษมีการผลิตให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นมา มีชิ้นส่วนขึ้นรูปวิกฤตน้อยกว่าสิ่งอื่นๆ แผ่นเหล็กรีดร้อนและรีดเย็นทั้งสองชนิด ผู้ใช้และผู้ผลิตควรจะเข้าใจและสามารถเลือกใช้ได้อย่างกว้างๆ

10. วิธีการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

บานาบิก; และคนอื่นๆ(Banabic; et al. 2000 : 179) กล่าวว่าไว้ว่าช่วงปลายศตวรรษที่ 19 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างมาก ตั้งแต่นั้นมาวิธีการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้เปลี่ยนไป มีการพัฒนามาเรื่อยๆสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 4 อย่างคือ

- 10.1 วิธีพื้นฐานบนการทดสอบด้วยการจำลอง (Simulating Test)
- 10.2 วิธีพื้นฐานบนการทดสอบเชิงกล
- 10.3 วิธีของการจำกัดความสูงโดม
- 10.4 วิธีพื้นฐานบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพประกอบ 4 วิธีการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

11. ทดสอบการขึ้นรูปโดยการจำลอง(Simulative Forming Tests)

การทดสอบจำนวนมากได้มีการพัฒนาโดยการสังเกตและเปรียบเทียบการกระทำของแผ่นเหล็กภายใต้สภาพการขึ้นรูปจริง ที่รู้จักกันดีคือการทดสอบของโอลเซน(Olsen tests), อีริคเซน(Erichsen tests), ถ้วยของสวิทซ์(Swift cup tests) และการจำกัดความสูงโดม(Limiting Dome Height, LDH) การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซนและอีริคเซน วัดการยืดตัวของเหล็ก การทดสอบแบบถ้วยของ Swift วัดการดรอว์ของเหล็กและการทดสอบ LDH วัดการกระทำของเหล็กภายใต้สภาพความเครียดในระนาบ(Plane strain)

การทดสอบรูปถ้วยของโอลเซนวัดการกดลึกสูงสุดของพunchแบบครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm. เข้าในส่วนที่ถูกจับยึดแผ่นแบลงก์เรียบของเหล็ก จะได้ค่าความลึกของพunchที่ทำให้เสียหาย การทดสอบอีริคเซนก็เหมือนกันแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพunch 20 mm. ความรู้ความชำนาญมีการแสดงให้เห็นว่าการทำงานที่จริงจังกกับการใช้เครื่องทดสอบที่เฉพาะอย่างสามารถให้ผลการทดสอบแบบถ้วยของโอลเซนหรืออีริคเซนต่อการประเมินการยืดของเหล็กได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม สหสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบและผลงานของเหล็กในการขึ้นรูปโลหะแผ่นจำนวนมากได้ผลไม่ค่อยดีนัก

การทดสอบแบบถ้วยของ Swift เพื่อกำหนดแผ่นแบลงก์กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่สามารถดรอว์เข้าไปในถ้วยกันเรียบได้ประสบความสำเร็จโดยใช้แม่พิมพ์เส้นผ่านศูนย์กลางปกติ 100 mm. ขนาดความโตอื่นๆจะถูกใช้ด้วยเหมือนกัน ผลลัพธ์ที่ได้แน่นอนคืออัตราส่วนการดรอว์จำกัด(LDR):

$$LDR = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์สูงสุด}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปถ้วย}} \quad (10)$$

LDR คือการวัดความสามารถการดรอว์ของเหล็กและผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันดีกับค่า r

การทดสอบ LDH เป็นการวัดความต้านทานของเหล็กต่อการเสียหายภายใต้สภาวะความเครียดในระนาบ ตัวอย่างขึ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากยาว 180 mm. ความกว้างที่กำหนดในการทดลองประมาณ 135 mm. ถูกจับยึดแน่นและถูกยืดให้เกิดความเสียหายด้วยพunchครึ่งทรงกลมขนาด 100 mm. ความกว้างขึ้นทดสอบเป็นความกว้างที่พบต่อความสูงต่ำสุดของผลิตภัณฑ์ในการทดสอบ ความสูงต่ำสุดนี้คือค่า LDH สำหรับวัสดุ

ค่า LDH แสดงความสัมพันธ์กับการกระทำของแผ่นเหล็กในการยืดขึ้นส่วนประตูรถยนต์ได้ดี ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายอย่างปกติภายใต้สภาพความเครียดในระนาบ แต่จะไม่ดีกับแผ่นเหล็กในการตีดรอว์ประตูรถยนต์

การทดสอบการขึ้นรูปโดยวิธีการจำลองทั้งหมดมีการแปรผันโดยแรงเสียดทานระหว่างโลหะแผ่นและเครื่องมือที่ใช้ ปัญหาที่เกิดขึ้นเพราะว่าปัจจัยของแรงเสียดทานแปรเปลี่ยนใน

การขึ้นรูปโลหะแผ่น ในวิธีปฏิบัติขั้นทดสอบและเครื่องมือควรทำความสะอาดด้วยน้ำมันแรบบาง ๆ และ เช็ดให้แห้งก่อนการทดสอบ เตรียมการปฏิบัติให้มีการหล่อลื่นอย่างเพียงพอเพื่อป้องกันผลกระทบ กับการยึดติดแน่นขณะที่ผลของการหล่อลื่นมีค่าน้อยลง

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagrams)

ชาญ ฤกษ์งาน (2547 : 266) กล่าวว่า ในปัจจุบันนี้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็น เครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่น แต่อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จ ในการใช้งานนั้นต้องมีความรู้และประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอย่างเพียงพอ

1. ประวัติและนิยาม

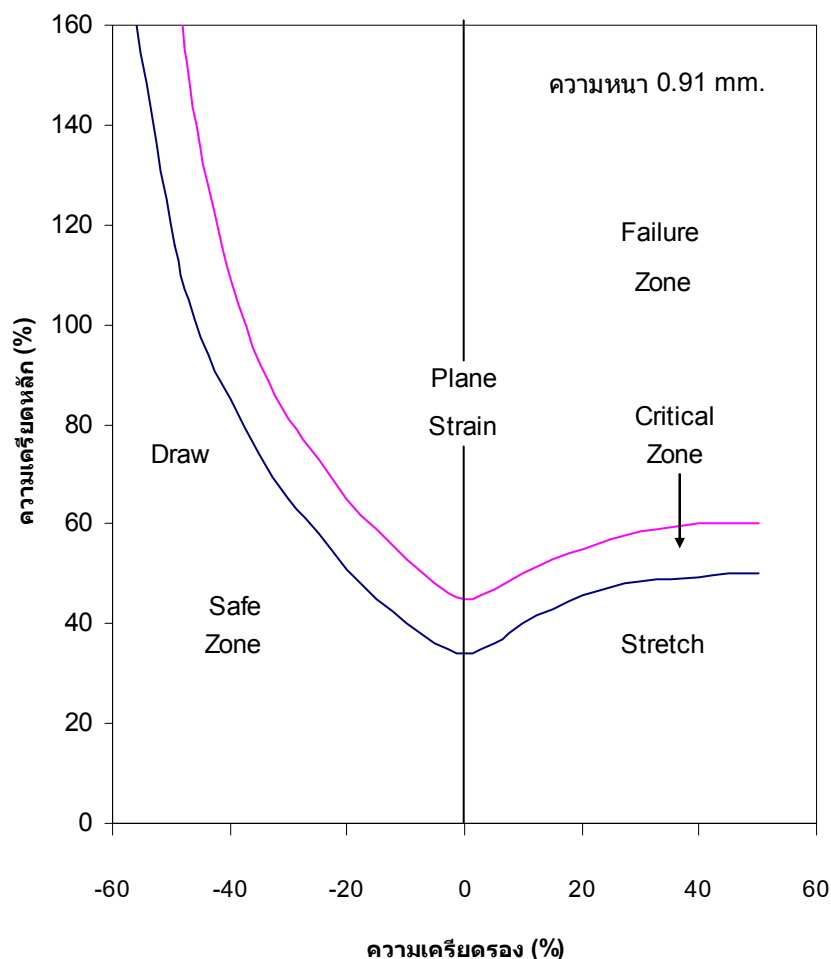
บานาบิก; และคนอื่นๆ(Banabic; et al. 2000 : 189-208) กล่าวว่า ค่าความเครียด สูงสุดของความเครียดหลัก(ϵ_1)และความเครียดรอง(ϵ_2) สามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดที่ เกิดการคอดและการแตกบนแผ่นโลหะด้วยการใช้กริดวงกลม การวิจัยทางด้านนี้ Keeler เป็นผู้ บุกเบิกก่อนในปี คศ. 1961 และเผยแพร่สู่สาธารณะชนในปี คศ. 1965 โดยการพล็อตความเครียด หลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอด และการแตกหลังการยืดแบบสองแกน(Biaxial stretching, $\epsilon_1 > 0; \epsilon_2 > 0$) หลังจากนั้น Goodwin ทำ การวิจัยในปี คศ. 1968 โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบๆบริเวณการดึงและการกด($\epsilon_1 > 0; \epsilon_2 < 0$) โดยใช้ การทดสอบทางเชิงกลที่แตกต่างกัน ดังนั้นแผนภาพของ Keeler และ Goodwin จึงใช้ร่วมกัน ต่อมา เรียกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

2. การวิเคราะห์กริดวงกลม(Circle grid analysis)

การทดสอบการดึงตามแนวแกนเพื่อกำหนดสมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กภายใต้การ ควบคุมอย่างปิด สภาพไม่มีแรงเสียดทาน ซึ่งความแตกต่างจากเงื่อนไขนั้นเกิดขึ้นเป็นปกติระหว่าง การขึ้นรูปแผ่นโลหะ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบจะอาศัยประสบการณ์และความชำนาญซึ่งสัมพันธ์ กับความสามารถของเหล็กต่อความสำเร็จในการขึ้นรูปขึ้นงาน ความสัมพันธ์จะไม่เกิดขึ้นเพียงอย่าง เดียวตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนที่แสดงในภาพประกอบ 1 แสดงความแตกต่างของค่า r และค่า n ของ เหล็กสำหรับกระบวนการที่ประสบความสำเร็จด้วยวิธีปฏิบัติ สมบัติเชิงกลที่ต้องการต่อรูปร่างที่ง่าย กับการขึ้นรูปสามารถประมาณได้ แต่ถ้าสมบัติที่ต้องการต่อการขึ้นรูปด้วยรูปร่างที่ซับซ้อนมากกว่า สามารถทำได้ตามที่กำหนดโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยกริดวงกลม

การวิเคราะห์กริดวงกลมรูปแบบประกอบด้วยระยะห่างอย่างสม่ำเสมอ มีขนาดวงกลม เท่ากัน(ปกติเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 หรือ 5 mm.) ใช้กรัดกดบนแผ่นเรียบของเหล็กและขึ้นรูปด้วยวิธี ที่น่าพอใจ กริดวงกลมบนแผ่นแบลงก์เหล็กจะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาด โตสุด(ความเครียดหลัก)และขนาดต่ำสุด(ความเครียดรอง) ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบน แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังภาพประกอบ 5 ตำแหน่งด้านขวา(การยืด)หรือด้านซ้าย(การดรอว์)

ของแผนภาพระบุเงื่อนไขความเครียดในเหล็ก ขนาดความเครียดทั้งหมดสามารถลดลงได้โดยการเปลี่ยนเงื่อนไขการขึ้นรูปของโลหะแผ่น



ภาพประกอบ 5 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm.

3. ระดับความเครียดสูงสุด: แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

เหล็กกล้าแต่ละชนิดสามารถเปลี่ยนรูปได้ถึงระดับหนึ่งเท่านั้นก่อนเกิดการบางลงเฉพาะที่(การคอด)และการแตก โดยส่วนใหญ่แล้วการเปลี่ยนรูปนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความเครียดที่ผสมกัน นั่นคืออัตราส่วนของความเครียดหลักและความเครียดตรง ระดับต่ำสุดเกิดขึ้นใกล้เคียงกับความเครียดในระนาบเมื่อความเครียดตรงเป็นศูนย์

ข้อมูลเหล่านี้นำมาแทนด้วยกราฟเป็นครั้งแรกเรียกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นกราฟของความเครียดหลักกับความเครียดตรงขณะที่เริ่มเกิดการคอด ภาพประกอบ 5 แสดงตัวอย่างของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้า แผนภาพนี้ได้จากการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นผสมกัน โดยปกติทำได้โดยใช้กริดวงกลม(Circle grids) เพื่อกำหนดการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นใกล้กับตำแหน่งความเสียหายหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากวัสดุอ่อนคุณภาพหรือแม่พิมพ์ไม่ดี

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในภาพประกอบ 5 สำหรับแผ่นเหล็กคุณภาพการดรอว์ความหนา 0.91 mm. เส้นโค้งในพื้นที่วิกฤติจะต่ำกว่าสำหรับเหล็กที่บางกว่าและสูงกว่าสำหรับเหล็กที่หนากว่า เส้นโค้งสามารถจะปรับให้เข้าหากันได้กับเหล็กคุณภาพเพื่อใช้ประโยชน์ทางการค้าและเกรดอื่นๆด้วยค่า n ต่ำกว่าเหล็กคุณภาพการดรอว์ การปรับทำได้โดยย้ายจุด Plain strain (FLD₀) หรือจุดที่เส้นโค้งต่ำสุดที่ความเครียดตรง 0% จุดที่พล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแสดงขนาดของความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นเหล็กที่ผ่านขบวนการผลิตเข้าไปในรูปร่างโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถแสดงสภาพความเครียดที่จะเกิดขึ้นในเหล็กอื่นๆได้ด้วยเพื่อให้เกิดความสำเร็จกับการทำขึ้นส่วนในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นในทางปฏิบัติจะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดสมบัติเชิงกลของเหล็กเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกริดวงกลมเพราะว่าความเครียดที่สูงเกินไปแสดงว่าเหล็กสามารถขึ้นรูปได้ เป็นการขึ้นรูปที่ควรจะต้องเปลี่ยนวิธีการผลิตเพื่อให้เป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

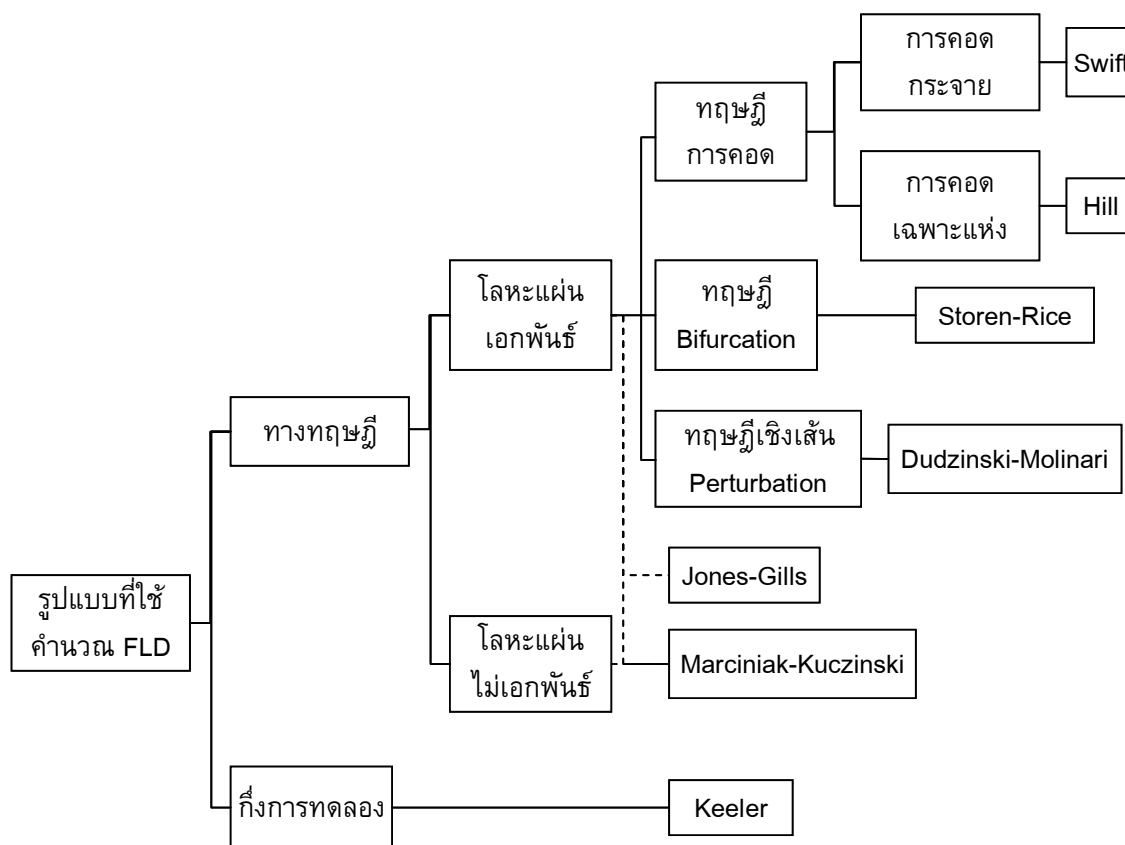
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำส่วนมากมีรูปร่างของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหมือนกันดังแสดงในภาพประกอบ 5 แต่ตำแหน่งในแนวตั้งของเส้นโค้งขึ้นอยู่กับความหนาและค่า n ของแผ่นโลหะ จุดตัดของเส้นโค้งกับแกนตั้งซึ่งแทนความเครียดในระนาบและเป็นจุดต่ำสุดของเส้นโค้งด้วย จุดตัดเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับความหนาจนกระทั่งถึงความหนาประมาณ 3 mm. อัตราการเพิ่มสูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่า n จนกระทั่ง $n = 0.2$ ถัดไปจากขีดจำกัดนี้แล้วเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ค่า n จะมีผลต่อตำแหน่งของเส้นโค้งน้อยมาก ค่า m ก็ทำให้ระดับของขีดจำกัดการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น

รูปร่างของเส้นโค้งสำหรับอะลูมิเนียมเจือ ทองเหลืองและวัสดุอื่นที่แตกต่างจากภาพประกอบ 5 แปรผันไปตามชนิดของธาตุเจือ ความหนา ค่า n , หรือค่า m , เพิ่มขึ้นทำให้ตำแหน่งของเส้นโค้งเปลี่ยนแปลงและเพิ่มสูงขึ้น แต่โดยทั่วไปอัตราการเพิ่มไม่เหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปยังขึ้นอยู่กัประวัติความเครียด (Strain path) แผนภาพมาตรฐานเป็นการประมาณบนพื้นฐานของวิถีความเครียดสม่ำเสมอ แผนภาพสร้างขึ้นโดยทำให้เกิดความเครียดทิศทางเดียวตามด้วยความเครียด 2 ทิศทางหรือกลับทิศทาง จะมีความแตกต่างจากแผนภาพมาตรฐานมาก ดังนั้นผลของวิถีความเครียดจะต้องนำมาคิดรวมด้วยเมื่อใช้แผนภาพในการวิเคราะห์ปัญหาการขึ้นรูป

4. รูปแบบทฤษฎีสำหรับคำนวณแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

รูปแบบทฤษฎีต่างๆ ได้มีการพัฒนาสำหรับการคำนวณแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเสนอโดย Swift และ Hill ซึ่งสมมุติฐานว่าโลหะแผ่นมีสมบัติเป็นเอกพันธ์ (รูปแบบดังกล่าวคือ Diffuse necking และ Localized necking) Marciniak เสนอรูปแบบของโลหะแผ่นไม่เป็นเอกพันธ์ในมุมมองเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตและทางด้านโครงสร้าง Dudzinski และ Molinari ใช้วิธีของ Linear perturbation สำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งของความเครียดและคำนวณความเครียดจำกัด แต่รูปแบบของทฤษฎีค่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อนและผู้นักปฏิบัติงานต้องมีความรู้ความชำนาญอย่างลึกซึ้งทางด้านคณิตศาสตร์ ขณะที่ผลลัพธ์จะไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง บ้างครั้งรูปแบบก็อาจขัดแย้งจากประสบการณ์ได้มีการพัฒนาให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า



ภาพประกอบ 6 รูปแบบทฤษฎีสำหรับคำนวณแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

5. อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Factor in Fluencing the FLD)

อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพประกอบ 7 เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีเส้นโค้งเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปได้ถูกต้องและเที่ยงตรง ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จึงต้องระมัดระวังและปรับให้เข้าหากันกับการขึ้นรูปจริงในชิ้นส่วนอุตสาหกรรม

5.1 ความหนาแผ่นโลหะ

นอกจากการใช้แผ่นโลหะคุณภาพสูงแล้ว การแก้ปัญหาอย่างง่ายที่สุดสำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ไม่ประสบความสำเร็จก็คือการเพิ่มความหนาแผ่นโลหะ อิทธิพลของความหนาแผ่นโลหะกับลักษณะของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

5.1.1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับการคอดขึ้นอยู่กับความหนาแผ่นโลหะ

5.1.2 เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น เส้นโค้งที่เกิดจากการพล็อต ($\epsilon_1 : \epsilon_2$) จะเพิ่มขึ้น

5.1.3 ความสูงมีอิทธิพลสำหรับการขยายออกอย่างเดียวและไม่มีผลสำหรับการกด

อย่างเดียว

5.1.4 อิทธิพลของความหนากับการจำกัดความเครียดที่เกิดการคอดระหว่าง 2 จุดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงด้วยอัตราส่วน ϵ_1/ϵ_2

5.1.5 วิธีความเครียดที่เป็นเส้นตรงในแนวเดียวกันกับที่เพิ่มขึ้นของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการเพิ่มความหนาแต่จะไม่มีผลเมื่อเกินจุดวิกฤต

ถ้ากระบวนการขึ้นรูปไม่ประสบความสำเร็จ สามารถตัดสินใจปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาแผ่นโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเป็นแรงดึงในทิศทางหลักทั้งสองทิศทาง

5.2 ขนาดกริด(Grid size)

กริดวงกลมเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ความเครียดที่วัดคือค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงบนระยะทางที่เท่ากันกับค่า d ดังนั้นในบริเวณใกล้เคียงของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น (Strain gradient) สามารถแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงขนาดกริดให้เล็กลงเพื่อกำหนดแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป สำหรับการคอดความเครียดที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างต่ำ ผลกระทบของขนาดกริดบนผลลัพธ์การทดสอบจะเปลี่ยนแปลงน้อย อย่างไรก็ตาม แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของการแตกหักความเครียดที่เพิ่มขึ้นจะสูงกว่า Sanz และ Grumbach ได้ศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางบนค่าที่หาได้ของ ϵ_1 และ ϵ_2 ใช้รัศมีของกริดช่วง 0.5 - 5 mm. ผลลัพธ์ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกริดวงกลมมีอิทธิพลอย่างมากกับความเครียดที่หาได้ในทิศทางของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ความเครียดที่อยู่ข้างๆ อาจจะหาได้โดยไม่ยอมรับทั้งหมด

5.3 วิธีความเครียด(Strain path)

เมื่อได้มีการจำกัดความเครียดเกิดขึ้น แนวเส้นของการเปลี่ยนรูปสามารถพล็อตได้ ซึ่งจะเริ่มต้นที่จุดตัดของแกนทั้งสอง จากการทดลองพล็อตแนวเส้นสรุปได้ดังนี้

5.3.1 แนวเส้นเป็นเส้นที่ได้ตามความยาวที่ไม่ปรากฏขึ้นจนถึงรอยคอดหรือรอยแตก ในกรณีนี้ขนาดของกริดวงกลมมีอิทธิพลกับค่าที่วัดได้

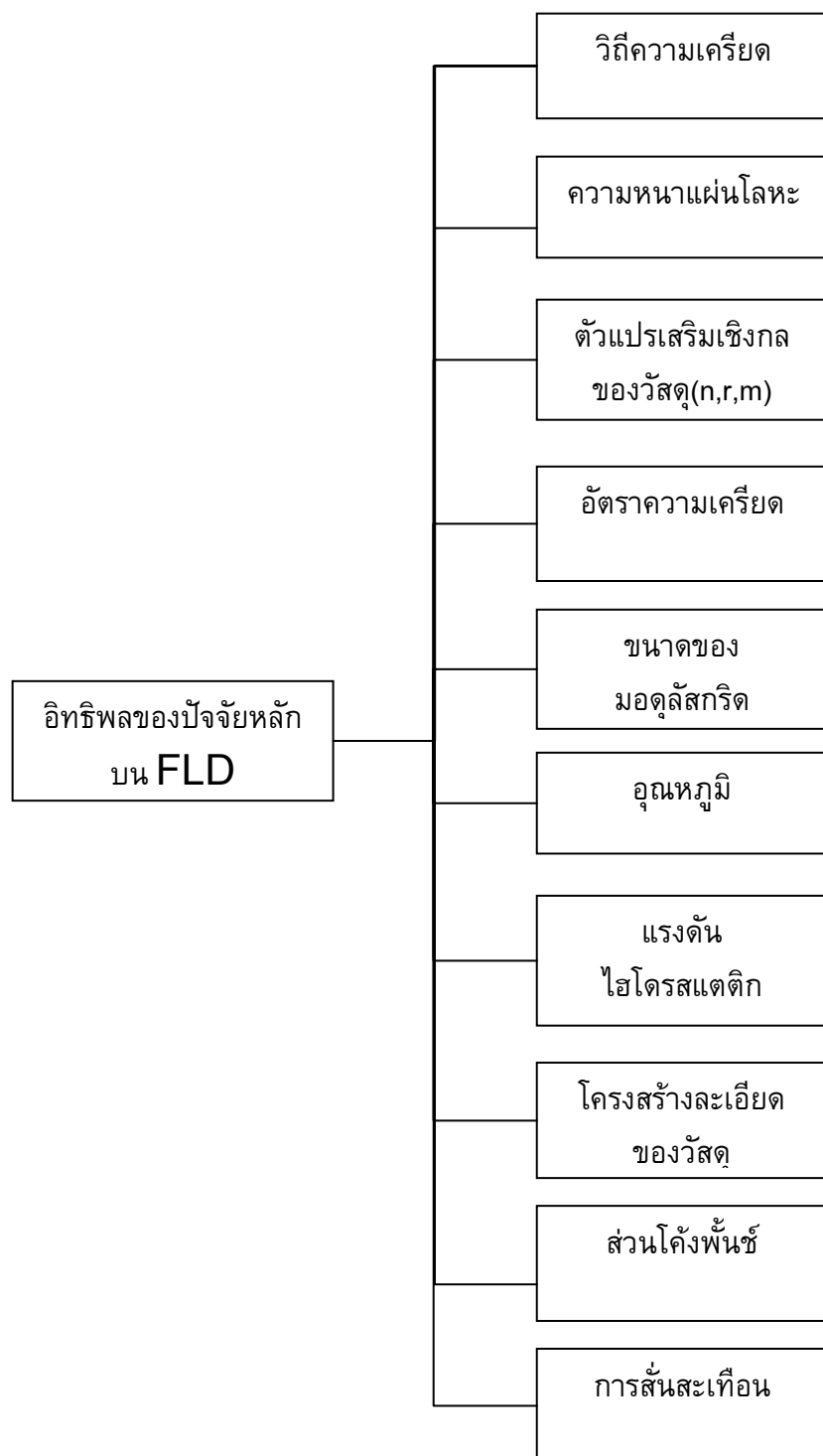
5.3.2 ความชันของแนวเส้นจะคล้ายกันกับการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย

5.3.3 ความชันของแนวเส้นจะคล้ายกันกับการทดสอบรอยโป่งไฮดรอลิค โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีส่วนโค้งกดยึดพร้อมกัน มีความเค้นแรงดึงสองแกนเท่ากัน

Kikuma กล่าวว่าอิทธิพลของวิธีความเครียดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นกรรมวิธีซึ่งต้องการสภาพหลายอย่างๆที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับชิ้นงาน

5.4 สมบัติเชิงกล(Mechanical properties) ทั้งหมดมีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสิ้น แต่สมบัติหลักๆที่สำคัญคือ ค่า n , r , m , เป็นต้น

5.5 ตัวแปรเสริมอื่นๆ(Other parameters) นอกจากอิทธิพลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น อิทธิพลอื่นๆที่มีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

การวิเคราะห์ปัญหาของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สมชาย สิงห์โต (2544 : 1,13-14) กล่าวว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ปัญหาของเอลิเมนต์ที่มีการแยกชิ้นส่วนไว้แล้ว(Discrete element) ได้แก่ ปัญหาทางโครงสร้าง(Structure) และปัญหาของเอลิเมนต์ที่มีความต่อเนื่อง(Continuum element) ได้แก่ ปัญหาของการถ่ายเทความร้อน กลศาสตร์ของไหลและกลศาสตร์ของแข็ง ซึ่งทั้งสองประเภทจะมีการแบ่งเป็นเอลิเมนต์ จุดที่ต่อกันระหว่างเอลิเมนต์เรียกว่าจุดต่อ(Node) โดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา การแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ที่สร้างขึ้นจากสมการเชิงอนุพันธ์หรือทฤษฎีพลังงาน มี ลักษณะที่แตกต่างจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขอื่นอยู่ 2 ประการคือ การใช้ประโยชน์ของรูปแบบการอินทิกรัล(Integral formulation) เพื่อให้ได้ระบบของสมการพีชคณิตระบบหนึ่ง และการใช้ฟังก์ชันต่อเนื่องเป็นช่วงปรับเรียบ(Continuous piecewise smooth function) เพื่อประมาณตัวไม่รู้ค่าทั้งหลาย ซึ่งผลเฉลยโดยประมาณ(Approximate solution) จะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและมีจำนวนอนุพันธ์ที่ต่อเนื่องไม่จำกัด ทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าได้ถึงแม้จะเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ต่อเนื่องเป็นช่วง

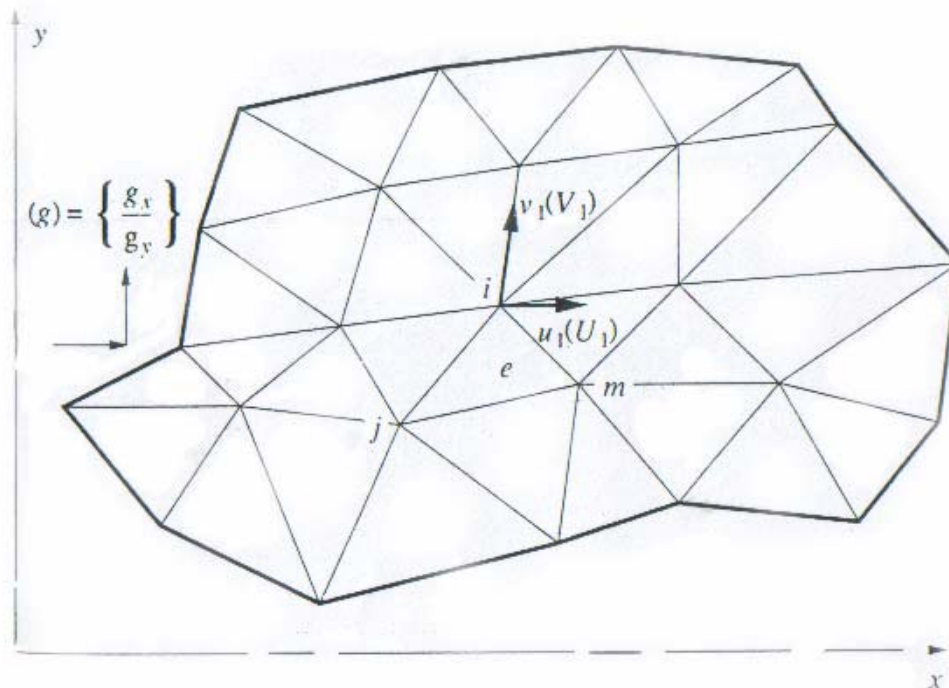
ดิลก ศรีประไพ (2542 : 3-6) กล่าวว่า หลักการแปรผัน(Variational principle) ของกลศาสตร์เช่นหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด(Principle of minimum potential energy) ใช้ในการหาแบบสมการสมดุลของแต่ละเอลิเมนต์ แรงช่วงยืดหยุ่นของพลังงานศักย์ในชิ้นงานหรือโครงสร้างเป็นผลรวมของพลังงานที่เก็บไว้ในต่อผลลัพธ์ของการเปลี่ยนรูปและพลังงานศักย์ของแรงภายนอก ถ้าสถานะสมดุลพลังงานจะมีค่าต่ำ ซึ่งการใช้หลักการนี้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปขั้นตอนในการแก้ปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งได้ 6 ขั้นตอนคือ

1. การแบ่งแยกส่วนที่ต่อเนื่องกัน(Discretization of the continuum) คือการแบ่งแยกชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ตลอดทั้งชิ้นงาน ในกรณี 2 มิติเอลิเมนต์อาจจะเป็นสามเหลี่ยม กลุ่มของสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยม ภาพประกอบ 8 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ
2. การเลือกรูปแบบของการกระจัด(Selection of the displacement models)
3. การหาเอลิเมนต์แมทริกซ์ความแข็งเกร็ง(Element stiffness matrix) โดยใช้หลักการแปรผัน(Variational principle)

$$[k]\{x\} = \{F'\} \quad (11)$$

4. สมการพีชคณิตที่ประกอบเข้าด้วยกันสำหรับส่วนแยกที่ต่อเนื่องกันทั้งหมด

$$[K]\{U\} = \{R\} \quad (12)$$



ภาพประกอบ 8 รูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ

5. วิธีการแก้ไขสำหรับการกระจัดที่ไม่รู้ค่า (Solution for unknown displacements)

6. การคำนวณของเอลิเมนต์ความเค้นและความเครียดที่ตรงกันกับการคำนวณการกระจัดที่จุดต่อ

ตัวอย่างเช่น ช่วงยืดหยุ่นที่ไม่ซับซ้อน (Simple elastic) ความเค้นในระนาบ (Plane stress) ความเครียดในระนาบ (Plane strain) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. แบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์ดังแสดงในภาพประกอบ 8 เอลิเมนต์ e กำหนดจุด i , j , m ซึ่งเส้นขอบเขตเป็นเส้นตรง

2. กำหนดการกระจัดที่จุดใดจุดหนึ่งภายในเอลิเมนต์เป็นเวกเตอร์ในแนวคอลัมน์ (Column vector) $\{f(x, y)\}$:

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_m & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$[N]$ = ตำแหน่งของฟังก์ชัน(Function of position)

$\{\delta\}^e$ = การกระจัด(Nodal displacement)ที่จุดในเอลิเมนต์ e

ในกรณีของความเค้นในระนาบ(Plane stress) ซึ่งแทนการเคลื่อนย้ายในแนวตั้งและแนวนอนของจุดภายในเอลิเมนต์

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

การกระจัด(Displacements) ที่จุด i

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (15)$$

ฟังก์ชัน N_i, N_j, N_m เป็นการกระจัดของจุดที่เหมาะสม ใส่แทรกในสมการ (13)

ในกรณี $N_i(x_i, y_i) = 1$ (Identity matrix) และ $N_i(x_i, y_i) = N_i(x_m, y_m) = 0$ ซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันเชิงเส้นที่เหมาะสมของ x และ y

3. เปลี่ยนการกระจัดภายในเอลิเมนต์เข้าไปในความเครียดโดยใช้ความสัมพันธ์ทั่วไป เขียนในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของแมทริกซ์(Matrix notation)

$$\epsilon = \{\epsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (16)$$

สำหรับความเครียดในระนาบ(Plane strain, $\{\epsilon\}$) คือเวกเตอร์ความเครียด

$$\epsilon = \{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$[B]$ คือแมทริกซ์จำนวนเซต(Set of number) ซึ่งสัมพันธ์ต่อความเครียดกับการกระจัด เช่น $b_i = y_i - y_m$ สำหรับกรณีของสามเหลี่ยมเท่านั้น และตัวคูณ $\frac{1}{2}\Delta$ แทนตำแหน่งส่วนปลายของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m}{2\Delta} \quad (18)$$

u = การกระจัด และพื้นที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมคือ

$$\Delta = x_i y_m + x_m y_i + x_i y_i - (x_m y_i + x_i y_m + x_i y_i) \quad (19)$$

[B] คือแมทริกซ์ที่หาได้จากสมการ (16) เมื่อฟังก์ชัน N_i, N_j, N_m ได้กำหนดมาให้

4. เปลี่ยนความเครียดไปเป็นความเค้นเฉพาะแห่ง(Local stress) โดยใช้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (20)$$

หรือในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของความสมบูรณ์(Equivalent notation)

$$\sigma = D \varepsilon \quad (21)$$

กรณีความเครียดในระนาบช่วงยืดหยุ่นเมื่อ τ_{xz}, τ_{yz} และ $\varepsilon_{zz} = 0$, $G = E / 2(1 - \nu)$ สามารถเขียนสมการได้

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{xx} + \frac{E\nu}{1 - \nu^2} \varepsilon_{yy} + 0 \quad (22)$$

$$\sigma_y = \frac{E\nu}{1 - \nu^2} \varepsilon_{xx} + \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{yy} + 0 \quad (23)$$

$$\tau_{xy} = 0 + 0 + \frac{E}{2(1 - \nu)} \varepsilon_{xy} \quad (24)$$

เขียนในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของแมทริกซ์(Matrix notation) จากรูปสมการ (20) ที่กำหนด $\{\sigma\}, [D]$, และ $\{\varepsilon\}$ จะได้

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{E}{1 - \nu^2} & \frac{E\nu}{1 - \nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1 - \nu^2} & \frac{E}{1 - \nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1 - \nu)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

[D] คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่เหมาะสมที่บรรจุในแมทริกซ์การยืดหยุ่น(Elasticity matrix) นั่นก็คือค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น(E) และอัตราส่วนปัวซอง(ν) แทนใน [D]

$$D = [D] = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1 - \nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

วัสดุเป็นไอโซทรอปิกช่วงยืดหยุ่น สมการที่สำคัญสำหรับความเครียดในระนาบคือ

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (27)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (28)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} = 0 \quad (29)$$

แก้สมการ (29) แล้วนำค่า σ_z แทนในสมการ (27) และ(28) ทำให้สมการ $\varepsilon_{xy} - \tau_{xy}$ เพิ่มขึ้น สมการความเครียดในระนาบรูปแมทริกซ์คือ

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1 - \nu^2}{E} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-\nu}{1 - \nu} & 0 \\ \frac{-\nu}{1 - \nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1 - \nu} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

ในทางกลับกันจะได้

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1 - 2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

แต่ความเครียดสัมพันธ์กับการกระจัดจากสมการ (16) ดังนั้นความเค้นสามารถสัมพันธ์กับการกระจัดตามสมการแมทริกซ์

$$\{\sigma\} = [B][D]\{\delta\}^e \quad (32)$$

5. กำหนดแรงของเอลิเมนต์จากการกระจัด สมมุติฐานว่าแรงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการกระจัดก่อนการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น(Elastic) ให้แรงตรงส่วนปลายของเอลิเมนต์ e ในภาพประกอบ 8 , U_i คือการกระจัดเชิงเส้น
ความสัมพันธ์ของแรงและการกระจัดคือ

$$\{f'\} = [C]\{u_i\} \quad (33)$$

สมมุติฐานว่าแรงทั้งหมดกระทำที่จุดของเมช(Mesh)ในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ค่าคงที่จะอยู่ในเทอมทั่วไปคือ

$$2\{f'\} = t[A]\{\sigma\} \quad (34)$$

$[A]$ คือแมทริกซ์ที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของตำแหน่งจุด i,j และ m ดังภาพประกอบ 8 ซึ่งก็คือการสลับตำแหน่ง(Transpose)แมทริกซ์ B ในสมการ(32) ไม่นับรวมตัวคูณ $\frac{1}{2} \Delta$ ซึ่งเป็นการปรับตำแหน่งของจุดต่อ Δ คือพื้นที่เอลิเมนต์ในเทอมของค่า x_i, x_j, x_m, y_i, y_j , และ y_m

$$\{f'\} = [B]^T [D][B] t \Delta \{\delta\} \quad (35)$$

หรือ
$$\{f'\} = [k]\{\delta\} \quad (36)$$

$[k]$ คือแมทริกซ์ความแข็งเกร็งของเอลิเมนต์

6. พิจารณาแรงภายนอกที่กระทำในระบบทั้งหมด ความสัมพันธ์ของแรงกับการกระจัดสำหรับทั้งระบบคือ

$$\{F'\} = [K]\{\delta\} \quad (37)$$

เมื่อ F แทนแรงภายนอกที่กระทำบนจุดแต่ละจุดของเมชสามเหลี่ยมทั้งหมด $[\delta]$ แทนการกระจัดแต่ละจุดจะได้

$$[K] = [k]_N = [B]_N^T [D]_N [B]_N t \Delta \quad (38)$$

$[k]_N$ คือองค์ประกอบของแมทริกซ์ความแข็งเกร็งแต่ละค่าซึ่งประกอบเป็นแมทริกซ์ความแข็งเกร็งรวม(Global stiffness matrix, $[K]$) ด้วยกำลัง T คือ Transpose ถ้ารู้ค่าของแรงสามารถคำนวณได้จาก

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F'\} \quad (39)$$

แต่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นวัสดุจะเป็นพลาสติก(Plasticity) ดังนั้นการรวมแมทริกซ์ช่วงอีลาสติก-พลาสติก(Elasticity-Plasticity) คือ

$$D_{e,p}^* = D - D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot D \cdot \left[A + \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad (40)$$

$D_{e,p}^*$ คือการวิเคราะห์ทำนองเดียวกันกับแมทริกซ์ D ช่วงอีลาสติกในสมการ(26)

การแปลงเป็นสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

สูตรการแปรผัน(Variational formulation)ที่ใช้ในการวิเคราะห์ก่อนช่วงพลาสติกความแข็งเกร็ง(Rigid-Plastic)ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นการวิเคราะห์ที่ยังไม่เพียงพอเพราะว่ารูปแบบการเปลี่ยนรูปไม่ได้มีแบบเดียวเหมือนกับการเปลี่ยนรูปในทางสถิตยศาสตร์(Static)ของของแข็งช่วงพลาสติกความแข็งเกร็ง(Rigid-Plastic solid)ภายใต้ชนิดของเงื่อนไขขอบ ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนอกจากระนาบ(Out-of-plane)เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงเรขาคณิตระหว่างการเปลี่ยนรูป

ถ้าฟังก์ชันทั้งหมดที่เท่ากับผลรวมของตัวสนับสนุนแต่ละเอลิเมนต์ $\phi^{(m)}$ รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่หาได้โดยการประมาณฟังก์ชัน π โดยให้ ϕ เท่ากับ

$$\pi \cong \phi = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)} u^{(m)} \quad (41)$$

เมื่อ $u^{(m)}$ คือเวกเตอร์การกระจัดที่เพิ่มเข้ามา(Incremental displacement vector)จุดที่สัมพันธ์กับเอลิเมนต์ที่ m

โดยสมมุติให้ความเค้นและงานเสมือนหลักสมมูล(Principle of virtual work) แกนหลักของความเครียดจริงอยู่ในทิศทางเดียวกันกับแผ่นเอลิเมนต์ องค์ประกอบหลักของอัตราความเครียด

ยังคงไว้ที่อัตราส่วนคงที่ระหว่างช่วงเวลาการเพิ่มทีละเล็กน้อย ฟังก์ชัน ϕ สามารถหาได้โดยรูปแบบรอบแกนสมมาตรของแผ่นบางตามแนวแรง

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \left(d\bar{E} \right) t dA + \frac{1}{2} \int H' \left(d\bar{E} \right) t dA - \int (T + dT) du_j dA \quad (42)$$

$$\text{เมื่อ } d\bar{E} = \sqrt{\frac{2}{3} \Sigma (dE_p)^2}$$

dE_p = องค์ประกอบลอการิทึมความเครียดพลาสติก(Logarithmic plastic strain component)

$\bar{\sigma}$ = ความเค้น(Effective stress)

t = ความหนา(Local sheet thickness)

dA = พื้นที่เพิ่มขึ้นของเอลิเมนต์

$$dV = t dA$$

$H' = d\sigma / d\varepsilon$ = ความชันของเส้นโค้งความเค้นความเครียด

T = แรง(Traction force)

du_j = การกระจัดที่เพิ่มขึ้นของเอลิเมนต์

ในสมการ (42) เทอมแรกการเปลี่ยนรูปเนื่องจากขนาดพลังงานความเครียด(Strain energy) เทอมที่สองแทนพลังงานความเครียดที่เกี่ยวข้องกับการทำให้แข็งด้วยความเครียด เทอมที่สามแทนงานที่มาจากความเค้นภายนอก(External traction, stresses)

ถ้าทิศทางการเคลื่อนที่รอบวง(Circumferential direction)และทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบแกนใดๆ(Meridian direction)เป็นทิศทางหลัก แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวรูปโดม(Dome)กับตายในการขึ้นรูปมีน้อยมาก ทิศทางแนวความหนาเป็นทิศทางที่สาม ความเครียดลอการิทึมที่เพิ่มขึ้นอาจจะวัดความเครียดได้จาก

$$dE = \begin{Bmatrix} dE_r \\ dE_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} dE_r \\ dE_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ln s / s_0 \\ \ln r / r_0 \end{Bmatrix} \quad (43)$$

ถ้าการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้น s_0 คือความยาวเอลิเมนต์ที่ไม่เปลี่ยนรูป s คือความยาวที่มีการยืดตัว r_0 คือรัศมีก่อนการเปลี่ยนรูป r คือรัศมีที่มีการเปลี่ยนรูป ตัวห้อย r และ θ แทนทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบแกนใดๆ(Meridian direction) และทิศทางการเคลื่อนที่รอบวง(Circumferential direction) ตามลำดับ

ตามความจริงโลหะแผ่นมีสมบัติของทิศทางที่สมมุติฐานเป็นแอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก (Normal anisotropy) ความเค้นและความเครียดที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับเกณฑ์ของ ฮิลล์(Hill) จะได้

$$\frac{dE_r}{(1+R)\sigma_r - R\sigma_\theta} = \frac{dE_\theta}{(1+R)\sigma_\theta - R\sigma_r} = \frac{d\bar{E}}{(1+R)\bar{\sigma}} \quad (44)$$

เมื่อ R คือตัวแปรของไอโซทรอปีแนวระนาบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนลอการิทึมของความเครียด แนวความกว้างต่อลอการิทึมของความเครียดแนวความหนาในทิศทางการดึงตามแนวแกน $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้น(Effective stress) $d\bar{E}$ คือความเครียด(Effective strain) หาได้จาก

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \frac{2R}{1+R}\sigma_r\sigma_\theta + \sigma_r^2} \quad (45)$$

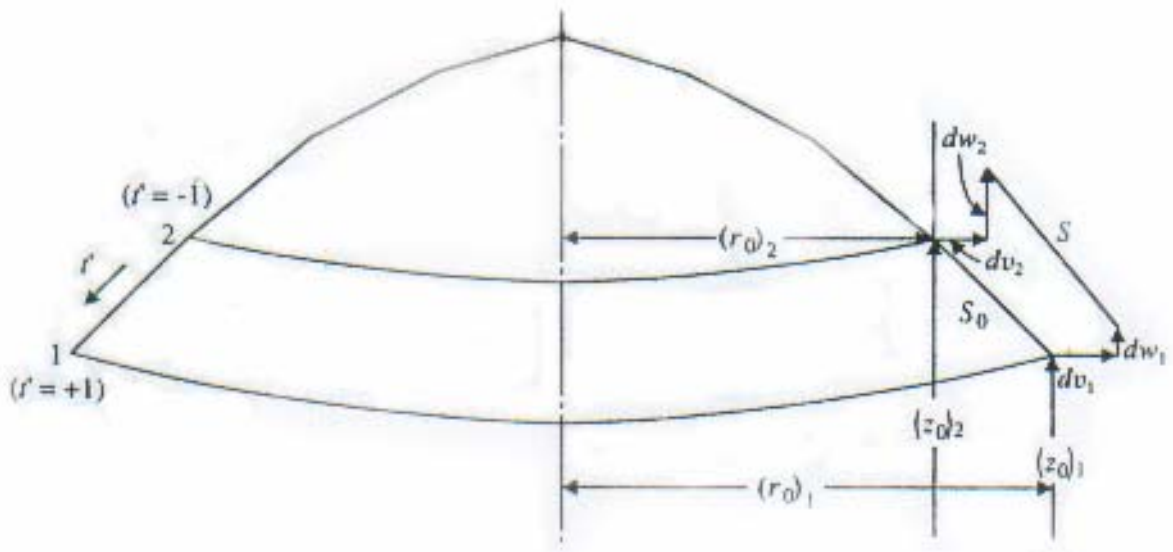
$$d\bar{E} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{dE_r^2 + \frac{2R}{1+R}dE_\theta dE_r + d\bar{E}_\theta^2} \quad (46)$$

ความเครียด(Effective strain, $d\bar{E}$) สามารถเขียนในรูปของแมทริกซ์คือ

$$d\bar{E} = \sqrt{\frac{2}{3}} [dE^T D dE]^{1/2} \quad (47)$$

เมื่อ $dE = (dE_r, dE_\theta)^T$

$$D = \frac{3(1+R)}{2(1+2R)} \begin{bmatrix} 1+R & R \\ R & 1+R \end{bmatrix}$$



ภาพประกอบ 9 การประมาณรูปเหมือนของโดมครึ่งทรงกลมโดยวิธีอันดับของ Conical frustum

การประมาณรูปทรงเรขาคณิตโดยวิธีอันดับรูปกรวยเฉพาะปลาย ดังแสดงในภาพประกอบ 9 ใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น(Linear function)หรือฟังก์ชันรูปร่าง(Shape function) สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์หรือจุดต่อใดๆที่มีการกระจัดที่เพิ่มขึ้น การกระจัดที่เพิ่มขึ้นในเอลิเมนต์เขียนได้จาก

$$u = \begin{Bmatrix} dv \\ dw \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dv_1 \\ dw_1 \\ dv_2 \\ dw_2 \end{Bmatrix} \quad (48)$$

$$u = Nu^{(m)} \quad (49)$$

เมื่อ t' คือจุดตำแหน่งที่เปลี่ยนจากค่า -1 ที่จุด 2 ไปเป็น $+1$ ที่จุด 1 (ดูภาพประกอบที่ 9.) dv_i และ dw_i คือการกระจัดที่เพิ่มขึ้นของจุด i ในแนวรัศมีและแนวแกนตามลำดับ เนื่องจากการกระจัดเพิ่มขึ้นทั้งหมด ความยาวเอลิเมนต์ s_0 คือ

$$s_0 = \sqrt{\{(r_0)_1 - (r_0)_2\}^2 + \{(z_0)_2 - (z_0)_1\}^2} \quad (50)$$

ความยาวใหม่ที่ยึดตัว s คือ

$$s = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (51)$$

เมื่อ $(r_0)_i$ และ $(z_0)_i$ คือตำแหน่งแนวรัศมีและแนวตั้งของจุด i ที่รูปร่างภายนอกไม่มีการเปลี่ยนรูป $(r)_i$ และ $(z)_i$ คือรูปร่างภายนอกที่มีการเปลี่ยนรูปแต่เอลิเมนต์เป็นเส้นตรงและจุด t' ในตำแหน่งจุดที่แสดงมีรัศมีรวม r_0 กำหนดโดย

$$r_0 = \left(\frac{1+t}{2}\right)(r_0)_1 + \left(\frac{1-t}{2}\right)(r_0)_2 \quad (52)$$

ตำแหน่งใหม่อนุภาคที่เหมือนกันของค่า r กำหนดให้โดย

$$r = r_0 + \left(\frac{1+t}{2}\right)dv_1 + \left(\frac{1-t}{2}\right)dv_2 \quad (53)$$

ใช้สมการ (50-53) ทั้งหมดแทนเข้าไปในขอบเขตการเพิ่มพลังงานความเครียด สามารถหา dE ได้จาก

$$dE = \left\{ \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{\{(r_0)_1 - (r_0)_2 + dv_1 - dv_2\}^2 + \{(z_0)_1 - (z_0)_2 + dw_2 - dw_1\}^2}{s_0^2}}{\ln \frac{r_0 + [(1+t')/2]dv_1 + [(1+t')/2][(1+t')/2]dv_2}{r_0}} \right\} \quad (54)$$

การประมาณการเพิ่มความเครียดโดยวิธี Lagrangian ไม่สลับซับซ้อน โดยลอการิทึมความเครียดระหว่างการเพิ่มทีละเล็กทีละน้อย ที่ได้จากสมการ (43) เมื่อ s_0 , s , r_0 และ r แทนในสมการ (50-53) ทั้งหมด

$\phi^{(m)}$ ในสมการ (41) สามารถแทนในเทอมค่าของจุดต่อ จะได้

$$\phi^{(m)} = \int \bar{\sigma} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) t [dE^T DdE]^{1/2} dA + \frac{1}{2} \int H' \left(\frac{2}{3} t \right) [dE^T DdE] dA - \int \bar{T}^T Nu^{(m)} dA \quad (55)$$

ส่วนมุมของเอลิเมนต์ที่ประกอบรวมอยู่ด้วย เมื่อ $dA = r dt'$, t คือความหนา วิธีแก้สมการเป็นการกระทำจาก $t' = -1$ ถึง $t' = +1$ เมื่อ

$$T = \begin{Bmatrix} T_1 + dT_1 \\ T_2 + dT_2 \\ T_3 + dT_3 \\ T_4 + dT_4 \end{Bmatrix} \quad (56)$$

การทำให้มีค่าน้อยลงของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ Partial derivative ของ $\partial\phi^{(m)} / \partial u^{(m)}$ ให้รูปสมการที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} &= \int \bar{\sigma}\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) t \left[dE^T D dE \right]^{-1/2} \frac{\partial(dE)}{\partial u^{(m)}} D dE dA \\ &+ \int H'\left(\frac{2}{3} t\right) \left[D dE dA \right] \frac{\partial(dE)^T}{\partial u^{(m)}} - \int N^T \bar{T} dA \end{aligned} \quad (57)$$

$\partial(dE) / \partial u^{(m)}$ สามารถประเมินโดยใช้สมการที่ 43 จะได้

$$\frac{\partial(dE)}{\partial u^{(m)}} = Q = \left[\frac{\partial(dE)_i}{\partial u_j^{(m)}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{r_1 - r_2}{s^2} & \frac{1+t}{2r} \\ -\frac{(z_2 - z_1)}{s^2} & 0 \\ -\frac{(r_1 - r_2)}{s^2} & \frac{1-t}{2r} \\ \frac{(z_2 - z_1)}{s^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

สมการที่ 57 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} &= \int \left(\frac{2}{3} t\right) \bar{\sigma}\left[\frac{2}{3} dE^T D dE\right]^{-1/2} Q D dE dA \\ &+ \int \left(\frac{2}{3} t\right) H Q D dE dA - \int N^T \bar{T} dA = 0 \end{aligned} \quad (59)$$

ประกอบเอลิเมนต์ทั้งหมดในรูปแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในเวลาเดียวกันสามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial \Phi}{\partial u} = \sum \frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} = 0 \quad (60)$$

สมการ (59) สามารถแก้ปัญหาโดยวิธี Newton-Raphson โดยกำหนดค่าเริ่มต้น $\bar{u}$ สำหรับค่าจริง u_0 และไม่ต้องทำในเทอมอันดับสอง(Second Order)และอันดับที่สูงขึ้นไป(Higher order) ของ $\Delta u = u_0 - \bar{u}$ ในการขยายของ Taylor หาสมการความแข็งเกร็งเชิงเส้น(Linear stiffness equation) ของ

$$P \Delta u = H - f \quad (61)$$

เมื่อ P คือแรงที่กระทำบนพื้นที่ครึ่งทรงกลม(Hemispherical punch)

$$P = \sum p^{(m)}, \quad H = \sum H^{(m)}, \quad f = \sum f^{(m)} \quad (62)$$

อธิบายตามสมการที่มาก่อนสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$\frac{\partial^2 \phi^{(m)}}{\partial u_i^{(m)} \partial u_\psi^{(u)}} = p^{(m)} = \frac{2}{3} \int \frac{1}{dE} \left\{ \left(\bar{\sigma} + H \frac{d\bar{E}}{dE} \right) \left(K - \frac{2bb^T}{3 \frac{d\bar{E}}{dE}} \right) + \frac{2}{3} \frac{Hbb^T}{\frac{d\bar{E}}{dE}} \right\} t \, dA \quad (63)$$

$$\text{เมื่อ} \quad b = QD \, dE, \quad K = QdQ^T \quad (64)$$

$$Q = \frac{\partial (dE)}{\partial u^{(m)}} \quad (65)$$

สามารถแสดงได้นั้นคือ

$$\frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial u_i^{(m)}} = H^{(m)} - f^{(m)} \quad (66)$$

$$\text{เมื่อ} \quad H^{(m)} = \frac{2}{3} \frac{1}{dE} \left(\partial + Hd \bar{E} \right) bt \, dA \quad (67)$$

$$f^{(m)} = \int N^T \bar{T} dA \quad (68)$$

การประเมินด้วยการอินทิกรัลโดยใช้สูตรหาพื้นที่ของเกาส์(Gaussian quadrature formulas) และการเบนเข้าหากัน(Convergence) เป็นการตรวจสอบโดย Fractional norm รวมสมการสำหรับเอลิเมนต์ ดังนั้นสมการที่หาได้สำหรับใช้แก้ปัญหาชั่วคราวก่อนดังเช่น สมการ(60)

$$P^* \Delta u = f - H^* \quad (69)$$

เมื่อเริ่มต้นคำนวณการคาดคะเนปริมาณจะใช้เป็นค่าเริ่มต้น

กระบวนการการขึ้นรูปโลหะมีความแตกต่างกัน 3 วิธี รอยโป่งไฮโดรสแตติกของแผ่นที่ใช้การยึดด้วยพันธะครึ่งทรงกลมและการตีปรดอร์ด้วยพันธะครึ่งทรงกลม มีการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งได้อธิบายมาแล้วนั้น ให้ผลสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง สรุปว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วง Rigid-Plastic สามารถใช้ในการแก้ปัญหการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างมีประสิทธิภาพและมีความเที่ยงตรงพอสมควร

การขึ้นรูปชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์

1. การใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในวิธีปฏิบัติทางอุตสาหกรรม

(Use of Forming Limit Diagram in Industrial Practice)

วิธีการประเมินทางด้านเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพเป็นไปได้จริงมากที่สุดของการผลิตชิ้นส่วนและหลีกเลี่ยงการออกแบบที่ไม่ประสบความสำเร็จต่อการประยุกต์ใช้วิธีแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปซึ่งมีแนวทางกับการกำหนด

- 1.1 ช่วงความปลอดภัยสำหรับการตีปรดอร์
- 1.2 บริเวณวิกฤติของการเกิดรอยคอดและรอยแตกที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด
- 1.3 ระดับความเครียด
- 1.4 เงื่อนไขที่สนับสนุนการทำงาน(แรงจับยึดชิ้นงาน,การหล่อลื่น)

ในการปฏิบัติกับการใช้ตามวิธีนี้ หลังจากมีรูปร่าง ขนาดและคุณภาพวัสดุของชิ้นงานที่กำหนด โดยผู้ออกแบบด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปและออกแบบเครื่องมือ สำหรับจุดประสงค์เพื่อหาความเครียดสูงสุดและนำมาใช้กับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ โดยการเปรียบเทียบจุดที่เหมือนกันต่อความเครียดสูงสุดในชิ้นส่วนด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป สามารถประเมินรอยแตกหรือรอยคอดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปได้ ถ้าไม่มีจุดบกพร่องคาดว่าข้อมูลที่ได้จะประมาณ

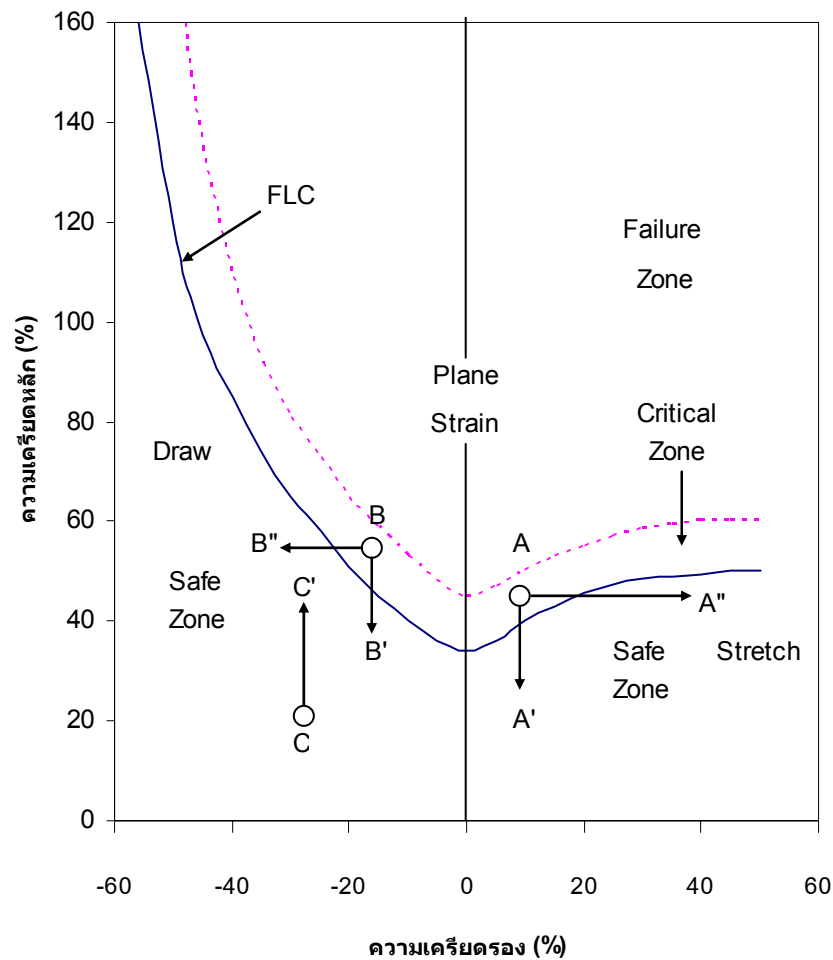
ได้ว่ามีระยะห่างจากขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ถ้าจุดที่กำหนดโดยความเครียดสูงสุด สูงกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะมีการปรับปรุงดังนี้

- ก. เงื่อนไขการทำงานเช่น แบลงก์โฮลเดอร์ การหล่อขึ้น
- ข. การออกแบบชิ้นส่วนเช่น รัศมีโค้ง มุมต่างๆ
- ค. วัสดุเช่น คุณภาพ ความหนา

ผลการปรับปรุงแสดงในภาพประกอบ 10 กรณีแรกลักษณะของจุดจะเปลี่ยนจาก A ไปยัง A' หรือ A'' กรณีที่สองจาก B ไปยัง B' หรือ B'' ในกรณีที่ 3 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะเปลี่ยนเป็นเส้นประ

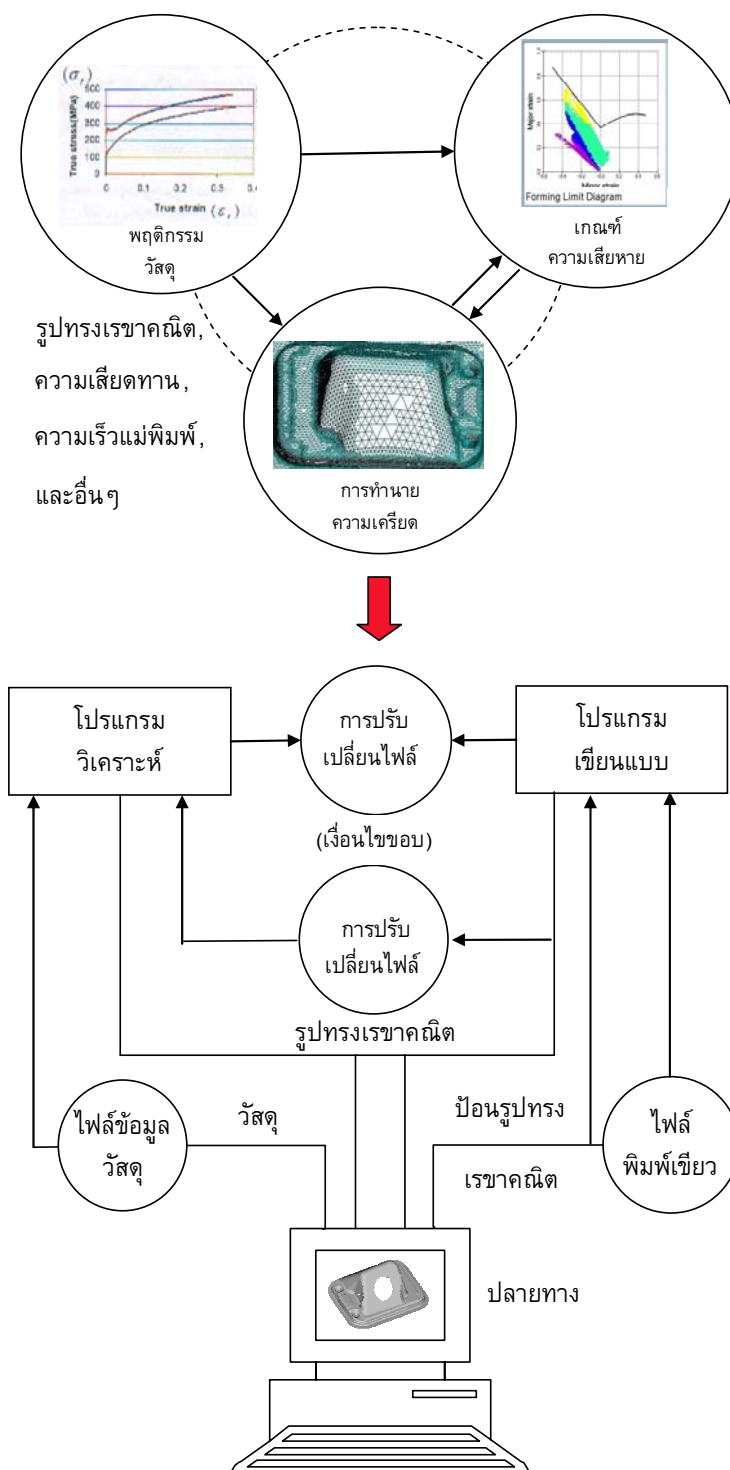
ในการประเมินการเปลี่ยนรูปของวัสดุด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ถ้าจุดความเครียดสูงสุดยังต่ำและห่างไกลจากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเช่น จุด C ไปยัง C' หรือใช้วัสดุที่มีเส้นโค้งขีดจำกัดความเครียดต่ำกว่า(แต่ยังคงเหนือกว่าจุดความเครียดสูงสุด) ขอบเขตความปลอดภัยที่เหมาะสมและการป้องกันวัสดุที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในบริเวณที่เปลี่ยนรูปจะต้องมีการผสมผสานที่ดี ขอบเขตความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุที่ดิบในตัวแปรของกระบวนการผลิต การเลือกวัสดุไม่ใช่มีอิทธิพลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเท่านั้น แต่จะมีกับวิถีความเครียดและการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุด้วย

การพิจารณาความเครียดสูงสุดสำหรับการเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถทำได้ยากถ้าเป็นชิ้นงานที่ซับซ้อน ไม่สามารถคำนวณการเปลี่ยนรูปโดยการวิเคราะห์และการหาความเครียดสูงสุดจากการทดลองด้วยกริดวงกลมขนาดเล็กหรือการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ ในการทดลองเริ่มต้นจะมีการใช้อย่างกว้างๆเท่านั้น แต่ในสองทศวรรษที่ผ่านมาถือว่าเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญเพราะมีการเลือกใช้อย่างกว้างขวาง มีการใช้วิธีแก้ปัญหาเชิงตัวเลขที่ประสบผลสำเร็จ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีบราวน์ดารีเอลิเมนต์(Boundary element method)

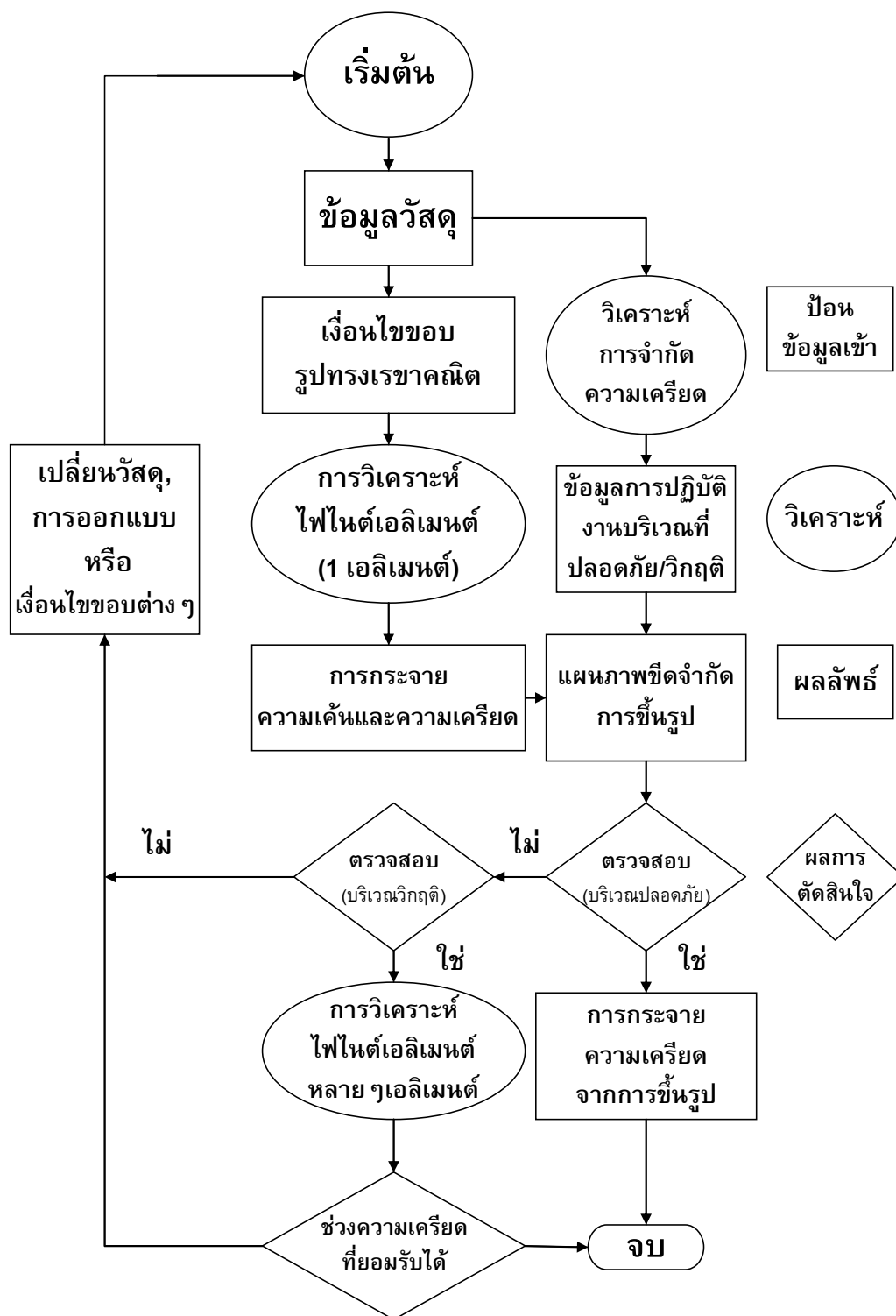


ภาพประกอบ 10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในวิธีปฏิบัติทางอุตสาหกรรม

สรุปความสำคัญทั้ง 4 หัวข้อที่กล่าวมาแล้วมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ทำให้การขึ้นรูปขึ้นงานประสบความสำเร็จ โครงสร้างของระบบที่ให้ความถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นดังแสดงในภาพประกอบ 11 และลำดับขั้นของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 11 โครงสร้างของระบบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น



ภาพประกอบ 12 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปด้วย FLD

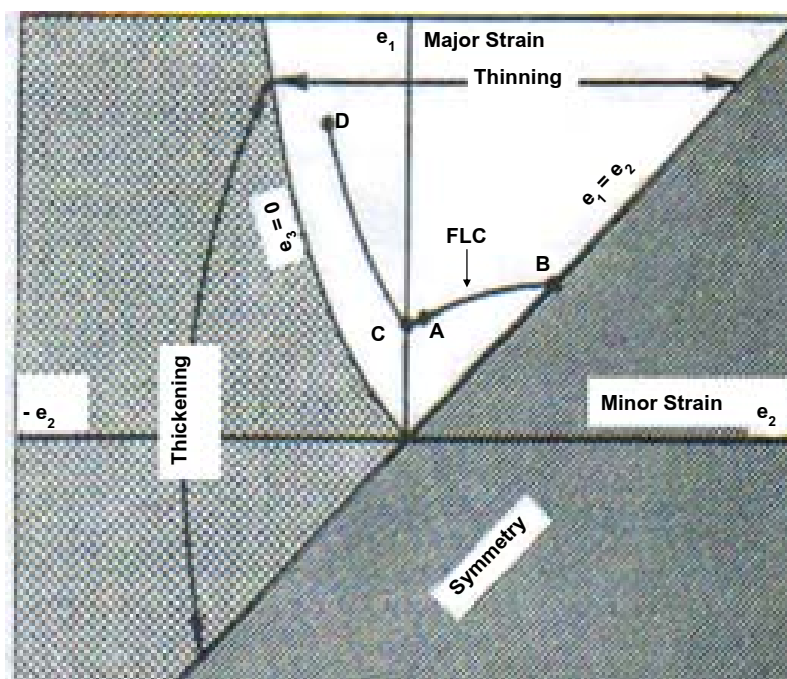
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เฮกเกอร์ (Hecker. 1975 : 671-676) ได้มีการพัฒนา FLC ของ Keeler- Goodwin ที่ใช้สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่เมื่อวัสดุเปลี่ยนไปเป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงกว่า จึงไม่สามารถใช้กันได้ เทคนิคอย่างง่ายได้เริ่มต้นหา FLC ในห้องทดลองกับชิ้นทดสอบ วัสดุเป็นเหล็ก AK และ Al 2036-T4 โดยมีแนวทางดังนี้

1. ใช้ชิ้นทดสอบแผ่นแบนลงกับขนาด 8 นิ้ว ตัดความกว้างให้เหมาะสมขนาด 1 – 8 นิ้ว และใช้กรีดวงกลมขนาดความโต 0.1 นิ้ว

2. การดึงยืดขึ้นรูป(Stretching) ชิ้นทดสอบให้เกิดความเสียหาย ใช้พื้นที่ขนาดความโต 4 นิ้ว ยึดขอบนอกไว้(Lock bead) ขึ้นรูปโดยไม่มีการหยุดชะงัก ใช้เปลี่ยนการหล่อลื่นดังนี้

- 2.1 โพลีเอททิลีนหนา 0.003 นิ้ว กับ Mineral oil
- 2.2 แผ่น Neoprene หนา 0.062 นิ้ว กับ Mineral oil
- 2.3 แผ่นยางกุดโพลียูรีเทน (Polyurethane rubber spacer)
- 2.4 อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่มีการหล่อลื่น



ภาพประกอบ 13 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ Hecker

3. ขอบเขตของอัตราส่วนความเครียดและความเครียดหลักจาก $-\frac{1}{2}$ ถึง 1 โดยมีการเพิ่มการหล่อลื่นที่ความเครียดด้านขวา(ด้านบวก)และลดความกว้างชั้นทดสอบที่ความเครียดด้านซ้าย(ด้านลบ) อนุญาตให้มีการขึ้นรูปในทิศทางตามขวาง

4. วัดวงกลมกริดที่เกิดความเสียหายเป็นวงรี วงรีด้านใหญ่เป็นความเครียดหลัก ด้านแคบเป็นความเครียดรอง โดยวัดพอดี้ที่ด้านนอกและด้านในของระยะเริ่มต้นพอมองเห็นได้ในตำแหน่งรอยคอดและรอยแตก ในการเปลี่ยนรูปของวงกลมต้นแบบ (Circle grid)

5. เมื่อได้ข้อมูลแล้วนำมาพล็อตในกราฟ $e_1 - e_2$ แนวเส้น FLC จะอยู่บนกริดวงรีด้านนอกของรอยที่เกิดความเสียหาย(อยู่ด้านบนของ Limit strain ที่ไม่เกิดรอยคอดและรอยแตก) FLC จะมีอยู่เส้นเดียวแต่ความกว้างของ FLC ± 2 เปอร์เซ็นต์ใน Major strain (e_1)

จุด A ในภาพประกอบ 13 ได้จากการดึงยืดขึ้นรูป(Stretching) ขนาดขึ้นทดสอบเต็มขนาด (8×8 นิ้ว) ไม่มีการหล่อลื่น

จาก A ไป B(Balanced biaxial tension)โดยการเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างขึ้นทดสอบและพื้นที่

จุด ACD ด้านซ้ายของ Minor strain หาได้โดยลดความกว้างของขึ้นทดสอบ

จุด D การทดสอบแรงดึงแกนเดียวที่มีค่าเท่ากัน(Equivalent uniaxial tensile test) เทคนิคนี้ก่อให้เกิด FLC ที่น่าเชื่อถือได้มากที่สุด เป็นที่ยอมรับได้ของความเครียดจำกัด (Limit strain)ที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ทดลองขึ้นรูปตัวถังรถยนต์(Autobody stamping)สำหรับ AI 2036-T4

โกท็อก; มิอูระ; และ ทานากะ (Gotoh; Miura; & Tanaka. 1988 : 249-256) ได้ศึกษาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของแผ่นทองเหลืองชนิดมีการยึดตัวได้ดี(Commercial quality 60/40 brass sheet) ซึ่งใช้แรงดึงแบบแกนเดียว(Uniaxial) และสองแกนขนาดเท่ากัน(Equal-biaxial) ทฤษฎีของ FLD จะใช้ทำนายด้วยสมการใหม่ช่วงพลาสติก(Plastic) ซึ่งเสนอโดย Gotoh ที่ตำแหน่งการเกิดรอยคอด เลขชี้กำลังการทำให้แข็ง n (n-th Power hardening) และกฎการทำให้แข็งของโวค (Voce hardening law) ที่ปรับปรุงใหม่เปรียบเทียบกันมีความเหมาะสมกับแผ่นทองเหลืองที่ความหนา 0.3, 0.6, 1 mm. แรงแกนเดียวใช้การสร้าง FLC โดยการทดสอบแบบโอลเซน ส่วนแรงสองแกนใช้การทดสอบแบบ Stretching test

หวง; และ เซน (Huang; & Chen. 1995 : 360-369) เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนโค้งด้ายต่อความสามารถในการดรอว์ด้วยทรงกระบอก รัศมีส่วนโค้งของด้ายที่ใหญ่กว่าจะใช้แรงในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกน้อยกว่า ความหนาของชิ้นงานจะมีความสำคัญต่อค่าอัตราส่วนการดรอว์จำกัดมาก รอยย่นจะไม่เกิดขึ้นง่าย การรีดหรือการดรอว์หลายครั้งค่าอัตราส่วนการดรอว์จำกัดใหญ่ขึ้น การออกแบบให้รัศมีส่วนโค้งด้ายใหญ่จะพึงพอใจมากกว่าเพราะการขึ้นรูปง่าย การคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองเปรียบเทียบกันกับผลของแรง ความหนาและอัตราส่วนการดรอว์จำกัดจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

หวาง; และ เซน (Huang; & Chen. 1996 : 4-13) เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเผื่อของพื้นที่ และตายในกระบวนการดอร์ขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก มีผลกับค่าอัตราส่วนการดอร์จำกัดน้อยมาก แต่จะมีผลกับความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปโดยค่ามากที่สุดของอัตราส่วนการดอร์จำกัดอยู่ที่ $C = 1.15t$ และ $1.04t$ ระยะเผื่อ(Clearance)ที่ $1.15t$ ให้ความปลอดภัยกับค่าอัตราส่วนการดอร์จำกัดได้ดีที่สุด ส่วนค่า $1.04t$ จะมีผลกระทบกับการทำให้ผิวเรียบ ผลการทดลองกับทฤษฎีสอดคล้องกัน สามารถใช้ออกแบบเครื่องมือในโรงงานอุตสาหกรรมได้

ลู (Leu. 1999 : 168-176) การเปลี่ยนรูปช่วงพลาสติกของการขึ้นรูปถ้วยโดยปกติได้จากการวัดอัตราส่วนการดอร์จำกัด(LDR) สมการประมาณค่า LDR ที่ปรับปรุงใหม่ได้มาจากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกของปลายพื้นที่เรียบใช้อินทิเกรตจากหลักการแรงสูงสุด(Load maximum) ในตำแหน่งที่เกิดการไหลช่วงพลาสติก(Plastic flow) ฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่ใช้คือค่า $\bar{R}$ (Normal anisotropy), ค่า n (Strain-hardening exponent), ค่า μ (Friction coefficient), ค่า r_d (Radius of the die arc), ค่า r_1 (Half die opening) และ σ_y (Yield strength) สามารถวินิจฉัยผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทฤษฎีของ LDR เป็นที่ยอมรับกันดีระหว่างการคำนวณและผลการทดลอง ถ้าเข้าใจควบคุมพฤติกรรมการดิ่งขึ้นรูปของวัสดุจากพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถทำให้ชิ้นงานได้คุณภาพดี

หยาง; และ ชู (Yang; & Hsu. 2001 : 32-36) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยวิธีการกดยึดด้วยพื้นที่ครึ่งทรงกลม เป็นผลรวมระหว่างทฤษฎีขีดจำกัดกับไฟไนต์เอลิเมนต์ บริเวณพื้นที่ผิวชิ้นงานช่วงอีลาสติก-พลาสติก เพื่อหาความสูงโดมจำกัดของการดิ่งขึ้นรูปรอบแกนสมมาตร วิธีแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วงอีลาสติก-พลาสติก มีพื้นฐานมาจากกฎการไหลร่วมกับเกณฑ์การครากกำลังสองของฮิลล์(Hill's quadratic yield criterion) สูตรการคำนวณโดยรวมของ Lagrangian ร่วมกับทฤษฎีงานเสมือนเพื่อใช้หาสมการของความแข็งเกร็ง(Stiffness) และหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด(Displacement)กับความเครียด ใช้ผลการคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปซึ่งเสนอแนะโดย Storen and Rice ความสูงโดมจำกัดและตำแหน่งจุดแตกสามารถใช้ทำนายวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ผลการคำนวณจะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่หาได้กับสมการเชิงตัวเลข ยิ่งไปกว่านั้นอิทธิพลของสมบัติวัสดุของเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด ค่าแอนไอโซทรอปิกและเงื่อนไขแรงเสียดทานของความสูงโดมจำกัดจะถูกนำเสนอด้วย รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วงอีลาสติก-พลาสติกกรอบแกนสมมาตรสำหรับการวิเคราะห์การกระจายของความเครียดและขีดจำกัดการขึ้นรูปของการดิ่งขึ้นรูปได้รับการพัฒนา ปัญหาของการไม่เป็นเชิงเส้นได้ถูกนำมาเกี่ยวข้องโดยเปลี่ยนรูปร่าง สมบัติวัสดุ และสภาพผิวที่สัมพันธ์ระหว่างแต่ละช่วงเวลา ขีดจำกัดการขึ้นรูปกำหนดโดยทฤษฎีของ Hecker จากการวิเคราะห์ได้ข้อสรุปว่า การกระจายตัวของความเครียดและการจำกัดความสูงโดมตามที่ได้แสดงมีผลสอดคล้องกันดีกับข้อมูลการทดลองที่หาได้กับสมการเชิงตัวเลข ค่าเพิ่มขึ้นของค่า n , ค่า

ลดลงของค่า r และการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีผลต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ความเครียดสูงสุดมีค่าลดต่ำลงและการจำกัดความสูงโดมมีค่าเพิ่มขึ้น

อะวิล่า; และ วีเอร่า (Avila; & Vieira. 2003 : 101-108) ได้ศึกษาวิธีการทำนายด้วย FLD ทางด้านขวาโดยใช้วิธีมาร์ซินีเยก-คูชินสกี(Marciniak-Kuczynski) ใช้เกณฑ์การครากแตกต่างกัน 5 แบบ คือ ฟอน มิเซส(Von Mises), ฮิลล์ 1948(Hill's 1948), ฮิลล์ 1979(Hill's 1979), โลแกน และฮอสฟอร์ด(Logan and Hosford's) และ ฮิลล์ 1993(Hill's 1993) ผลการเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลองสอดคล้องกันดี กรณีศึกษาใช้วัสดุ AL 2036-T4, เหล็ก AK, เหล็ก IF และเหล็ก EEP จากการสังเกตชนิดของเกณฑ์การครากที่ใช้วิเคราะห์ มีอิทธิพลอย่างมากในการทำนาย FLD การทำนายเส้นโค้งและข้อมูลการทดลองของแต่ละวัสดุจากความแตกต่างของเกณฑ์การครากสอดคล้องกันดี ผลที่ดีที่สุดของเหล็ก AK ใช้วิธีของโลแกนและฮอสฟอร์ด, AL 2036-T4 ใช้หลักการของฮิลล์ 1993, เหล็ก IF และเหล็ก EEP ใช้กฎของฮิลล์ 1979 หรือโลแกนและฮอสฟอร์ดได้อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

บูทูก; กราเซีย; และโรชา (Butuc; Gracio; & Rocha. 2003 : 714-724) เพื่อศึกษาทฤษฎีการทำนายด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ยังคงใช้ทฤษฎีของ Marciniak และKuckzinsky (M-K) โดยปรับรูปแบบใหม่ กรณีศึกษาใช้วัสดุอะลูมิเนียมเจือ(AA6016-T4) Yield surface shapes, ความเค้นครากและทิศทางของค่า R จำลองโดยการหาเหตุผลจากฟังก์ชันคราก(Yield function) เปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณ Limit strain พบว่าใช้หลักการของ YLD 96 (Barlet yield function) และ Hardening law แทนด้วยกฎการทำให้แข็งของวอค(Voce hardening law)

สท้อดตัน; และ ซู (Stoughton; & Zhu. 2004 : 1463-1486) เพื่อเสนอแนะรูปแบบที่เกี่ยวกับทฤษฎีของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยมีความเครียดเป็นพื้นฐานมาก่อนและสอดคล้องกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่มีความเค้นเป็นพื้นฐานมาก่อน กล่าวว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน วิธีความเครียดโดยทั่วไปของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่สามารถวิเคราะห์กระบวนการที่ยู่ยากซับซ้อนได้ โดยเฉพาะการขึ้นรูปกลับทิศทาง, การขึ้นรูปที่รีมขอบ, การขึ้นรูปด้วยของเหลวและการขึ้นรูปขั้นตอนเดียวของชิ้นงานค่อนข้างเล็ก-เล็ก หรือรูปนูน สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากชิ้นงานที่มีความเครียดมาแล้วพบว่าเมื่อโลหะเกิดการยืดสองแกนจะทำให้ FLC ต่ำลง(ความเครียดหลักต่ำลง ความเครียดรองสูงขึ้น) แต่เมื่อเกิดการตีปดหรือซึ่งเป็นแรงดึงทำให้ FLC สูงขึ้น(ความเครียดหลักสูงขึ้น ความเครียดรองต่ำลง)

คาไฟร์; และ มักมุดี (Khafri; & Mahmudi. 2004 : 1289-1306) ปัจจุบันวิธีวิเคราะห์การทำนายแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในระหว่างการขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับระนาบไอโซโทรปี(Planar Isotropy)บรรลุผล วิธีนี้ใช้พื้นฐานการเสียรูป 3 ขั้นตอนซึ่งพัฒนาโดยจอห์นและกิลลิส(John and Gillis), รูปแบบของจอห์น-กิลลิสและพิชบิน-กิลลิส (Pishbin-Gillis), เกณฑ์การครากของฮิลล์บอกว่าไม่เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียมเจือ ซึ่งน่าจะนิยมใช้หลักการของฮอสฟอร์ด(Hosford) ด้วยค่า $R < 1$ ใช้ร่วมกับกฎยกกำลัง(Power law) สมการเทียน-ซาง(Tian-Zhang) และสมการการทำให้แข็งของ

ไวค(Voce hardening) ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองจากวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA 3105 และ AA 8011 สำหรับโลหะผสม 2 ชนิด เมื่อประยุกต์ใช้สมการของไวคและเทียเน-ซาง สามารถแสดงผลการทำนายความเครียดได้ดี

ฮอล์มเบิร์ก; เอ็นควิสต์; และธิเดอร์ควิสต์ (Holmberg; Enquist; & Thiderkvist. 2004 : 72-83) เพื่อศึกษาการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการทดสอบแรงดึง ใช้การจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นเพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายสำหรับการพัฒนาชิ้นส่วนรถยนต์ใหม่ๆ ที่สำคัญ ความเที่ยงตรงของการจำลองเนื้อที่ใหญ่จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของสมบัติวัสดุ การศึกษานี้จะเน้นสมบัติขีดจำกัดการขึ้นรูปของโลหะแผ่น วิธีการทดสอบสำหรับการกำหนดขีดจำกัดการขึ้นรูปได้มีการพัฒนา โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงทั่วไปเพื่อให้เร็วและง่ายในการกำหนดขีดจำกัดการขึ้นรูป นอกจากนี้อิทธิพลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ถูกจำกัดโดยใช้การปรับปรุงรูปร่างขึ้นทดสอบ การกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้านซ้ายมือที่มีความสมบูรณ์ การเตรียมจับยึดรูปร่างขึ้นทดสอบมีความจำเป็นในลำดับต้นๆเพื่อให้การทดสอบประสบความสำเร็จ การออกแบบขึ้นทดสอบที่ไม่เหมาะสมหรือการยึดที่ไม่ดีการแตกหักจะไม่เกิดขึ้นบริเวณที่สนใจของขึ้นทดสอบ การศึกษารวมถึงการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลองเพื่อการออกแบบขึ้นทดสอบที่เหมาะสมก่อนการทดสอบ ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆของเหล็กอ่อน(Mild Steel) และเหล็กกล้าความต้านแรงสูง

เชษฐ อุทัยยัง; และคนอื่นๆ. (Chet Uthiyoung; et al. 2004 : Abstract) ได้ศึกษาอิทธิพลของการหล่อลื่นด้วยอัตราส่วนการดรอว์จำกัด(Limiting drawing ratio)LDR, แรงขึ้นรูป, คุณภาพผิวของกระบวนการดรอว์ด้วยสแตนเลส AISI 304 ความหนา 0.5 mm. ใช้ตัวอย่างการหล่อลื่น 7 แบบ ใน 5 ตัวอย่างแรกใช้น้ำมัน TDN 81, MZA 30, DRAW 756 A, DRAW 359 H และน้ำมันมะพร้าว อีก 2 ตัวอย่างใช้แผ่นพลาสติกโพลีเอททีลีน(Polyethylene-PE)ความหนา 0.07 และ 0.1 mm. ใช้การหล่อลื่นแต่ละชนิดหาค่า LDR จากการขึ้นรูปด้วยความโต 65 mm. เปลี่ยนความโตของแผ่นแบบลงครึ่งละ 2 mm. อัตราส่วนการดรอว์จะเปลี่ยนด้วย ผลการทดลอง LDR ของการหล่อลื่นด้วยแผ่นพลาสติกหนา 0.07 และ 0.1 mm. เท่ากับ 2.09 น้ำมัน TDN 81 ได้ค่า LDR เท่ากับ 2.03 น้ำมันชนิดอื่นได้ค่า LDR เท่ากับ 2.0 นอกจากนั้นแรงขึ้นรูปของแผ่นพลาสติกจะน้อยกว่าการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน การหล่อลื่นด้วยน้ำมันจะให้ผิวสำเร็จที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามผนังของถ้วยที่ดีก็ขึ้นอยู่กับผิวสำเร็จของแผ่นแบบลงด้วย

สุวัฒน์ จีระธีรนาถ; ธนสาร อินทรกำธรชัย; และ วิโรจน์ ลิ้มตระการ. (2004 : 79-81) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการทำงานของโลหะแผ่น วิเคราะห์โดยใช้กริดทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขึ้นรูป โดยพิจารณาผลกระทบจากกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ จุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหา FLD ของโลหะแผ่นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย กรณีศึกษาวัสดุ SPCC หนา 1 mm. เบื้องต้นศึกษาการทดลองเชิงตัวเลขหา FLD เป็นหลัก เสนอแนะผลการจำลองรูปร่างขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง แสดงผลกระทบของขนาดขึ้นทดสอบและวิถีความเครียดบริเวณที่เกิดแรงเสียดทานของการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

ณัฐพล ศิริสว่าง (2541 : บทคัดย่อ) เพื่อศึกษาหากรรมวิธีในการทดสอบการขึ้นรูป ทำเครื่องมือในการทดสอบแบบจำลองการขึ้นรูปและหากรรมวิธีทดสอบอย่างง่ายและรวดเร็ว โดยทำการทดสอบกับวัสดุต่างกัน 6 ชนิดคือ SS 400, SPCE, SUS 304, SUS 430, AI 1200P H12 และ AI 1100P H14 ที่ขนาดความหนาเท่ากันคือ 1.0 mm ในการคัดเลือกกรรมวิธีทดสอบจะทำการคัดเลือกจากกรรมวิธีที่สามารถใช้กับเครื่องทดสอบการดึงและความง่ายในการทำเครื่องมือ, วิธีทดสอบที่ไม่ซับซ้อนและการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ซึ่งได้แก่การทดสอบการดัดงออย่างง่าย การทดสอบการชเฮอร์ตซ์(Stretch)ของโอลเซน การทดสอบการดรอร์(Draw)แบบรวดเร็ว การทดสอบการชเฮอร์ตซ์-ดรอร์ของฟูกูอิ การทดสอบหารอยโค้งของโยชิตะ โดยทำการทดสอบกับวัสดุทั้ง 6 ชนิด ชนิดละ 6 ครั้ง ผลการทดสอบในแต่ละวิธีที่ได้จะนำมาประเมินผลให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบกับวัสดุหลักคือ SPCE เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ดี ผลของการทดลองและเปรียบเทียบปรากฏว่าวัสดุที่ทำการดัดงอ การชเฮอร์ตซ์และการดรอร์ได้ดีคือ SUS 304 โดยสามารถทำการดัดงอได้มากกว่า 20 % ทำการชเฮอร์ตซ์ได้ดีกว่าถึง 12.09% และทำการดรอร์ได้สูงกว่า SPCE 6.04% ส่วนในการชเฮอร์ตซ์-ดรอร์วัสดุที่ดีที่สุดคือ SPCE โดยไม่มีวัสดุใดสามารถเทียบได้สูงกว่า ส่วนในการทดสอบรอยโค้งของโยชิตะ SUS 430 มีความไวในการเกิดรอยโค้งสูงกว่าถึง 45.93 % ส่วนในการคัดเลือกกรรมวิธีทดสอบสำหรับการทดสอบพื้นฐานจะใช้กรรมวิธีทดสอบการดัดงออย่างง่าย เนื่องจากความประหยัดและความรวดเร็วในการทดสอบ

กิตติภฏ รัตนจันทร์ (2542 : บทคัดย่อ) เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอร์บีด(Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอร์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอร์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม(Half-round drawbead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอร์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอร์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดตายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอร์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบลงก์ไฮดรอล์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

สรุป ความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นอยู่กับส่วนประกอบหลักคือแม่พิมพ์และวัสดุชิ้นงาน จะต้องพิจารณาหากรรมวิธีขึ้นรูปที่เหมาะสม การศึกษาหากรรมวิธีทดสอบการขึ้นรูปกล่าวว่าการทดสอบรูปโดมครึ่งทรงกลมให้ผลการทดสอบดีกว่าโอลเซนกับอีริคเซน โดยมีดรอร์บีด(Draw bead)ควบคุมการไหลของโลหะแผ่น ส่วนการลดแรงเสียดทานใช้แผ่นพลาสติกโพลีเอททิลีนดีกว่าน้ำมันหล่อลื่น แต่น้ำมันหล่อลื่นจะให้ผิวสำเร็จที่ดีกว่า รัศมีของส่วนโค้งพ้นซ์และตายมีผลต่อการตีปดรอร์ขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก รัศมีส่วนโค้งตายที่ใหญ่กว่าจะใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยกว่า ระยะเผื่อของพ้นซ์และตายจะมีผลกับความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานโดยใช้ระยะเผื่อ(C)=1.15t ให้

ความปลอดภัยกับขีดจำกัดอัตราส่วนการตรอว์ของชิ้นงานได้ดี นอกจากนั้นพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกขึ้นอยู่กับการมีเตอร์ของวัสดุสามารถวินิจฉัยผลกระทบจากการขึ้นรูป สุวัฒน์ จีระธีรนาถ กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของโลหะแผ่นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เสนอแนะผลการจำลองรูปร่างขึ้นทดสอบที่เหมาะสมแสดงผลกระทบของขนาดขึ้นทดสอบได้ผลสอดคล้องกันดี การศึกษาหาส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของทองเหลืองใช้การทดสอบแบบโอลเซน แรงสองแกนใช้การทดสอบการดึงยึดขึ้นรูป ได้ผลที่คาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การทำนายด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปใช้หลักการของมาร์ซิเนียก-คูซินสกี หลักการครากตัวใช้ของฮิลล์และฮอสฟอร์ด จะเห็นว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปใช้ทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของงานโลหะแผ่นได้โดยเฉพาะ Hecker ซึ่งเป็นแนวทางหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่นับว่าเหมาะสม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยเพื่อทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
2. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

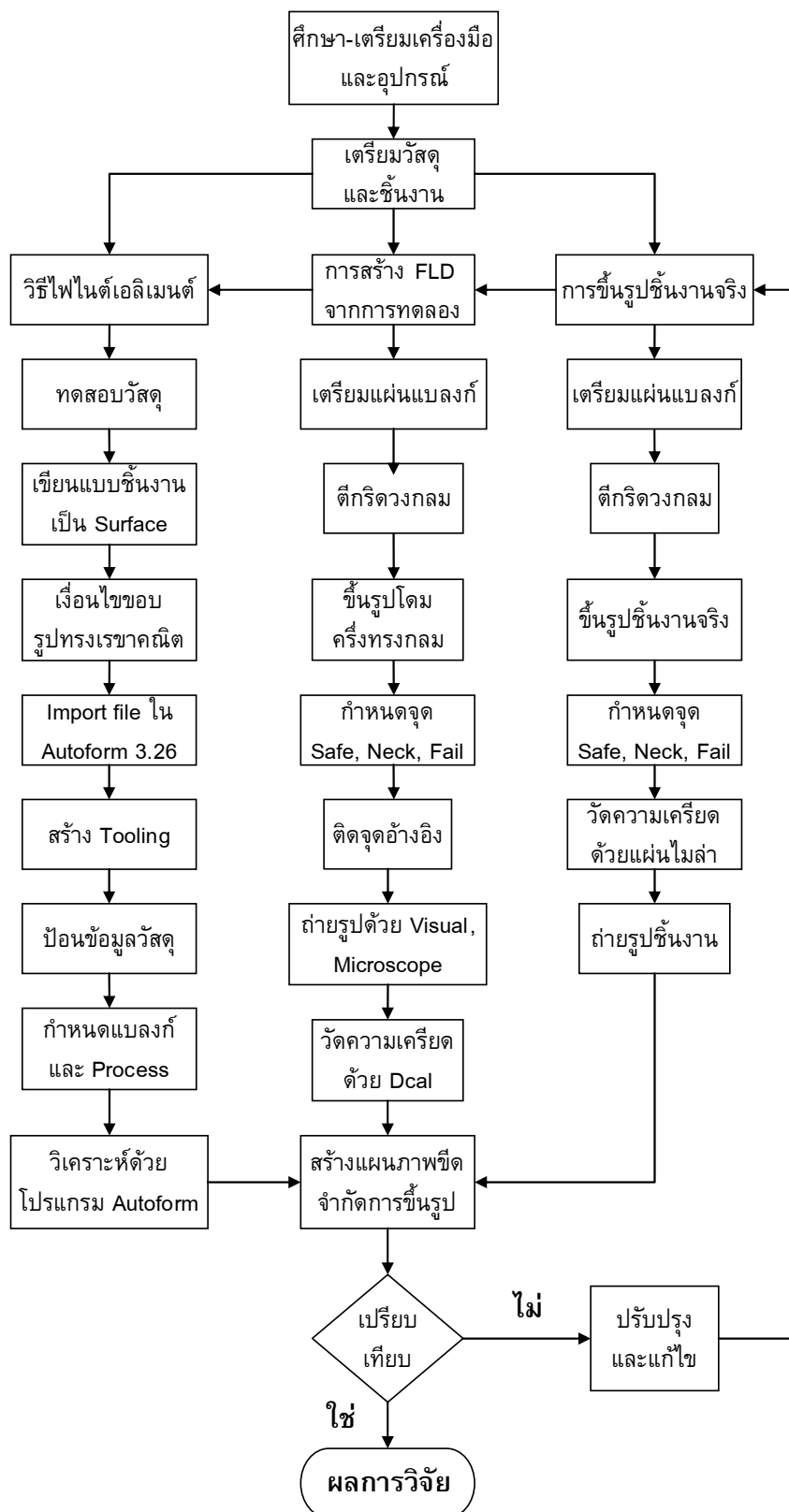
1. โลหะแผ่นที่ใช้ในการวิจัยคือ
 - 1.1 SPCC ขนาด 4x8 ฟุต หนา 0.8 mm. 4 แผ่น
 - 1.2 SPCE ขนาด 4x8 ฟุต หนา 0.8 mm. 4 แผ่น
 - 1.3 SPC270 ขนาด 4x8 ฟุต หนา 1.4 mm. 4 แผ่น
2. แม่พิมพ์ตัดขึ้นทดสอบแรงดึง 1 พิมพ์
3. แม่พิมพ์ขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมพร้อมด้วยพันธรูปถ้วยทรงกรวย 1 พิมพ์
4. แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกและอุปกรณ์ 1 ชุด
5. แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์และอุปกรณ์ 1 ชุด
6. สารเพื่อลดแรงเสียดทานของแม่พิมพ์คือ
 - 6.1 น้ำมันขึ้นรูป Renoform MZA 30T 1 แกลลอน
 - 6.2 น้ำมันเครื่องกึ่งสังเคราะห์มัลติเกรดน้ำมันเบอร์ SAE 10W30 1 ลิตร
 - 6.3 น้ำมันมะพร้าว 1 กิโลกรัม
 - 6.4 พลาสติกแผ่นชนิดโพลีเอททีลีนความหนา 0.1 mm. 1 ม้วน
 - 6.5 ยางพาราแข็งความหนา 4 mm. ความโต 100 mm. 20 อัน
7. เครื่องทดสอบเนกประสงค์แบบพลวัต(Universal testing machine, Dynamic type) ยี่ห้อ Instron รุ่น 8801 1 เครื่อง
 - 7.1 เอ็กซ์เทนโซมิเตอร์วัดค่า r , E , k , n 1 ชุด

8. เครื่องมือและอุปกรณ์เตรียมแผ่นทดสอบขึ้นรูปโคมและตัดขอบด้านข้างตามรัศมีที่กำหนด

8.1 เครื่องตัดแผ่นโลหะขนาด 4 ฟุต	1	เครื่อง
8.2 วายคัต(Wire cut)	1	เครื่อง
8.3 เครื่องกัดลอกแบบและอุปกรณ์(Copy milling machine)	1	เครื่อง
9. เครื่องมือและอุปกรณ์ตีกรีดวงกลมที่ใช้กรีดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า		
9.1 เครื่องปรับไฟ(Rectifier) พร้อมลูกกลิ้ง	1	ชุด
9.2 แผ่นกรีดวงกลม(Stencils) ขนาด 2.5 mm.	1	แผ่น
9.3 แผ่นเบาะรองโยสึงเคราะห์	1	แผ่น
9.4 น้ำยาล้างทำความสะอาด(Cleaner)	3	ลิตร
9.5 น้ำยาอิเล็กโทรไลต์(Electrolyte) สำหรับเหล็ก(Formula112A)	3	ลิตร
10. เครื่องมือและอุปกรณ์ถ่ายภาพกริดที่เปลี่ยนรูป		
10.1 Visualizer พร้อมอุปกรณ์	1	ชุด
10.2 Microscope พร้อมอุปกรณ์	1	ชุด
11. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดหลักและความเครียดรอง		
11.1 ปากกาเมจิกชนิดลบไม่ได้ 3 สี	1	ชุด
11.2 แวนชยายพร้อมอุปกรณ์จับยึด	1	ชุด
11.3 แผ่นวัดความเครียด(Strain Tape)หรือแผ่นไมล้า(Myla Tape)	1	ชุด
11.4 โปรแกรม Dcal image proceesing	1	โปรแกรม
12. เครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 80 ตัน	1	เครื่อง
13. เครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 200 ตันหรือ 300 ตัน	1	เครื่อง
14. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมอุปกรณ์	1	เครื่อง
15. โปรแกรมยูจีกราฟฟิก(UG graphic) Version NX 3	1	โปรแกรม
16. โปรแกรม AUTOFORM 3.26	1	โปรแกรม

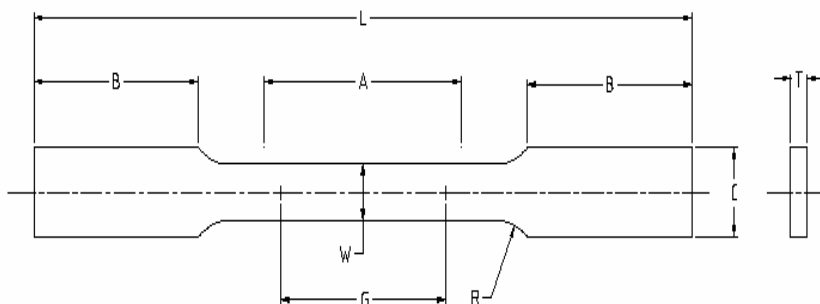
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลักๆ คือการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลอง การขึ้นรูปชิ้นงานจริงและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแต่ละขั้นตอนเกี่ยวข้องกันสามารถจำแนกรายละเอียดโดยเขียนเป็นแผนภูมิได้ตามภาพประกอบ 14 มีขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 14 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ตัดแผ่นชิ้นทดสอบแรงดึงด้วยแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน ASTM E8M-93 ภาพประกอบ 15 ของวัสดุ SPCC, SPCE ความหนา 0.8 mm. และ SPC270 ความหนา 1.4 mm. จำนวน 25 ชิ้น ต่อหนึ่งวัสดุ



รายละเอียด	มาตรฐาน ASTM E8M
	(หน่วยเป็น mm.)
G ความยาวเกจ	50 ± 0.1
W ความกว้าง	12.5 ± 0.2
T ความหนา	ความหนาวัสดุ
R รัศมีของมุมโค้งน้อยสุด	12
L ความยาวรวมน้อยสุด	200
A ความยาวพื้นที่หน้าตัดที่ลดลง	75
B ความยาวของพื้นที่จับยึด	50
C ความกว้างพื้นที่จับยึด	20

ภาพประกอบ 15 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M

2. ทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์แบบพลวัต

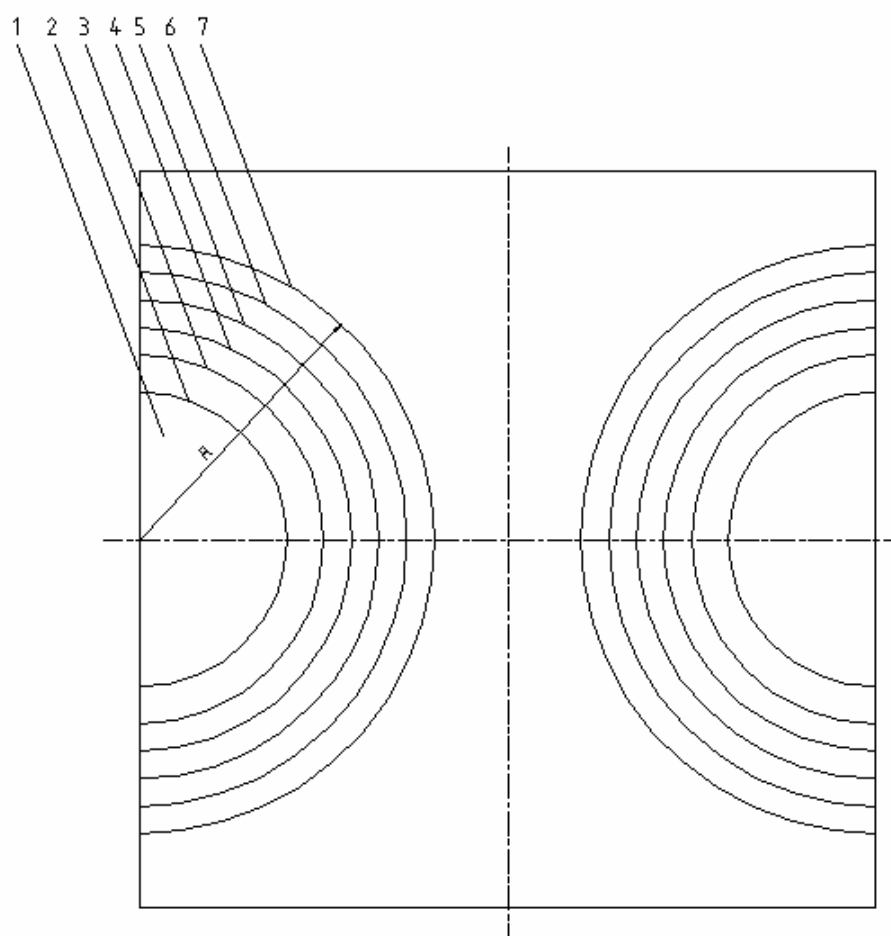
2.1 หาค่าความเค้นครากจำนวน 5 ชิ้นต่อหนึ่งวัสดุเพื่อหาค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM E8M-93

2.2 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านการดึง(k)และเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n) จำนวน 5 ชิ้นต่อหนึ่งวัสดุเพื่อหาค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM E646-91

2.3 หาค่า r_0, r_{45}, r_{90} จำนวน 15 ชั้นต่อหนึ่งวัสดุเพื่อหาค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM E 517-92a

3. นำค่าที่ได้มาสร้างไดอะแกรมของความเค้นจริง(True stress) และความเครียดจริง(True strain)

4. ตัดแผ่นขึ้นทดสอบขึ้นรูปโดมขนาด 200×200 mm. แผ่นเต็ม($R=0$) และตัดขอบด้านข้างโดยแบ่งตามรัศมีขอบ 6 ขนาด รวม 150 แผ่นต่อหนึ่งวัสดุ ตามภาพประกอบ 16



200×200 mm.

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
R(mm.)	0	40	50	57.5	65	72.5	80

ภาพประกอบ 16 ขนาดของแผ่นขึ้นทดสอบขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม

5. ตีกรีดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm. โดยการใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า

5.1 อุปกรณ์ในการสร้างกรีดวงกลมคือ

5.1.1 โต๊ะงาน

5.1.2 แผ่นเหล็กกรองชั้นทดสอบขนาดกว้างกว่า 200×200 mm. หรือกว้างกว่าแผ่น Stencils ที่มีความสะอาดพอสมควรใช้สำหรับต่อสายดินของชิ้นงาน

5.1.3 ตัวปรับไฟ(Rectifier) พร้อมด้วยสายต่อ 2 สายที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน

5.1.4 แผ่นเบาะรองมีลักษณะเป็นใยสังเคราะห์นุ่มๆ มีขนาดใหญ่กว่าแผ่น Stencils เล็กน้อย

5.1.5 แผ่น Stencils ที่มีขนาดกรีดวงกลม 2.5 mm. ซ้อนกันโดยขอบของแต่ละวงมาชนกัน

5.1.6 แผ่นชั้นทดสอบที่มีขนาด 200×200 mm. ทั้งแผ่นเต็ม(R=0) และแผ่นตัดด้านข้างตามรัศมีของแผ่นทดสอบ รวมทั้งแผ่นที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานในอุตสาหกรรม

5.1.7 น้ำยาล้างทำความสะอาดแผ่นโลหะ(Cleaner, Formula1, All purpose cleaner, From manufactured by Lectroetch)

5.1.8 น้ำยาอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการกัดแผ่นโลหะซึ่งใช้สำหรับเหล็กเท่านั้น(Electrolyte solution for etching, Ferrous alloy, Formula112A, Electroplated zinc and cadmium, From manufactured by Lectroetch)

5.1.9 ภาชนะพลาสติกที่ใส่น้ำยาทั้งสองชนิด

5.1.10 กระดาษชำระและฟองน้ำ

5.1.11 น้ำยากัดสนิม(Sonak)

5.2 วิธีการสร้างกรีดวงกลมบนแผ่นโลหะ

5.2.1 นำแผ่นเหล็กกรองชั้นทดสอบวางบนโต๊ะงาน

5.2.2 ประกอบตัวปรับแปลงไฟโดยให้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กกรอง อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง

5.2.3 วางแผ่นโลหะซึ่งเป็นชั้นทดสอบที่จะใช้ขึ้นรูปบนแผ่นเหล็กกรองอีกทีหนึ่ง โดยแผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีปและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้งระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้แผ่น Stencils เกิดทะลุได้ในขณะที่ใช้ลูกกลิ้งกดขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า

5.2.4 นำแผ่น Stencils วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน

5.2.5 นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์หมาดๆ เช็ดบนแผ่น Stencils ในบริเวณที่จะตีกรีดให้ทั่วถึงโดยให้หมาดๆ ก็พอ แล้วจัดแผ่น Stencils ให้ตั้งอย่าให้ย่น

5.2.6 นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์และบิดพอให้เปียกๆ วางบนแผ่น Stencils อีกทีหนึ่ง ในกรณีที่แผ่นเบาะรองยังชุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอประมาณ

5.2.7 เปิดสวิตช์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอประมาณ(เคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ เพียงครั้งเดียว) ซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆของมาตรวัด จะทำให้กริดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตช์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและ Stencils ออกเพื่อดูว่ากริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่

5.2.8 หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้วให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม(Sonak) เพื่อบรรเทาการขึ้นรูปต่อไป

5.3 ข้อควรระวัง

5.3.1 ในขณะที่เปิดสวิตช์ไฟจะต้องไม่ใช้มือจับแผ่นเบาะรอง, Stencils หรือแผ่นเหล็กรองเพราะจะทำให้ไฟฟ้าช็อตมือได้ เมื่อเสร็จแล้วควรปิดสวิตช์ก่อนนำชิ้นทดสอบออกมา

5.3.2 ในขณะที่ใช้ลูกกลิ้งกดบนแผ่นเบาะรองเพื่อตีกริดอยู่นั้นอย่าหมุนลูกกลิ้งกลับไปมาหลายครั้งเพราะจะทำให้แผ่น Stencils เลื่อน กริดวงกลมซ้อนขึ้นมาทำให้แผ่นทดสอบเสียควรจะกดเลื่อนไปทางเดียวครั้งเดียวหรืออย่างมากไป-กลับก็พอแล้ว

5.3.3 อย่าให้มีเศษเหล็กหรือผงของวัสดุใดอยู่บนชิ้นงานเพราะจะเกิดการสปาร์ค (Spark) ทำให้แผ่น Stencils ทะลุได้

6. หลังจากนั้นขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. ใช้ลิ้นคีมปิดเพื่อป้องกันการไหลตัวของโลหะ ความเร็วพ่นประมาณ 10 mm./s ขึ้นรูปจนกระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก

7. ทำความสะอาดชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปโดมและตากแดดให้แห้งสนิท แล้วพ่นแลคเกอร์เคลือบเพื่อป้องกันสนิม จะได้ชิ้นทดสอบตามภาพประกอบ 17



(ก) แผ่นแบลงก์ R=0 ขึ้นรูปเกิดรอยคอด



(ข) แผ่นแบลงก์ R=0 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก



(ค) แผ่นแบลงก์ R40 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก



(ง) แผ่นแบลงก์ R50 ขึ้นรูปเกิดรอยคอด



(จ) แผ่นแบลงก์ R57.5 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก



(ฉ) แผ่นแบลงก์ R65 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก



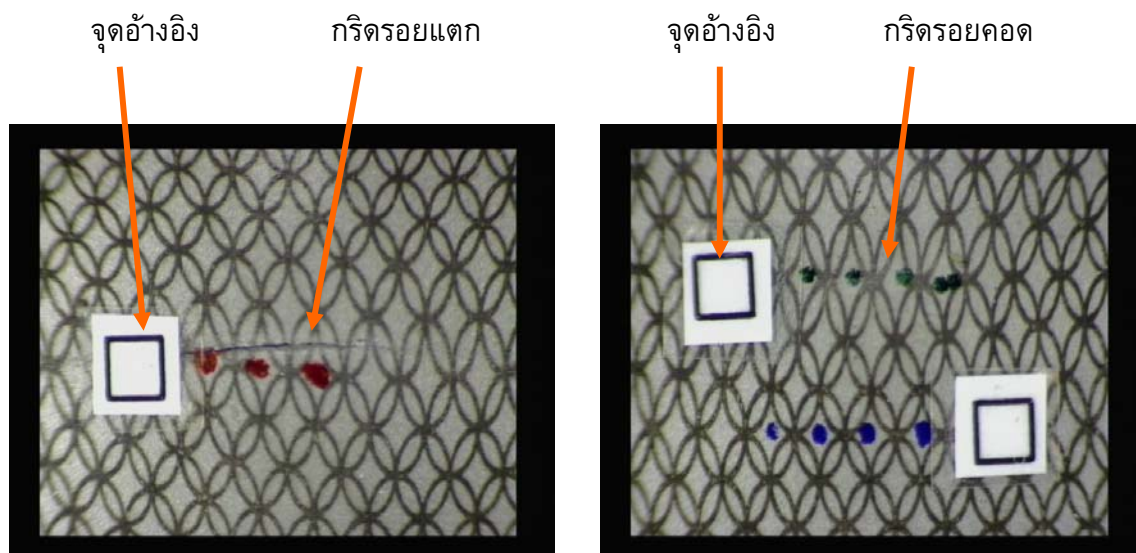
(ช) แผ่นแบลงก์ R72.5 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก



(ซ) แผ่นแบลงก์ R80 ขึ้นรูปเกิดรอยแตก

ภาพประกอบ 17 ชั้นทดสอบหลังการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม

8. การเลือกจุดที่ทำให้เกิดรอยคอด(Neck)และรอยแตก(Fail) จะมีการเลือกโดยรอยคอดและรอยแตกพาดผ่านจุดที่ใช้ในการวัด ส่วนจุดที่ดีหรือจุดปลอดภัย(Safe)จะอยู่ถัดมาจากรอยคอดและรอยแตก 1-1.5 เท่าของกิริตวงรี ดังภาพประกอบ 18



(ก) กิริตที่เปลี่ยนรูปเป็นวงรีของจุดรอยแตก

(ข) กิริตที่เปลี่ยนรูปเป็นวงรีของจุดรอยคอด

ภาพประกอบ 18 กิริตที่เป็นจุดรอยคอดและรอยแตก

9. วัดขนาดกิริตจากการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก(Major strain)และความเครียดรอง(Minor strain)เพื่อสร้าง Forming Limit Curve ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

9.1 ใช้แผ่นไมลา(Mylar tape or Strain Tape)วัดความกว้างของความเครียดหลักและความเครียดรองซึ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าที่ไม่ละเอียดมากเนื่องจากสเกลมีระยะห่างของความเครียดต่างกันเท่ากับ 5 % ความผิดพลาดจะมีค่อนข้างสูงเพราะกิริตมีขนาดเล็ก ควรจะใช้แว่นขยายในการวัดทำให้ความผิดพลาดน้อยลง

9.2 ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวัดเพราะจะทำให้ได้ค่าที่แน่นอนมากกว่าและมีความผิดพลาดน้อยลงโดยมีขั้นตอนดังนี้

9.2.1 หลังจากเลือกกิริตที่มีการเปลี่ยนรูปแล้ว นำจุดอ้างอิงซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมกิริตก่อนการเปลี่ยนรูป มาติดไว้ข้างๆกิริตที่เกิดการเปลี่ยนรูป จุดอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบจะต้องอยู่ในกลุ่มเดียวกันกับการวัดขนาดกิริต

9.2.1.1 ข้อควรระวัง ขนาดความกว้างรูปสี่เหลี่ยมของจุดอ้างอิง เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมกิริตและความหนาเส้นกิริตก่อนการเปลี่ยนรูปจะต้องเท่ากับกิริตใน Stencils

9.2.2 นำแผ่นทดสอบที่ติดจุดอ้างอิงมาถ่ายรูปโดยใช้วิธีดังนี้

9.2.2.1 โดยใช้กล้อง Visualizer ประกอบร่วมกับตัวแปลงสัญญาณและคอมพิวเตอร์ การถ่ายรูปจะต้องวางกริดและจุดอ้างอิงให้ขนานกับพื้นหรือตั้งฉากกับกล้อง ซึ่งบางครั้งอาจจะต้องตัดแผ่นทดสอบ เนื่องจากต้องวางสูงมากอยู่ในแนวเส้นทะแยงมุมของแผ่นทดสอบ แผ่นทดสอบจะต้องวางให้อยู่หนึ่งโดยใช้ดินน้ำมันรองแล้วจึงถ่ายภาพ หลังจากถ่ายภาพแล้วเก็บข้อมูล เปลี่ยนชื่อเพื่อให้ตรงกับลักษณะการทดสอบ

9.2.2.2 ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง กำลังขยาย 6.5 เท่า ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ การตั้งขึ้นทดสอบเหมือนการใช้กล้อง Visualizer

9.2.2.3 ข้อควรระวัง การถ่ายด้วยกล้อง Visualizer ซึ่งมีความละเอียดไม่มากนักทำให้จุดอ้างอิงไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นควรจะแก้ไขโดยเทียบตามแกนจะได้ค่าที่ใกล้เคียงมากกว่า มีความผิดพลาดน้อยกว่า 5% แต่การวัดอาจจะสับสนได้ ส่วนการใช้กล้อง Microscope จะได้จุดอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสค่อนข้างมาก แต่การใช้ยุ่งยากกว่า ราคาแพงมาก

9.2.3 การวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Dcal Image Processing วัดขนาดกริดและ Excel คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียด มีวิธีวัดดังนี้

9.2.3.1 การวัดจุดอ้างอิงและกริดที่เปลี่ยนรูปให้วัดจากด้านในของเส้น วงรีด้านยาวเป็นความเครียดหลัก(Major strain) ด้านสั้นเป็นความเครียดรอง(Minor strain) ซึ่งทั้งสองเส้นจะต้องตั้งฉากกัน

9.2.3.2 วัดจุดอ้างอิงทั้ง 4 ด้านโดยมีลำดับดังนี้ Load Image, Start, Ref Point1, คลิกจุด1, Ref Point2, คลิกจุด2, Compute ของแต่ละด้านแล้วนำค่าไปใส่ในโปรแกรม Excel ที่ทำเป็นต้นแบบไว้แล้วหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 ด้าน

9.2.3.3 วัดขนาดกริดที่เปลี่ยนรูปโดยลำดับขั้นตอนเหมือนวัดจุดอ้างอิงแล้วนำไปใส่ใน Excel ตามจุด Safe, Neck, Fail ของ Major(Pix) และ Minor(Pix) แล้วใช้สูตรคำนวณใน Excel ก็จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและความเครียดรอง

9.2.3.4 การวัดกริดที่ถ่ายจากกล้อง Microscope จะยากกว่าเพราะโปรแกรม Dcal Image Processing มีความละเอียดน้อย จะต้องปรับการแสดงผลของคอมพิวเตอร์ให้สูงขึ้น ภาพที่เห็นเป็นแค่ส่วนหนึ่งของภาพจะต้องใช้ Scroll bar เป็นตัวเลื่อนเพื่อวัดขนาดกริด

10. นำความเครียดหลัก(Major strain)และความเครียดรอง(Minor strain)มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel ทำให้ได้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

11. เปรียบเทียบ Forming Limit Diagram ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC, SPCE ความหนา 0.8 mm. และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPC270 ความหนา 1.4 mm. จากการทดลองกับไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม Autoform 3.26

12. ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริงซึ่งเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์คือหม้อลมเบรก ชิ้นส่วนตัวถังด้านในรถยนต์ ด้วยรูปทรงกรวย(Conical cups) วัดความเครียดหลักและความเครียดรองโดยใช้แผ่นไมลาร์ เปลี่ยนแรงจับยึดแปลงโกโฮลเดอร์(Blank holder) หรืออื่นๆ เพื่อให้ชิ้นงานเกิดรอยคอดและรอยแตก

13. นำความเครียดหลักและความเครียดรองจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริง พล็อตลงในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองของวัสดุ SPCC, SPCE และ SPC270 เพื่อวิเคราะห์จุด Safe, Neck และ Fail ตามแนวเส้น FLC

14. เขียนแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรมยูจีกราฟฟิกของชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ด้วยทรงกรวยและหม้อลมเบรก พร้อมกับส่งแฟ้มข้อมูล(Export file) ไปยังโปรแกรม Autoform 3.26

15. โปรแกรม Autoform 3.26 สร้างเมช(Mesh)ในชิ้นงานเป็น Automesh แบบสามเหลี่ยม กำหนดจุดต่อ(Node), เอลิเมนต์พร้อมกับเงื่อนไขขอบ(Boundary conditions)และพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเอลิเมนต์เริ่มต้นกำหนดเป็น Auto หรือ 1000 เอลิเมนต์ สมบัติความเสียดทาน 0.15 (ตามค่ามาตรฐานใน AUTOFORM 3.26) ความเร็วในการเคลื่อนที่เครื่องมือ 1 mm./ms หลังจากนั้นในการวิเคราะห์สามารถปรับเปลี่ยนได้(Adaptive) ตามชิ้นงาน ซึ่งแบ่งตามชิ้นงานดังนี้

15.1 การขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน แบ่งเป็น 2 วัสดุดังนี้

15.1.1 การวิเคราะห์เหล็ก SPCC โดยใช้เอลิเมนต์เริ่มต้น 1000 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์สุดท้าย 7717 เอลิเมนต์ จุดต่อ 3751 จุดต่อ วิเคราะห์ขั้นตอน Draw 1 เต็มชิ้นงาน

15.1.2 การวิเคราะห์เหล็ก SPCE โดยใช้เอลิเมนต์เริ่มต้น 1000 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์สุดท้าย 29231 เอลิเมนต์ จุดต่อ 13483 จุดต่อ วิเคราะห์ขั้นตอน Draw 1-Draw 2 เต็มชิ้นงาน

15.2 การขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย เป็นการวิเคราะห์เหล็ก SPCE โดยใช้เอลิเมนต์เริ่มต้น 1000 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์สุดท้าย 2972 เอลิเมนต์ จุดต่อ 1498 จุดต่อ วิเคราะห์ $\frac{1}{4}$ ชิ้นงาน

15.3 การขึ้นรูปหม้อลมเบรก เป็นการวิเคราะห์เหล็ก SPC270 โดยใช้เอลิเมนต์เริ่มต้น 1000 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์สุดท้าย 5366 เอลิเมนต์ จุดต่อ 2555 จุดต่อ วิเคราะห์ $\frac{1}{4}$ ชิ้นงาน ขั้นตอน ที่ 1-4

16. วิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานในโปรแกรม Autoform 3.26 นำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริงโดยใช้ความสามารถในการขึ้นรูปและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

17. ปรับปรุงและแก้ไขผลการวิจัยหรือข้อบกพร่องต่างๆ

18. สรุปผลการวิจัยและนำเสนอผลงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์และเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงขอเสนอผลการวิจัยเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ผลการหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้วิจัย
2. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD) ที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม
3. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง
4. ผลการวิเคราะห์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
5. ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

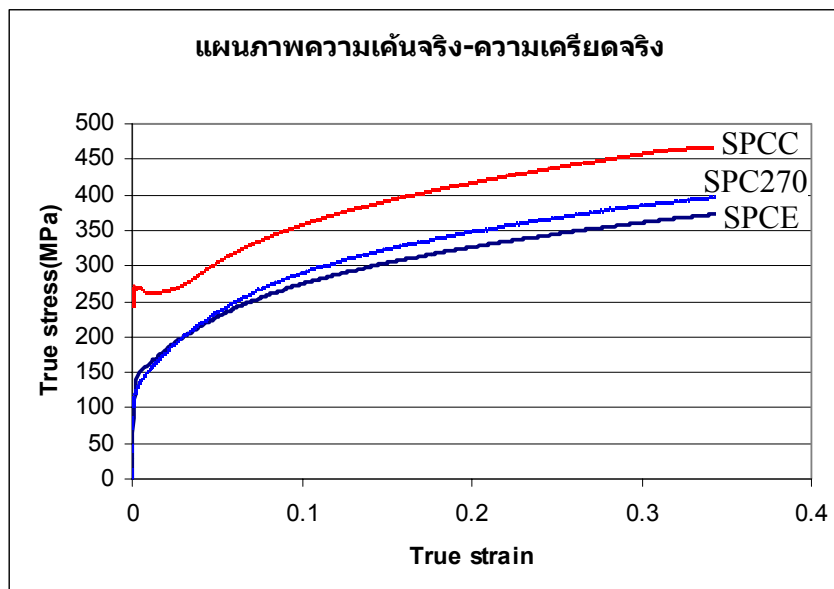
ผลการหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้วิจัย

ตาราง 2 สมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำการวิจัย

ชนิด หรือ คุณภาพ	ความหนา (mm.)	ความเค้นคราก (MPa)	ค่า k (MPa)	ค่า n	ค่า r_0	ค่า r_{45}	ค่า r_{90}
SPCC	0.8	267.24	589.36	0.2155	1.200	1.086	1.857
SPCE	0.8	152.37	534.30	0.2703	2.598	2.062	3.197
SPC270	1.4	141.07	484.5	0.2472	1.881	1.519	2.313

จากตาราง 2 พบว่าค่าแอนไอโซทรอปีกวางทิศทางการรีด(r_{90}), ตามแนวทิศทางการรีด(r_0) และทำมุม 45 องศากับทิศทางการรีด(r_{45}) มีค่ามากไปหาน้อยตามลำดับเหมือนกันทุกวัสดุ ส่วนเหล็ก SPCE, SPC270 และ SPCC มีค่า r_0 จากมากไปหาน้อยตามลำดับซึ่งเหมือนกับค่า r_{45} และ r_{90} โดยค่า r_0 เท่ากับ 2.598, 1.881 และ 1.200 ตามลำดับ ค่า n คือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดโดย SPCE, SPC270 และ SPCC เท่ากับ 0.2703, 0.2472 และ 0.2155 ตามลำดับ

ส่วนค่า k คือสัมประสิทธิ์ความต้านการดึงและความเค้นคราก วัสดุ SPCC, SPCE, และ SPC 270 มีค่ามากไปหาน้อยตามลำดับ

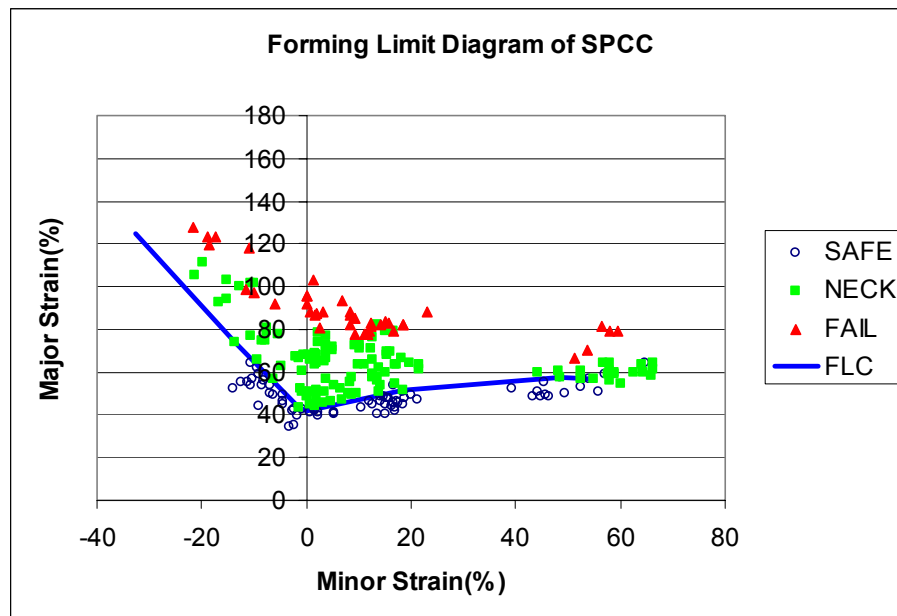


ภาพประกอบ 19 แผนภาพความเค้นจริง-ความเครียดจริง

จากภาพประกอบ 19 พบว่าเหล็ก SPCC มีความเค้นครากและความเค้นไหลสูงกว่าเหล็ก SPC270 และ SPCE แต่เหล็ก SPC270 ก็มีความเค้นไหลสูงกว่าและความเค้นครากต่ำกว่าเหล็ก SPCE

ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD) ที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม

1. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC



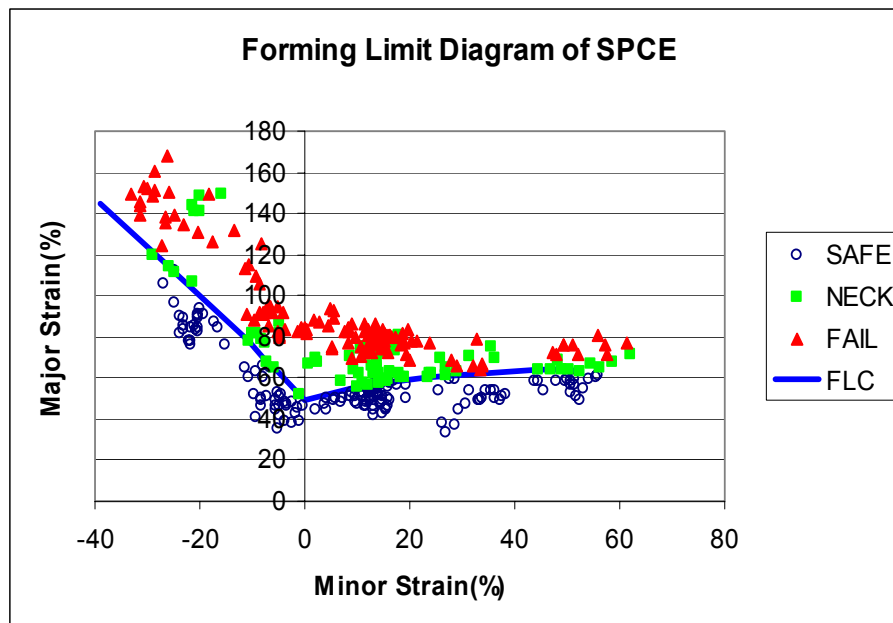
ภาพประกอบ 20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC หนา 0.8 mm. ที่ได้จากการทดลองโดยวงกลมโปร่งหมายถึงจุดที่ปลอดภัย สีเหลี่ยมสีเขียวหมายถึงจุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย

จากภาพประกอบ 20 สำหรับแผ่นแบลงก์ $R = 0$ พบว่าด้านขวาสุดของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยพลาสติกโพลีเอททีลีน มีความเครียดอยู่ระหว่าง 40 – 65 % ส่วนช่วงกลางด้านขวาของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดอยู่ระหว่าง 10 – 20 %

สำหรับแผ่นแบลงก์ $R = 40$ mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดอยู่ระหว่าง 5 – 10 % และ $R = 50$ mm. มีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 – 5 %

สำหรับแผ่นแบลงก์ $R = 57.5 - 80$ mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 – (-25) % ดังแสดงทางด้านซ้ายของ FLC

2. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE



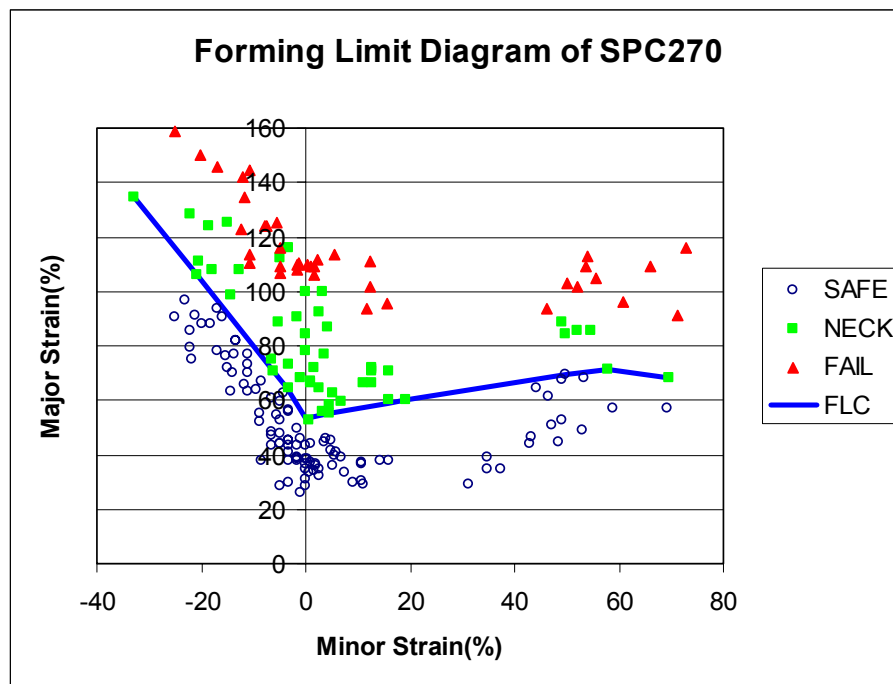
ภาพประกอบ 21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE หนา 0.8 mm. ที่ได้จากการทดลองโดยวงกลมโปร่งหมายถึงจุดที่ปลอดภัย สีเหลี่ยมสีเขียวหมายถึงจุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย

จากภาพประกอบ 21 สำหรับแผ่นแบล็ก R = 0 พบว่าด้านขวาสุดของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยแผ่นยางมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 40 – 65 % ส่วนช่วงกลางด้านขวาของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยพลาสติกโพลีเอทที่ลื่นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 20 – 40 % การขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 9 – 16 % การขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันมะพร้าวมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 10 – 19 % การขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 3 – 15 % และ 21 – 23 % ส่วนการขึ้นรูปโดมโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 11 – 20 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R = 40 mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 5 – (-3) %

สำหรับแผ่นแบล็ก R = 50 – 80 mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 0 – (-35) % ดังแสดงทางด้านซ้ายของ FLC

3. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270



ภาพประกอบ 22 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 หนา 1.4 mm. ที่ได้จากการทดลองโดยวงกลมโปร่งหมายถึงจุดที่ปลอดภัย สีเหลี่ยมสีเขียวหมายถึงจุดที่เกิดการคอด และสามเหลี่ยมสีแดงหมายถึงจุดที่เกิดการเสียหาย

จากภาพประกอบ 22 สำหรับแผ่นแบล็ก R = 0 พบว่าด้านขวาสุดของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยพลาสติกโพลีเอทที่ลื่นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 31 – 66 % การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยพลาสติกโพลีเอทที่ลื่น 4 ชั้นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 34 – 55 % การขึ้นรูปโดมโดยการลดแรงเสียดทานด้วยพลาสติกโพลีเอทที่ลื่น 8 ชั้น มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 43 – 69 % ส่วนช่วงกลางด้านขวาของ FLC การขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 10 – 20 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R = 40 mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 6 – (-1) % และ R = 50 mm. มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 3 – (-3) %

สำหรับแผ่นแบล็ก R = 57.5 – 80 mm. พบว่าการขึ้นรูปโดมโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูป Renoform มีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 0 – (-35) % ดังแสดงทางด้านซ้ายของ FLC

ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

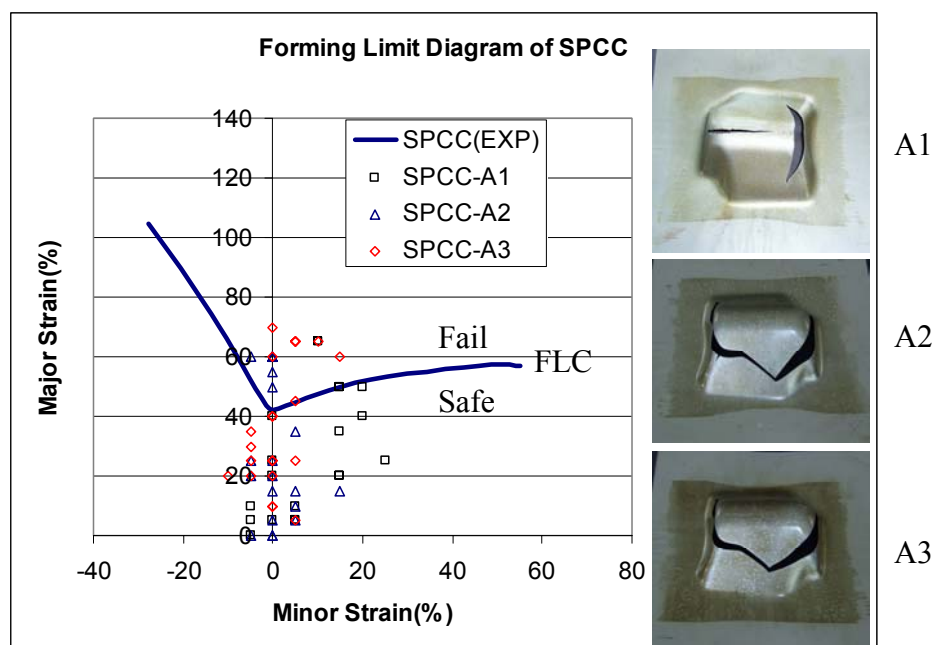
ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง สำหรับหัวข้อนี้มีดังต่อไปนี้

1. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC และ SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน (Automotive Inner-Part)
2. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวย (Conical Cups)
3. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC270 กับการขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรก (Body Booster)

1. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC และ SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน (Automotive Inner-Part)

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในมีทั้งหมด 5 ขั้นตอนคือ Draw 1, Draw 2, Trim, Pierce-Rest และ Pierce-C Pierce แต่สำหรับการวิจัยนี้ขั้นตอนที่ต้องใช้ FLC คือ Draw 1 และ Draw 2 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอนการ Draw ดังนี้

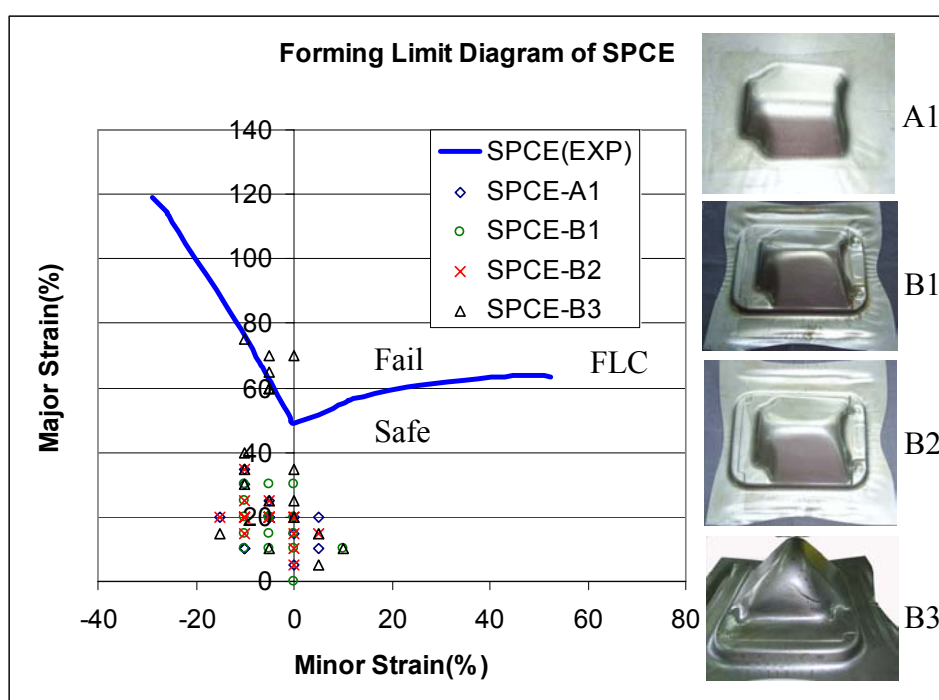
1.1 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน



ภาพประกอบ 23 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1 (แรงกดไฮดรอลิก = 10 kg/cm^2 , Stroke = 10 mm.)

จากภาพประกอบ 23 พบว่าชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในที่ทำจากเหล็ก SPCC เกิดความเสียหายในขั้นตอน Draw 1 ดังแสดงที่ชิ้นงาน A1, A2, A3 และเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลอง พบว่าความเสียหายที่เกิดจากการขึ้นรูปจะอยู่เหนือเส้น FLC

1.2 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน



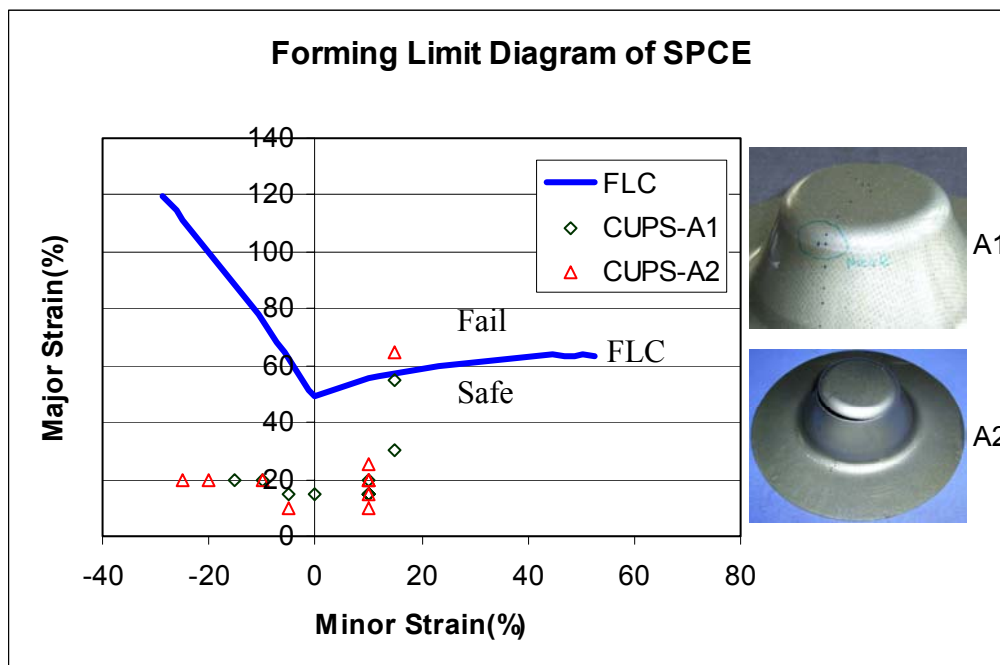
ภาพประกอบ 24 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1 และ Draw 2

จากภาพประกอบ 24 พบว่าที่ขั้นตอน Draw 1 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน ดังแสดง A1 ไม่เกิดความเสียหายโดยใช้แรงกดไฮดรอลิก = 10 kg/cm^2 , Stroke = 10 mm.

ชิ้นงาน B1 ขั้นตอน Draw 2 พบว่าไม่เกิดความเสียหายโดยใช้แรงกดไฮดรอลิก = 10 kg/cm^2 , Stroke = 10 mm. ส่วนชิ้นงาน B2 ขั้นตอน Draw 2 ใช้แรงกดไฮดรอลิก = 45 kg/cm^2 , Stroke = 30 mm. ไม่เกิดความเสียหายเช่นเดียวกัน

การขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในเกิดความเสียหายเมื่อเพิ่มแรงกดไฮดรอลิกเป็น 50 kg/cm^2 และ Stroke เป็น 30 mm. ดังแสดง B3 และเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลองพบว่า ความเสียหายที่เกิดจากการขึ้นรูปจะอยู่เหนือเส้น FLC(B3) และจุดปลอดภัยที่เกิดจากการขึ้นรูปจะอยู่ใต้เส้น FLC(A1, B1, และ B2)

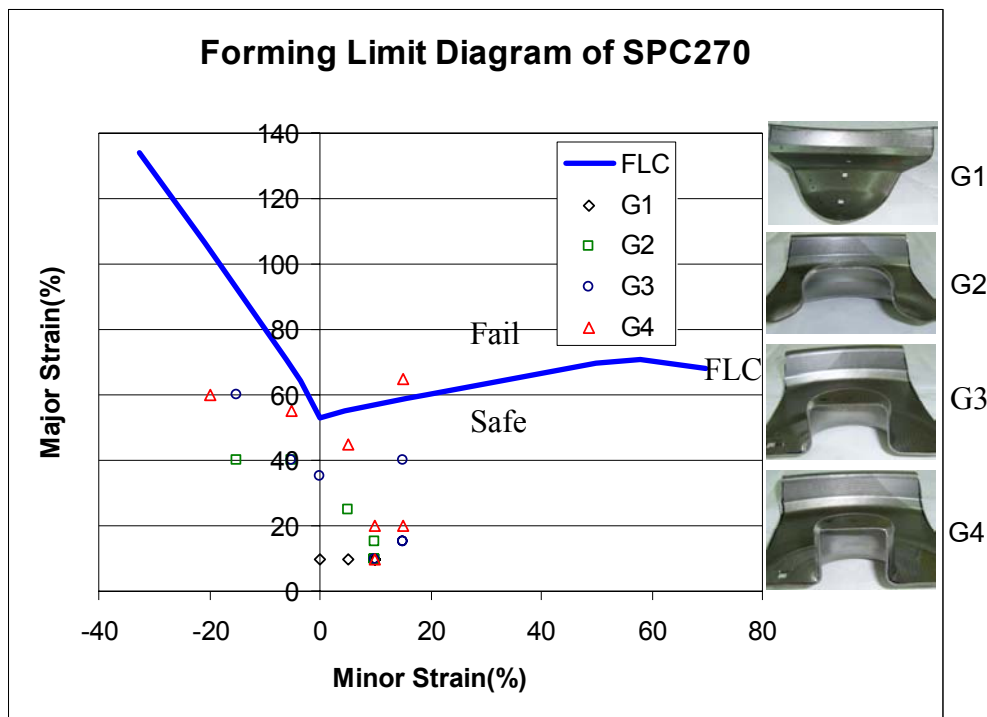
2. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวย (Conical Cups)



ภาพประกอบ 25 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย โดยใช้แบลงก์ไฮดรอลิกแรงกดความดัน 125 kg/cm^2

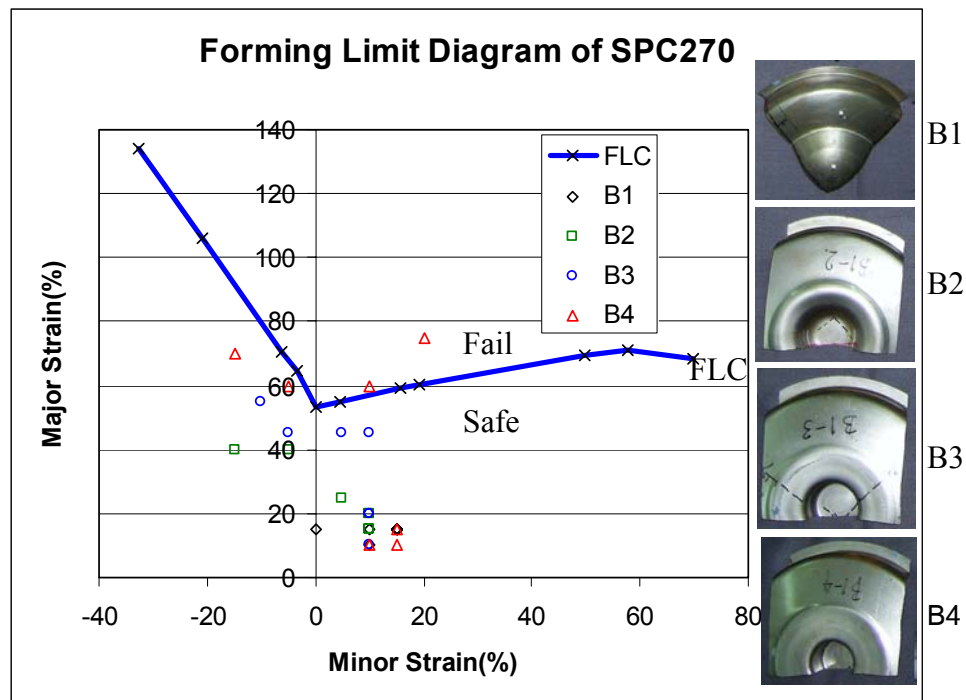
จากภาพประกอบ 25 พบว่าชิ้นงาน A1 เกิดรอยคอดที่ความสูงถ้วยทรงกรวย 54.1 mm. เมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลอง พบว่าความเสียหายที่เกิดจากการขึ้นรูปอยู่บริเวณแนวเส้น FLC ส่วนชิ้นงาน A2 เกิดความเสียหายที่ความสูงถ้วย 56 mm. เมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลอง พบว่าความเสียหายที่เกิดจากการขึ้นรูปอยู่บริเวณด้านขวาและเหนือเส้น FLC

3. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 กับการขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรก(Body Booster)



ภาพประกอบ 26 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 กับการขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกของชิ้นงาน G

จากภาพประกอบ 26 พบว่าชิ้นงาน G (Good) ในขั้นตอนที่ 1-3 สามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 3 ขั้นตอน และเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลองพบว่าจุดปลอดภัยที่เกิดจากการขึ้นรูปจะอยู่ใต้เส้น FLC แต่ในชิ้นงานขั้นตอนที่ 4 เกิดรอยคอดเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลองพบว่าบริเวณที่เกิดรอยคอดอยู่เหนือเส้น FLC



ภาพประกอบ 27 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 กับการขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกของชิ้นงาน B

จากภาพประกอบ 27 พบว่าชิ้นงาน B ในขั้นตอนที่ 1-3 สามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 3 ขั้นตอน และเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลองพบว่าจุดปลอดภัยที่เกิดจากการขึ้นรูปจะอยู่ใต้เส้น FLC แต่ชิ้นงานในขั้นตอนที่ 4 เกิดรอยคอดค่อนข้างมากและเมื่อนำความเครียดที่เกิดบนชิ้นงานไปพล็อตลงบน FLD ที่ได้จากการทดลองพบว่าบริเวณที่เกิดรอยคอดอยู่เหนือเส้น FLC มากประมาณ 16 % ซึ่งถือว่าเป็นชิ้นงานเสีย

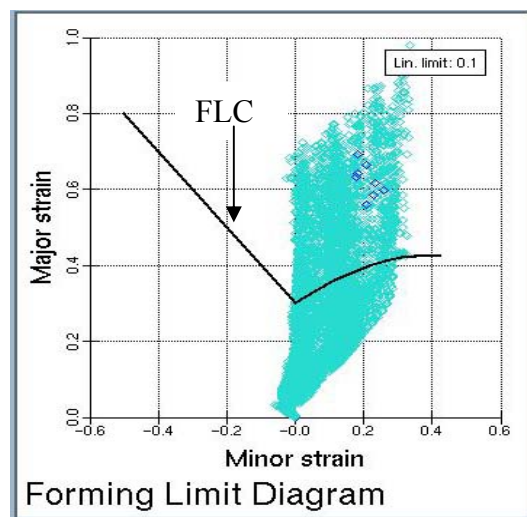
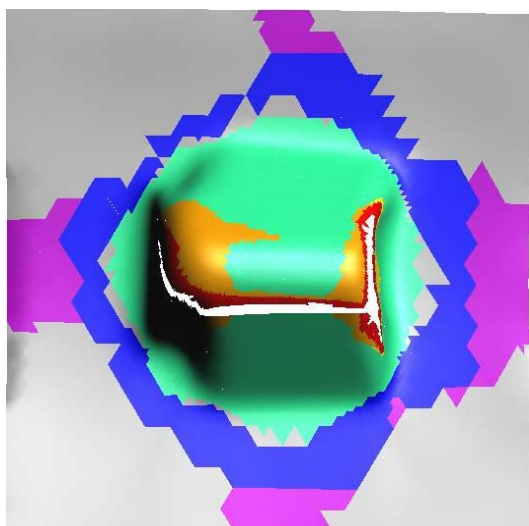
ผลการวิเคราะห์ขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับหัวข้อนี้มีดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

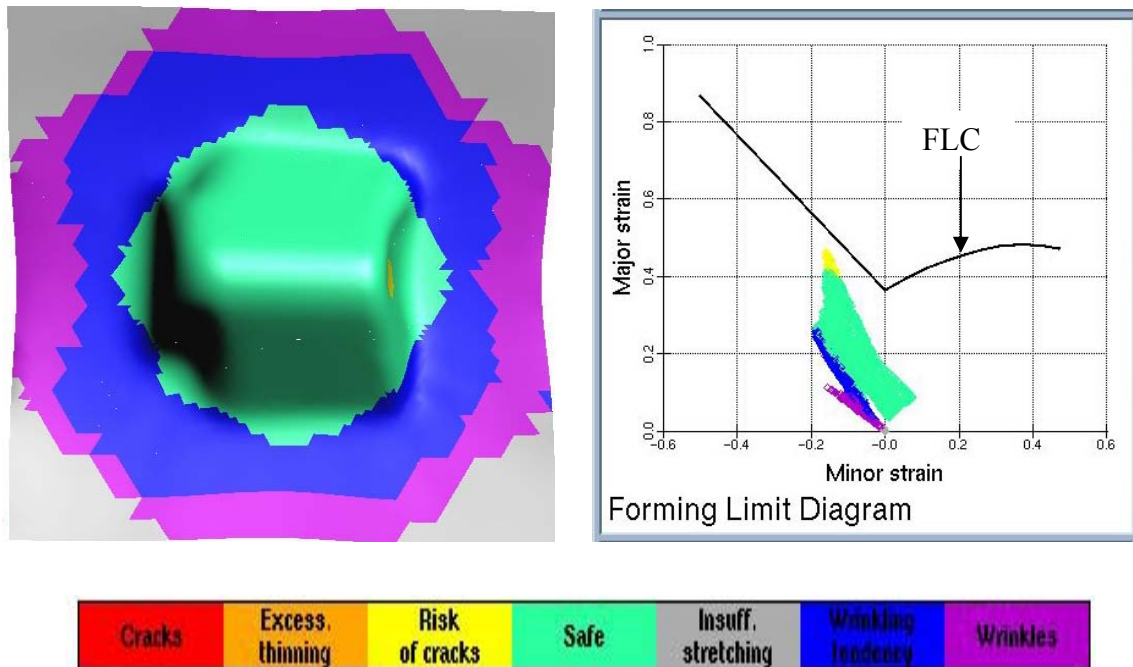
1.1 ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC กับ การขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน



ภาพประกอบ 28 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC ในขั้นตอน Draw 1 สีแดงเกิดรอยแตก(Cracks) สีเหลืองเข้มเกิดการบางมากเกินไป (Excess Thinning) สีเหลืองแฉกเกิดรอยแตก(Risk of Cracks) สีเขียวมีความปลอดภัย(Safe) สีเทาเกิดการยืดมากเกินไป(Insuff. Stretching) สีน้ำเงินแนวโน้มเกิดการย่น(Wrinkling Tendency) สีม่วงเกิดการย่น(Wrinkles)

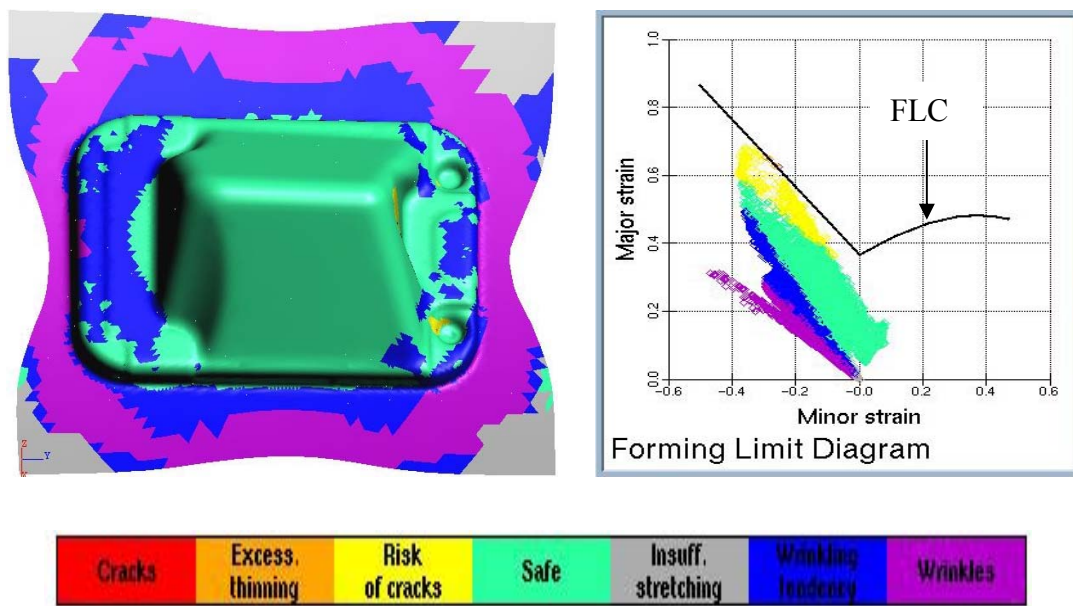
จากภาพประกอบ 28 พบว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายในแนวด้านบนและด้านข้างสองด้าน ซึ่งเป็นสีแดง(Cracks)บริเวณขอบมีแนวโน้มเกิดการย่น(สีน้ำเงิน)และรอยย่น(สีม่วง)เมื่อพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดกระจายบริเวณความเครียดในระนาบและด้านขวาอยู่เหนือเส้น FLC

1.2 ผลการวิเคราะห์ขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านใน



ภาพประกอบ 29 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCE ในขั้นตอน Draw 1

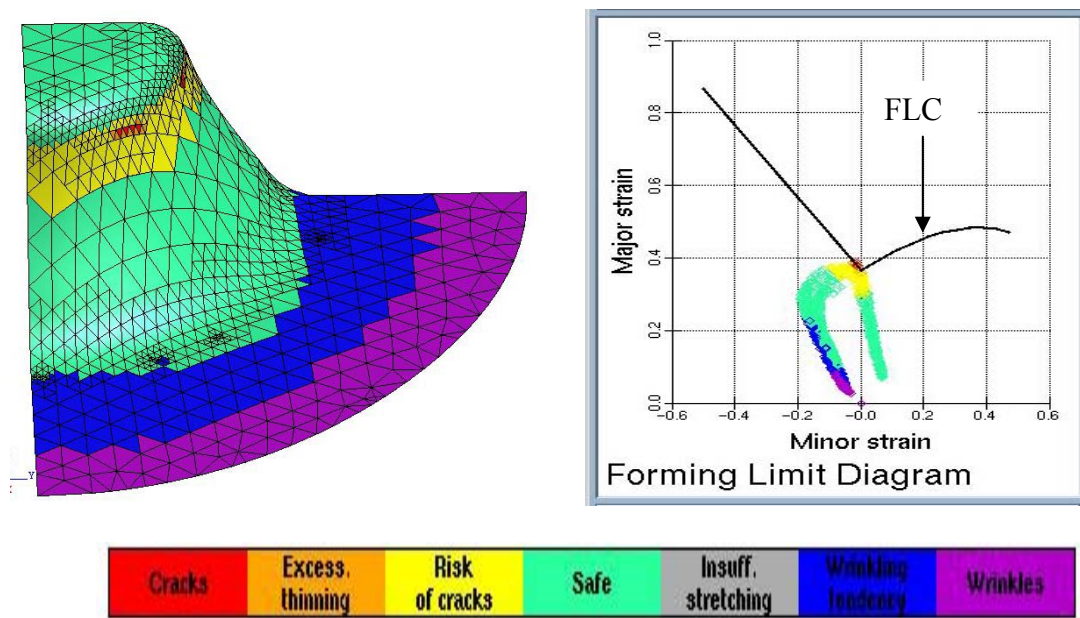
จากภาพประกอบ 29 พบว่าชิ้นงานบริเวณที่ขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปได้ดี เมื่อพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดกระจายบริเวณความเครียดในระนาบและด้านซ้ายของ FLC ซึ่งอยู่ต่ำกว่าเส้น FLC



ภาพประกอบ 30 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCE ในขั้นตอน Draw 2

จากภาพประกอบ 30 พบว่าชิ้นงานบริเวณที่ขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปได้ดี เมื่อพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดกระจายบริเวณความเครียดในระนาบและด้านซ้ายของ FLC ซึ่งอยู่ต่ำกว่าเส้น FLC บริเวณขอบเลื่อนเข้ามาเนื่องจากใช้ตรอว์บีดในการวิเคราะห์ด้วย บริเวณขอบมีแนวโน้มเกิดการย่น(สีน้ำเงิน)และรอยย่น(สีม่วง)

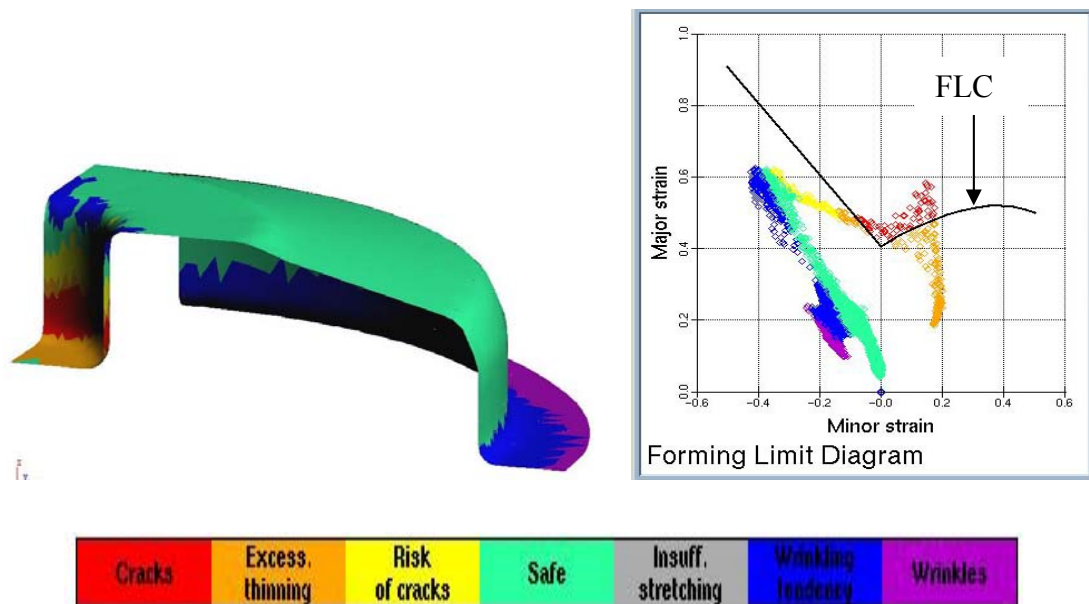
2. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCE



ภาพประกอบ 31 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCE กับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยทรงกรวย

จากภาพประกอบ 31 พบว่าการวิเคราะห์ขึ้นรูปด้วยทรงกรวยของเหล็ก SPCE โดยใช้การวิเคราะห์ $\frac{1}{4}$ ของชิ้นงาน ลักษณะชิ้นงานจะเกิดการยืดและการตีปดรอว์ แนวโน้มเกิดรอยแตกบริเวณด้านข้างปลายด้วยทรงกรวย ความเครียดอยู่ในแนวเส้น FLC

3. ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานหม้อลมเบรกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPC270



ภาพประกอบ 32 การวิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPC270 กับการขึ้นรูปหม้อลมเบรก

จากภาพประกอบ 32 พบว่าการวิเคราะห์ขึ้นรูปหม้อลมเบรกของเหล็ก SPC270 โดยใช้การวิเคราะห์ $\frac{1}{4}$ ของชิ้นงานเนื่องจากสมมาตรกัน ลักษณะชิ้นงานจะเกิดการดีปดอร์และการยืดขึ้นรูปทั้งสองด้าน เกิดรอยแตกบริเวณด้านข้างตรงส่วนปลายแกนกลางหม้อลมเบรก ความเครียดของรอยแตกอยู่เหนือเส้น FLC บริเวณความเครียดในระนาบ(Plane Strain)

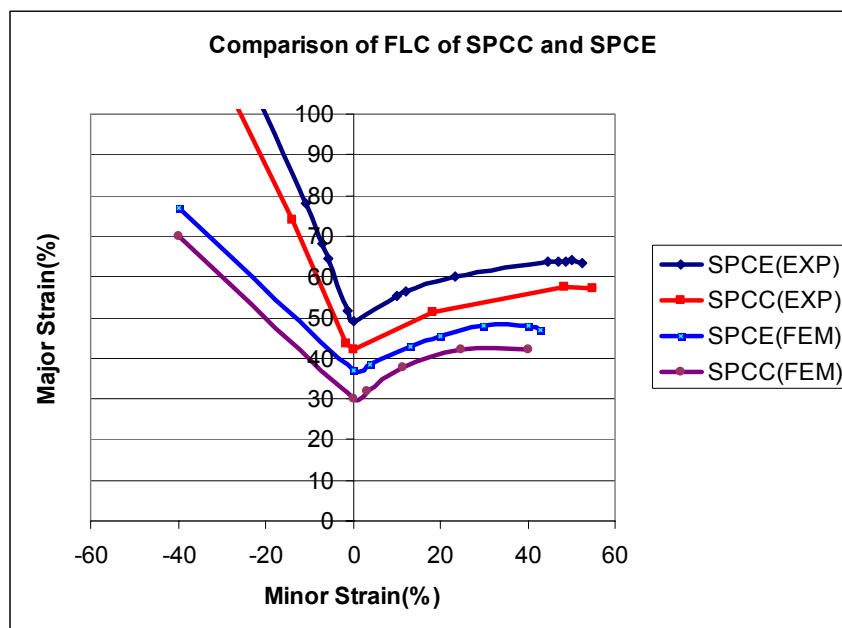
ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับหัวข้อนี้มีดังต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

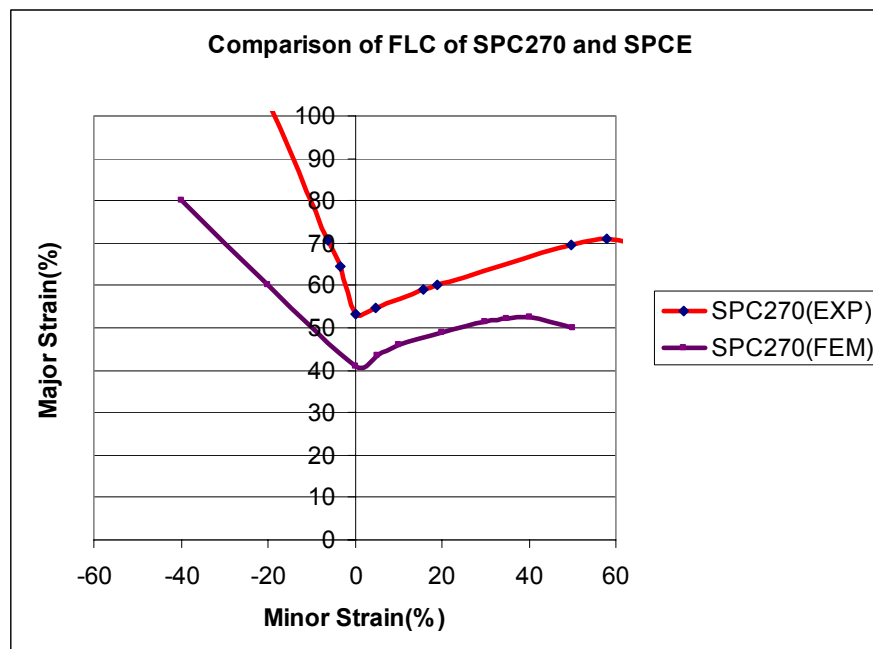
1.1 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างเหล็ก SPCC กับ SPCE หน้า 0.8 mm.



ภาพประกอบ 33 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC และ SPCE หน้า 0.8 mm. จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพประกอบ 33 พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE สูงกว่าเหล็ก SPCC เท่ากับ 7 % ทั้งที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองสูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งของเหล็ก SPCE และ SPCC ประมาณ 12 % ณ ตำแหน่งความเครียดในระนาบ(FLD_0), 40 % ณ ตำแหน่งความเครียดตรง -20 % และ 12 % ณ ตำแหน่งความเครียดตรง 20 %

1.2 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPC 270 หน้า 1.4 mm.



ภาพประกอบ 34 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 หน้า 1.4 mm. ที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

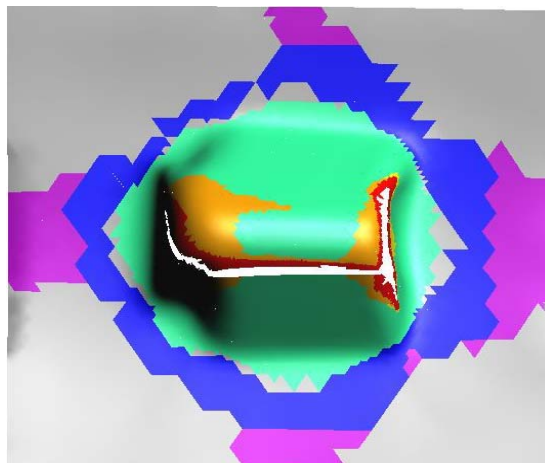
จากภาพประกอบ 34 พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็ก SPC270 ที่ได้จากการทดลองสูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณ 12 % ณ ตำแหน่งความเครียดในระนาบ(FLD_0), 40 % ณ ตำแหน่งความเครียดตรง -20 % และ 12 % ณ ตำแหน่งความเครียดตรง 20 %

2. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 ตัวถังรถยนต์ด้านใน(Automotive Inner-Part)



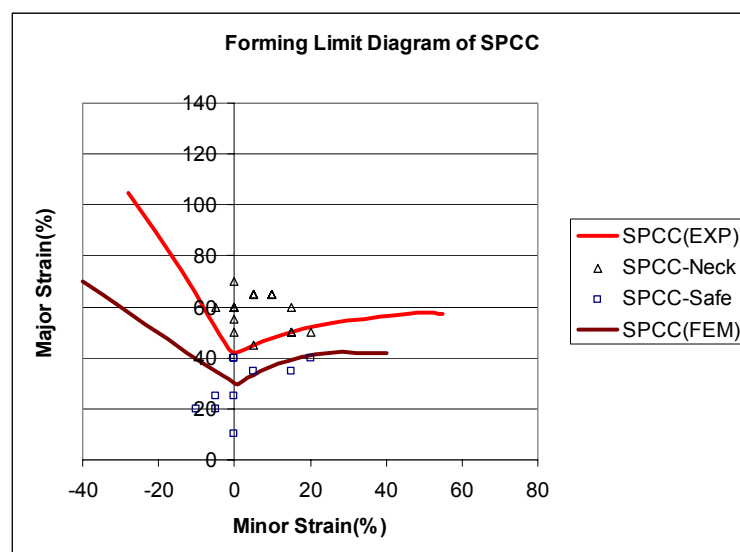
(a) ชิ้นงานจริงหล่อขึ้นด้วยน้ำมัน Renoform



(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 35 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 1 ของเหล็ก SPCC

จากภาพประกอบ 35 พบว่าชิ้นงานทั้งสองมีรอยแตกที่สอดคล้องกัน อยู่ในทิศทางเดียวกัน และรอยแตกของไฟไนต์เอลิเมนต์สูงกว่าการขึ้นรูปจริงที่หล่อขึ้นน้ำมันขึ้นรูป Renoform เพียงเล็กน้อย

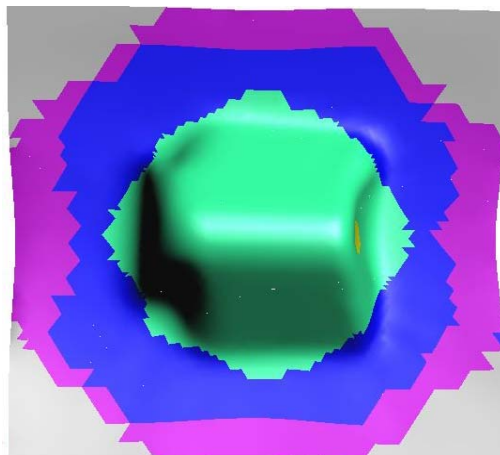


ภาพประกอบ 36 เปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดชิ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPCC

จากภาพประกอบ 36 พบว่าจุด Neck จากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอยู่ตามแนวเส้นโค้ง ชีตจำกัดการขึ้นรูป ส่วนจุด Safe อยู่ใต้เส้น FLC จากการทดลองแต่อยู่เหนือเส้น FLC จากไฟไนต์เอลิเมนต์



(a) ชิ้นงานจริง



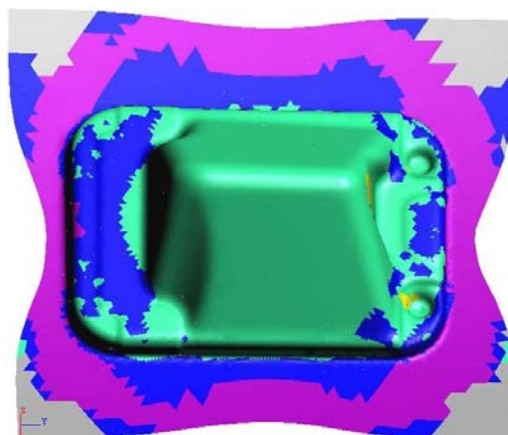
(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 37 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 1 ของเหล็ก SPCE

จากภาพประกอบ 37 พบว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีความสอดคล้องกันมาก รอยย่นที่ขอบด้านนอกของไฟไนต์เอลิเมนต์เหมือนกันกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง บริเวณที่ขึ้นรูปไม่มีรอยย่นเลย ชิ้นงานอยู่ในสภาพดี



(a) ชิ้นงานจริง



(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 38 การเปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 2 ของเหล็ก SPCE

จากภาพประกอบ 38 พบว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีความสอดคล้องกันมาก รอยย่น(สีม่วง) ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมือนกันกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง บริเวณปีกขอบของชิ้นงานทั้งสองเลื่อนเข้ามาลักษณะเดียวกัน บริเวณที่ขึ้นรูปไม่มีรอยย่น ชิ้นงานอยู่ในสภาพดี



(a) ชิ้นงานจริง



(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

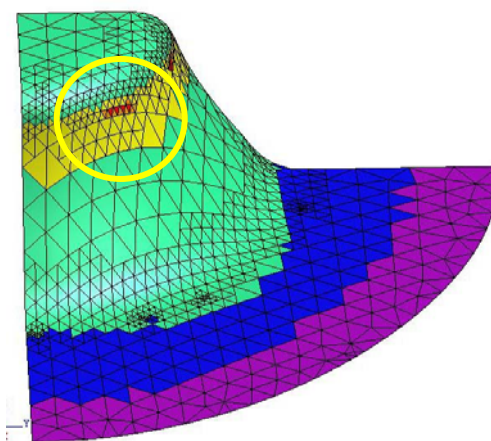
ภาพประกอบ 39 เปรียบเทียบชิ้นงานในขั้นตอน Draw 2 ของเหล็ก SPCE สภาพเสียหาย

จากภาพประกอบ 39 พบว่าชิ้นงานเกิดรอยคอดด้านหัวท้าย อยู่ในตำแหน่งที่สอดคล้องกันระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 การขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย(Conical Cups)



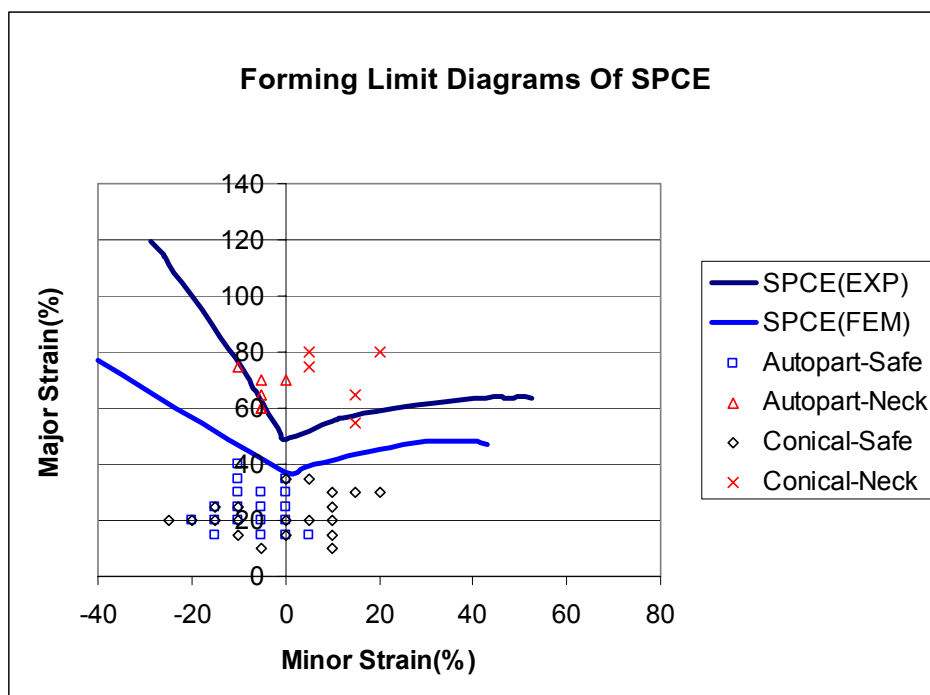
(a) ชิ้นงานจริง



(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 40 เปรียบเทียบชิ้นงานในการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยของเหล็ก SPCE

จากภาพประกอบ 40 พบว่าชิ้นงานเกิดรอยแตกที่ด้านข้างส่วนปลายของถ้วยทรงกรวย รอยย่นบริเวณขอบมีเพียงเล็กน้อย ลักษณะชิ้นงานสอดคล้องกันระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



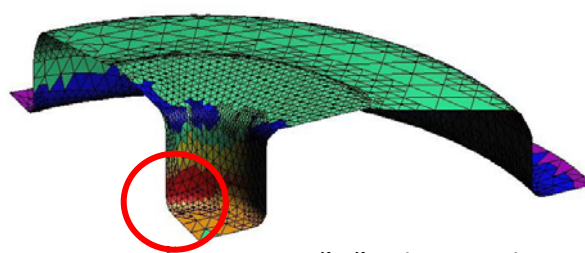
ภาพประกอบ 41 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดชิ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPCE

จากภาพประกอบ 41 พบว่าจุด Neck จากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอยู่ตามแนวเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ส่วนจุด Safe อยู่ใต้เส้น FLC จากการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นว่า FLD จากการทดลองให้ผลที่ดีกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 การขึ้นรูปหม้อลมเบรก(Body Booster)



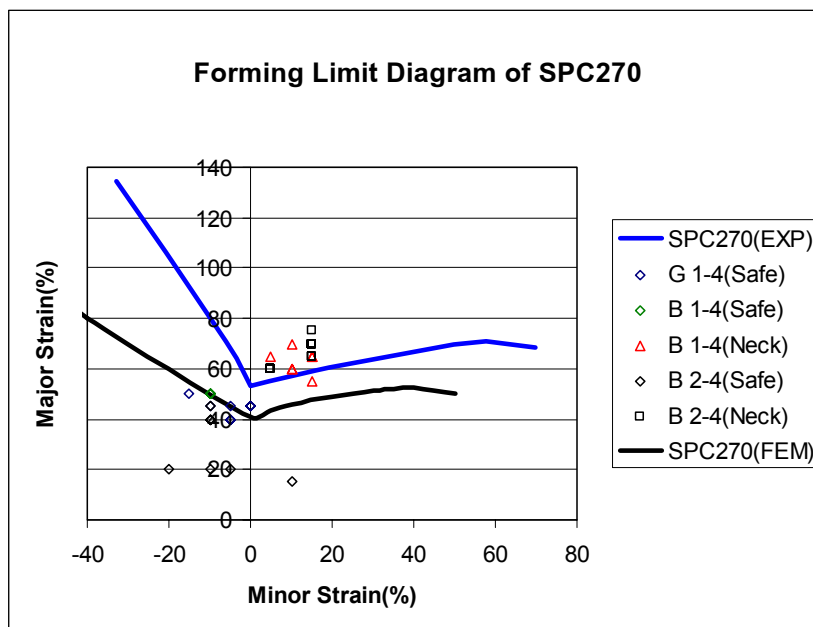
(a) ชิ้นงานจริง



(b) ชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 42 การเปรียบเทียบชิ้นงานในการขึ้นรูปหม้อลมเบรกของเหล็ก SPC270

จากภาพประกอบ 42 พบว่าชิ้นงานเกิดรอยคอดตรงส่วนกลางด้านล่างและสอดคล้องกันระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพประกอบ 43 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยความเครียดชิ้นงานจริง บริเวณจุดปลอดภัยและจุดรอยคอดของเหล็ก SPC270

จากภาพประกอบ 43 พบว่าจุด Neck จากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอยู่ตามแนวเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ส่วนจุด Safe อยู่ใต้เส้น FLC จากการทดลองแต่อยู่เหนือเส้น FLC จากไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram, FLD) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์และเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCEหนา 0.8 mm. และ SPC270 หนา 1.4 mm. ขึ้นรูปกิริตวงกลมบนแผ่นแบล็กทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า เปลี่ยนขอบของแผ่นแบล็กด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิคด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์ 100 mm. กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วัดขนาดการเปลี่ยนรูปของกิริตวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปและประยุกต์ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในเปรียบเทียบกับโปรแกรม AUTOFORM 3.26 ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

สรุปผล

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram, FLD) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02

ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้นโดยวิธีการทดลองสร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02

2. ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์

ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ ทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหายและความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

3. เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองเมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แตกต่างกัน 12 % ณ ความเครียดในระนาบและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่สอดคล้องกัน

อภิปรายผล

ผลการหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้วิจัยคือ SPCE, SPC270 และ SPCC ได้ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n)เท่ากับ 0.2703, 0.2472 และ 0.2155 ตามลำดับ ส่วนค่าแอนไอโซทรอปิกตึงฉีก(r_m)เฉลี่ยเท่ากับ 2.480, 1.808 และ 1.307 ตามลำดับเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเหล็ก SPCE มีค่า n และค่า r_m สูงทำให้การยืดและการตีปดรอร์ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ซึ่งเป็นไปตามไบรอัน เทย์เลอร์ โดยดูได้จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCE และ SPCC จุตรอยคอดของ SPCE จะมีความเครียดหลักสูงกว่า SPCC ส่วนเหล็ก SPC270 มีสมบัติเชิงกลของค่า n และค่า r_m ระหว่างกลางทั้งสองวัสดุจึงมีการยืดและการดรอว์ได้น้อยกว่า SPCE แต่สูงกว่า SPCC

การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นแบลงก์ $R = 0, 40, 50, 57.5, 65, 72.5$ และ 80 mm . พบว่าให้ผลได้ดีตามการวิจัยของสุวัฒน์ จีระธีรนาถ การหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานให้ผลความเครียดได้ดีโดยเฉพาะ SPCE ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของ FLC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hecker และ เซษฐ์ อูริยัง เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสามวัสดุให้ผลในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Hecker ชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ(รีดเย็น) ส่วนด้านซ้ายของ FLC จากการทดลองมีมุมใกล้เคียงกันเพราะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเหมือนกันเฉลี่ยประมาณ 43 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองของ Keeler ประมาณ 45 องศา

ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองที่ความหนาเท่ากันมีลักษณะคล้ายๆกันแต่ตำแหน่งแตกต่างกันโดย SPCE สูงกว่า SPCC เท่ากับ 7% ณ ความเครียดในระนาบทั้งจากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นว่าเหล็ก SPCE นำมาใช้ในงานตีปดรอร์ได้ดีกว่าเหล็ก SPCC ผลจากการทดลองขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมจะได้ FLC สูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงานจริงสูงกว่าโปรแกรมประมาณ 12% ณ ความเครียดในระนาบ บางครั้งการทำนายการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดความเสียหายแต่ชิ้นงานจริงอาจจะไม่เสียหายก็ได้ จึงควรกำหนด FLC ในไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCC จากการขึ้นรูปขึ้นส่วนรยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยืดตัวจนเกิดความเสียหายไม่สามารถขึ้นรูปได้เลย แตกต่างจากเหล็ก SPCE ที่ตีปดรอร์ได้ดีจนกระทั่งขั้นตอน Draw 2 และตีปดรอร์จนเกินขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยการปรับแบลงก์โฮลเดอร์และสโตรค ส่วน SPC270 ที่มีการขึ้นรูปหลายขั้นตอนทั้งขึ้นงานดีและขึ้นงานเสียความเครียดกระจายด้านซ้ายและด้านขวาของ FLC ซึ่งการใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานจริงได้ แต่โดยทั่วไปจะเหมาะกับการขึ้นรูปขั้นตอนเดียวมากกว่า อาจจะเนื่องมาจากค่า n ก็ได้ทำให้ FLC เปลี่ยนไปในการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 2 เมื่อโลหะเกิดการยืดสองแกนจะทำให้ FLC ต่ำลงแต่เมื่อเกิดการตีปดรอร์เป็นแรงดึงทำให้ FLC สูงขึ้นตามการวิจัยของ Stoughton, Thomas B. และ Zhu, Xinhai. แต่ถ้าพิจารณากรณีที่เปลี่ยนรูปตามสภาพจริงบนแผ่นโลหะให้ผลสอดคล้องกับ FLC ขนาดความเครียดของชิ้นงานจริงวัดด้วยแผ่นไมล้าซึ่งมีความละเอียดไม่มากนักทำให้ความเครียดคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย

การขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่แม่นยำ ได้มาจากการสร้าง Tooling ของบริเวณขอบพื้นที่ ดายและ Binder ที่ถูกต้องตามการขึ้นรูปจริง ซึ่งการใช้โปรแกรม Autoform 3.26 กำหนดเอลิเมนต์เริ่มต้นเป็นแบบ Auto หรือการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กำหนดที่ 1000 เอลิเมนต์และปรับเปลี่ยนไป(Adaptive)ตามการขึ้นรูป ทำให้ได้ผลถูกต้องและเที่ยงตรง

การเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปบริเวณจุดปลดรอยและจุดรอยคอด แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเกิดความเสียหายแต่ชิ้นงานจริงไม่เสียหายแตกต่างกันประมาณ 10% ทั้งเหล็ก SPCC และ SPCE ส่วน SPC270 ก็เช่นเดียวกันแต่ลดลงมาประมาณ 4% อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปที่มีความเครียดมาก่อน(Prestrain)

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะทั่วไป

1. เมื่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ ผู้สร้างแม่พิมพ์ควรจะให้แม่พิมพ์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปวิเคราะห์ก่อนการสร้างแม่พิมพ์
2. ควรจะสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุหลายๆชนิด หลายๆความหนา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานต่างๆได้
3. เหล็กชนิดเดียวกันแต่มีการผลิตคนละช่วงเวลา คุณภาพการผลิตไม่เหมือนกันหรือคนละบริษัทอาจทำให้สารฝังใน สมบัติเคมีและสมบัติเชิงกลไม่เหมือนกัน ทำให้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแตกต่างกัน การประเมินอาจจะคลาดเคลื่อนได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

1. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับสมการของงานวิจัยที่มีการยอมรับ
2. เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยการเปลี่ยน Tooling สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ศึกษาและเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่มีความเครียดมาก่อน(Prestrain) เพื่อวิเคราะห์ชิ้นงานขั้นตอนเดียวและหลายขั้นตอน
4. ศึกษาและเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุชนิดเดียวกันหรือสมบัติวัสดุใกล้เคียงกัน กับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของต่างประเทศที่มีข้อมูลแล้วสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงาน

บรรณานุกรม

- กิตติภัฏ รัตนจันทร์. (2542). ผลกระทบจากดรอว์บีตในการขึ้นรูปโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- ชาญ ถนัดงาน. (2547). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณัฐพล ศิริสว่าง. (2541). การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- ดิลก ศรีประไพ. (2542). การวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีร่วมกับสถาบันยานยนต์ กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สมชาย สิงห์โต. (2544). วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น. นครนายก: ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.
- Aghaie-Khafri, M.; & Mahmudi, R. (2004). Predicting of Plastic Instability and Forming Limit Diagrams. *International Journal of Mechanical Sciences*. (46) : 1289-1306.
- Avila, Antonio F.; & Vieira, Evanio L.S. (2003). Proposing a Better Forming Limit Diagram Prediction: A Comparative Study. *Journal of Materials Processing Technology*. (141) : 101-108.
- Banabic, D.; et al. (2000). *Formability of Metallic Materials*. Germany: Springer.
- Butuc, M.C.; Gracio, J.J.; & Barata da Rocha, A. (2003). A Theoretical Study of Forming Limit Diagrams Prediction. *Journal of Materials Processing Technology*. (142) : 714-724.
- Chet Uthiyoung; et al. (2004). *Increase the Efficiency of Deep Drawing Process by Using Lubricants*. MSAT. pp. 70-72. Thailand: National Metal and Materials Technology Center.
- Daw-Kwei Leu. (1999). The Limiting Drawing Ratio for Plastic Instability of The Cup-Drawing Process. *Journal of Material Processing Technology*. (86) : 168-176.
- Gotoh, Manabu.; Miura, Atuyuki.; & Tanaka, Kozo. (1988). The Forming Limit Diagram of a Brass Sheet. *JSME International Journal*. 1(31) : 249-256.

- GranZow, W.G.; Armco.; & Inc. (1990). Sheet Formability of Steel. In *Metal Handbook*. Volume 1 Properties and Selection: Iron, Steel, and High-Performance Alloys. 10th ed. Ohio 44073: ASM International Handbook Committee.
- Hecker, S.S. (1975). Simple Technique for Determining Forming Limit Curves. *Sheet Metal Industries*. pp. 671-676 : Los Alamos University
- Hosford, William F.; & Caddell, Robert M. (1993). *Metal Forming : Mechanics and Metallurgy*. 2nd ed. USA: PTR Prentice, Englewood Cliffs, N.J. 07632.
- Huang, You-Min.; & Chen, Jia-Wine. (1995). Influence of The Die Arc on Formability in Cylindrical Cup-Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. (55) : 360-369.
- Huang, You-Min.; & Chen, Jia-Wine. (1996). Influence of The Tool Clearance in The Cylindrical Cup-Drawing Processes. *Journal of Materials Processing Technology*. (57) : 4-13.
- Standard Test Method for Determining Forming Limit Diagram. (2005). In *Annual Book of ASTM Standards, Section 3, volume 03.01*. pp. 1252-1266. Philadelphia: ASTM International.
- Stoughton, Thomas B.; & Zhu, Xinhai. (2004). Review of Theoretical Models of The Strain-based FLD and Their Relevance to The Stress-based FLD. *International Journal of Plasticity*. (20) : 1463-1486.
- Suwat Jirathearanat.; Thanasan Intarakumthornchai.; & Wiroch Limtrakarn. (2004). *Finite Element Simulation Study of Hemispherical Dome Forming-Construction of Forming Limit Diagram(FLD) for Sheet Metal Forming Process*. MSAT. pp. 79-81. Thailand: National Metal and Materials Technology Center.
- Taylor, B. (1988). Formability Testing of Sheet Metals. In *Metal Handbook*. Volume 14 Forming and Forging. 9th ed. Ohio 44073: ASM International Handbook Committee.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141

ภาคผนวก ข

ความผิดพลาดของการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลอง

ภาคผนวก ค

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแรงดึง

ภาคผนวก ง

เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปกิริตวงกลม

ภาคผนวก จ

เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ-ชิ้นงาน

ภาคผนวก จ

เครื่องมือและอุปกรณ์วัดความเครียด

ภาคผนวก ข

ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPCC

ภาคผนวก ซ

ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPCE

ภาคผนวก ฅ

ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPC270

ภาคผนวก ญ

ลักษณะของชิ้นงานจริงที่ใช้ในการวิจัย

ภาคผนวก ก

วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02

(Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves)

ภาคผนวก ก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา

บรรณานุกรม

ประวัติย่อผู้วิจัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยคือเหล็กแผ่น SPCC, SPCE และ SPC270 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกรรมวิธีการผลิตแบบรีดเย็น ใช้สำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งนิยมใช้กันภายในประเทศและยังสามารถผลิตเองได้หรือนำเข้ามาในราชอาณาจักรจะต้องมีคุณภาพผ่านตามมาตรฐานของ มอก. 2012 (TIS 2012) ซึ่งเทียบได้กับมาตรฐาน ISO 3574 และ JIS G 3141 ซึ่งเหล็ก SPCC มีสมบัติเป็นเหล็กเชิงพาณิชย์(Commercial, Standard properties) เหล็ก SPCE มีสมบัติเป็นเหล็กชนิด Deep Drawing และ เหล็ก SPC270 มีสมบัติเป็นเหล็กชนิด Drawing

ตาราง 3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141

ชนิดวัสดุ	คุณภาพ	ความหนา (มม.)	ความเค้น สูงสุด(MPa)	การยืดตัวตาม ความหนา(%)	ความแข็ง (HRB)
SPCC	Commercial	0.8	270 (min)	36 (min)	-
SPCE	Deep drawing	0.8	270 (min)	40 (min)	53 (max)
SPCD	Drawing	1.4	270 (min)	39 (min)	57 (max)

ที่มา : หนังสือมาตรฐานของ Japanese Industrial Standard(JIS)

ตาราง 4 สมบัติเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน JIS G 3141

ชนิดวัสดุ	คุณภาพ	C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
SPCC	Commercial	0.15 (max)	0.60 (max)	0.05 (max)	0.05 (max)
SPCE	Deep drawing	0.10 (max)	0.45 (max)	0.03 (max)	0.03 (max)
SPCD	Drawing	0.12 (max)	0.50 (max)	0.04 (max)	0.04 (max)

ที่มา : หนังสือมาตรฐานของ Japanese Industrial Standard(JIS)

ตาราง 5 สมบัติเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ธาตุที่ ประกอบ	Weight percent (%)		
	SPCC	SPCE(A)	SPCD
C	0.0433	0.0024	0.0025
Si	0.0042	0.0039	0.0044
Mn	0.2196	0.1342	0.1381
P	0.0088	0.0104	0.0150
S	0.0038	0.0067	0.0067
Cr	0.0175	0.0261	0.0328
Mo	0.0010	0.0022	0.0035
Ni	0.0060	0.0174	0.0189
Ar	0.0253	0.0512	0.0629
Co	0.0023	0.0033	0.0037
Cu	0.0116	0.0371	0.0253
Nb	0.0007	0.0017	0.0019
Ti	0.0003	0.0500	0.0492
V	<0.0003	0.0023	0.0021
W	<0.0010	<0.0010	<0.0010
Pb	0.0022	0.0020	0.0021
Sn	0.0015	0.0035	0.0033
B	0.0027	0.0008	0.0008
Zn	<0.0010	0.0012	0.0010
N	0.0017	0.0008	0.0009
Fe	99.65	99.64	99.62

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC)

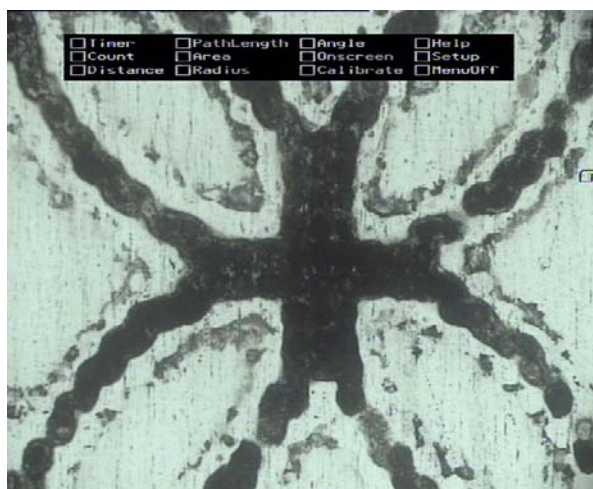
ความผิดพลาดของการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลอง

จากมาตรฐาน ASTM E2218-02 กำหนดให้การคลาดเคลื่อนในการสร้าง FLC ไม่เกิน 5% จึงจะทำให้ได้ FLC ที่ได้มาตรฐานสามารถวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ ซึ่งจากการสร้าง FLC ที่ผ่านมาสามารถสรุปการผิดพลาดจากสาเหตุดังนี้

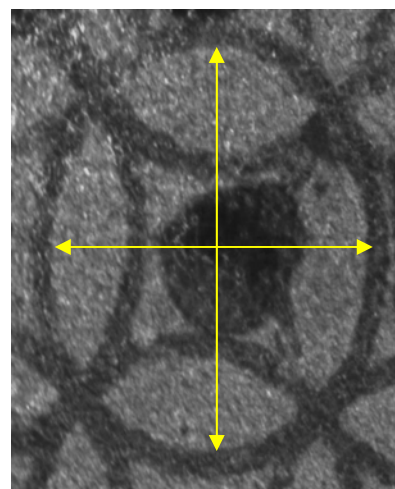
1. การกำหนดกริดไม่ถูกต้อง การกำหนดกริดที่เป็น Safe, Neck, Fail จะต้องเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบตามสภาพจริงที่เห็นชัดเจนเช่น Neck และ Fail เฉพาะที่เกิดบนกริดเท่านั้น ถัดจากนั้น 1-1.5 วงกลมที่เปลี่ยนรูปเป็น Safe

2. การเลือกลักษณะผิวที่กำหนดเป็น Safe, Neck, Fail ไม่ถูกต้อง กรณีที่ชิ้นทดสอบไม่เกิดรอยคอดและรอยแตกแต่อาจจะเกิดเป็นผิวส้ม โดยทั่วไปจะกำหนดเป็น Neck เพราะถึงแม้ผิวจะไม่แตกและไม่เกิดรอยคอดอย่างชัดเจนแต่ในงานขึ้นรูปถือว่าเป็นชิ้นงานเสียเช่นในหลัก SPCC กำหนดผิวส้มให้เป็น Neck เมื่อพล็อต FLC แล้วด้านขวาจะอยู่ในตำแหน่งอย่างเหมาะสม

3. ตำแหน่งการวัดกริดวงรีที่เปลี่ยนรูปไม่ถูกต้อง เนื่องจากเส้นกริดวงกลมซ้อนทับกัน แต่สามารถแบ่งแยกวงกลมอย่างชัดเจนตามภาพประกอบ 44a เมื่อมีการเปลี่ยนรูปควรจะวัดจากด้านในของความหนาเส้นกริดที่เปลี่ยนรูปและทับกันตามภาพประกอบ 44b



a



b

ภาพประกอบ 44 ลักษณะการซ้อนทับกันของกริดวงกลมก่อนและหลังการเปลี่ยนรูป

4. มีความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์การวัดกริดที่เปลี่ยนรูปด้วยแผ่นไมล้า เนื่องจากกริดมีขนาดเล็กทำให้การวัด Strain ด้วยแผ่นไมล้าซึ่งมีสเกลที่หยาบๆ มีความคลาดเคลื่อนสูง

5. การถ่ายภาพกริดเทียบกับจุดอ้างอิงไม่เป็นไปตามสภาพจริง เนื่องจากกริดมีขนาดเล็กทำให้การวัดด้วยสายตามีความคลาดเคลื่อนสูงจึงใช้โปรแกรม Dcal Image Processing วัดขนาดความเครียดโดยใช้การถ่ายภาพเทียบกับจุดอ้างอิง จุดอ้างอิงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 2.5 mm. ความหนาเส้นเท่ากับความหนาของ Stencil เท่ากับ 0.1 mm. ติดใกล้ๆกริดที่กำหนดในทิศทางการเปลี่ยน

รูปแนวเดียวกัน ใช้กล้อง Visualizer ร่วมกับตัวแปลงสัญญาณกำลังขยายประมาณ 3 เท่าหรือ Microscope กำลังขยาย 6.5 เท่าถ่ายภาพพบว่าจุดอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้าใช้ค่าเฉลี่ยทั้งสองด้านทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิน 5% ซึ่งสามารถปรับวิธีการวัดได้คือใช้ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนรูปในทิศทางเดียวกันเพียงสองด้านหรือปรับโปรแกรมของกล้อง Microscope ให้ความละเอียด (Pixel) สูงขึ้นทำให้จุดอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5%

6. เกิดจากผู้วัดขนาดกริดกำหนดระยะผิดพลาดอาจเนื่องมาจากกริดไม่ชัดเจน กริดเกิดรอยแตกและเส้นไม่คมชัดทำให้ความเครียดมีขนาดผิดพลาด การพล็อตผิดตำแหน่งไปด้วย

7. ใช้สูตรคำนวณหรือการคำนวณในการหาความเครียดหลักและความเครียดรองผิดพลาด

8. การขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมของชิ้นทดสอบไม่ได้ข้อมูลครบตามแนวเส้น FLC เช่นจุดดี การเกิดรอยคอดและรอยแตก

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแรงดึง



ภาพประกอบ 45 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์
แบบพลวัต(Universal test machine,
Dynamic type) ยี่ห้อ INSTRON
รุ่น 8801



ภาพประกอบ 46 ชิ้นทดสอบแรงดึง(Tensile specimen)



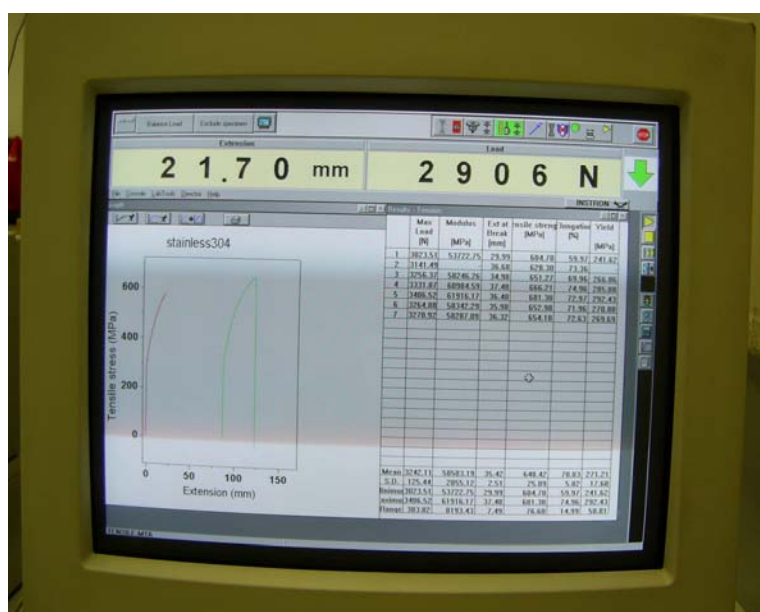
ภาพประกอบ 47 การติดตั้งตัวสอบเทียบ



ภาพประกอบ 48 ตัวสอบเทียบ(Calibrator)



ภาพประกอบ 49 การติดตั้งเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์(Extensometer)



ภาพประกอบ 50 หน้าจอมอนิเตอร์แสดงการวัดความเค้น-ความเครียด

เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปกริดวงกลม



ภาพประกอบ 51 แผ่น Stencils ขนาด 10x12 นิ้ว



ภาพประกอบ 52 รูปร่างและขนาดของกริดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm.



ภาพประกอบ 53 แผ่นเบาะรองใยสังเคราะห์



ภาพประกอบ 54 เครื่องแปลงไฟที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน



ภาพประกอบ 55 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อตีกริดวงกลม



ภาพประกอบ 56 ลักษณะการจัดวางแผ่น Stencils

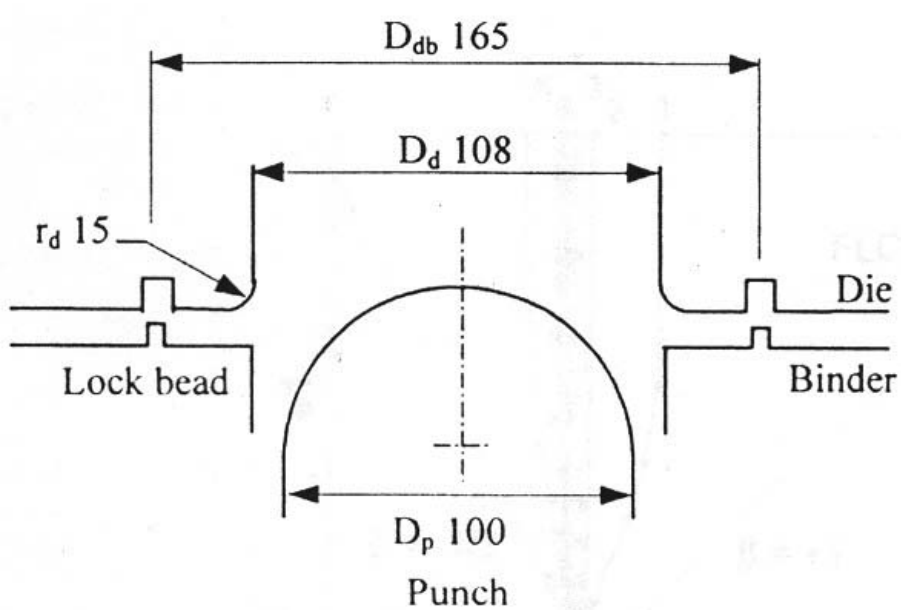


ภาพประกอบ 57 ลักษณะการขึ้นรูปกิริตวงกลมโดยใช้ลูกกลิ้งกด

เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ-ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 58 แม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม



ภาพประกอบ 59 ขนาดของแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม



ภาพประกอบ 60 แม่พิมพ์ขึ้นทดสอบ(Specimen)ตามมาตรฐาน ASTM E8 M



ภาพประกอบ 61 เครื่องเพรสไฮดรอลิค
ขนาด 80 ตัน



ภาพประกอบ 62 เครื่องเพรสไฮดรอลิก
ขนาด 300 ตัน

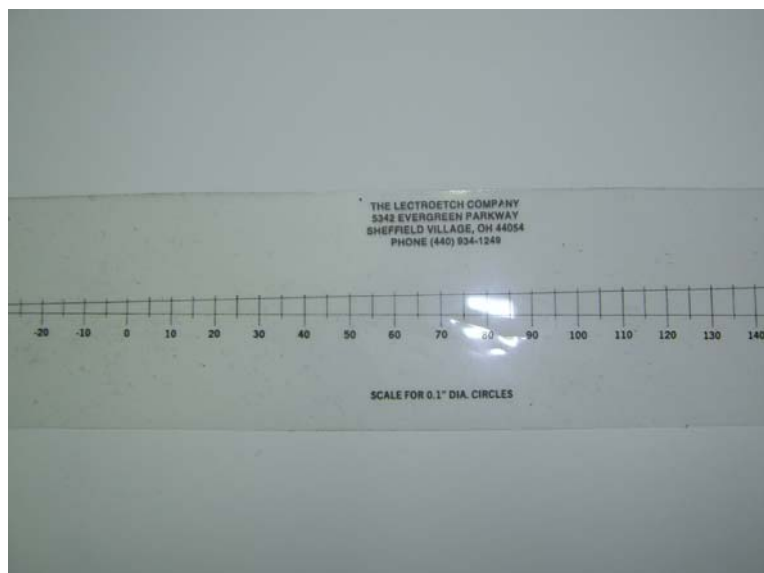


ภาพประกอบ 63 แม่พิมพ์ตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 1



ภาพประกอบ 64 แม่พิมพ์ตัวถังรถยนต์ด้านใน ขั้นตอน Draw 2

เครื่องมือและอุปกรณ์วัดความเครียด



ภาพประกอบ 65 แผ่นไมล้า(Myla Tape)วัดความเครียด



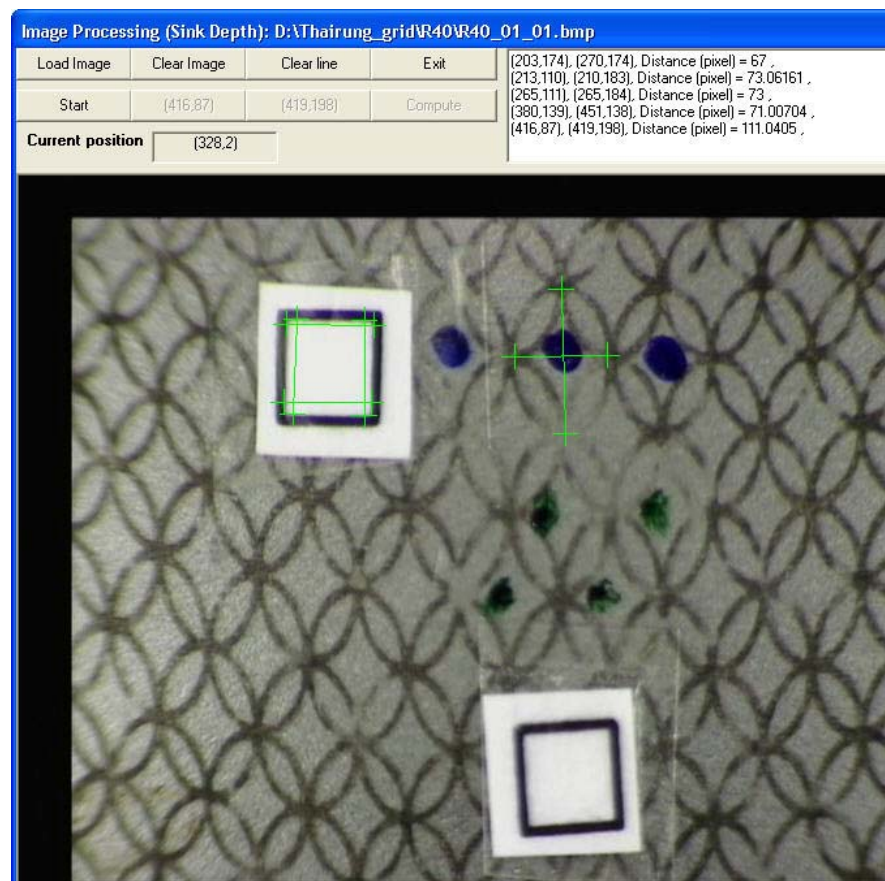
ภาพประกอบ 66 แวนขยายและวิธีการวัด



ภาพประกอบ 67 กล้อง Microscope พร้อมอุปกรณ์

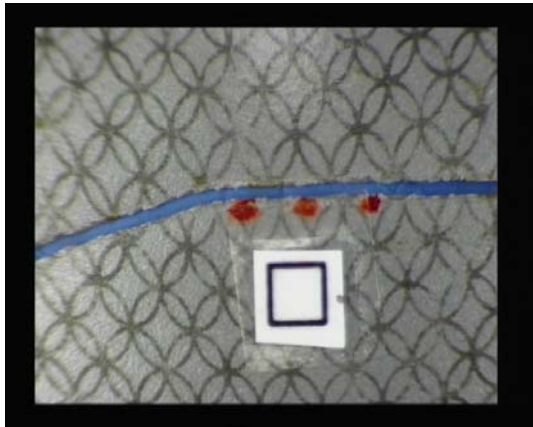


ภาพประกอบ 68 กล้อง Visualizer พร้อมอุปกรณ์

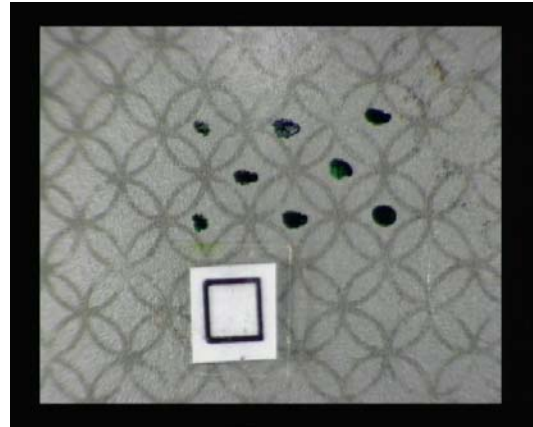


ภาพประกอบ 69 การวัดขนาดกริดวงรีด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing

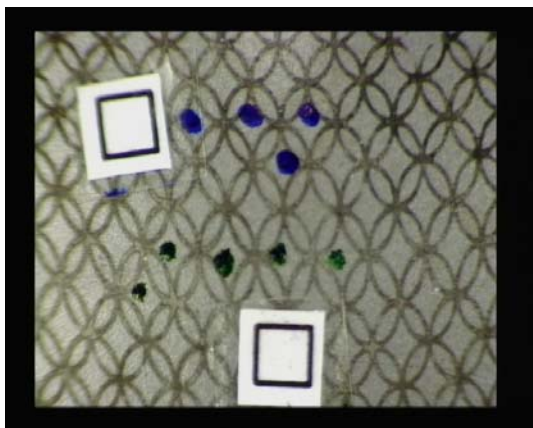
ลักษณะกิริตวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม
บนแผ่นเหล็ก SPCC



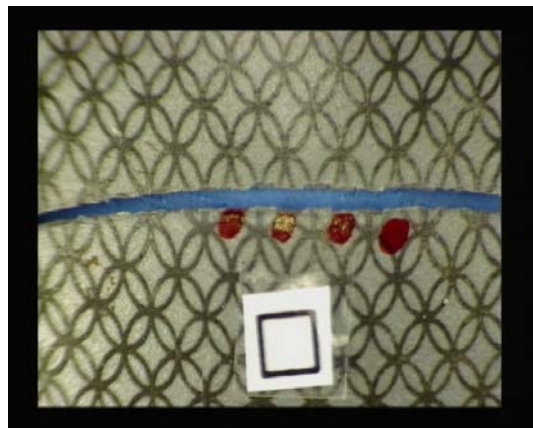
(a) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยน้ำมันขึ้นรูป



(b) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยพลาสติก

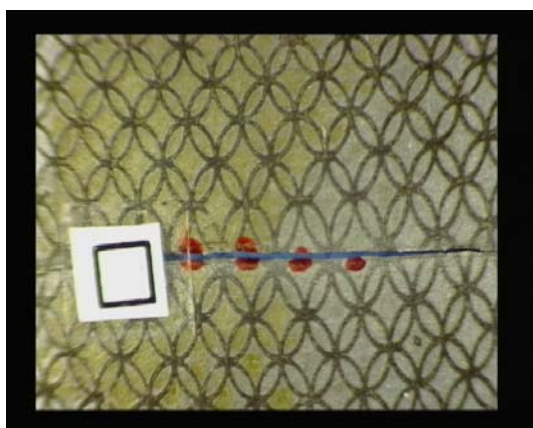


(c) แผ่นแบลงก์ $R = 40 \text{ mm}$.

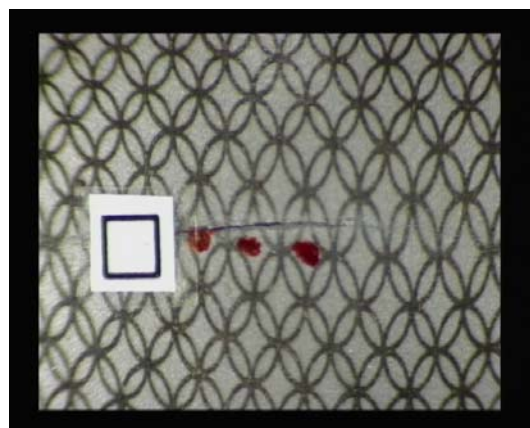


(d) แผ่นแบลงก์ $R = 50 \text{ mm}$.

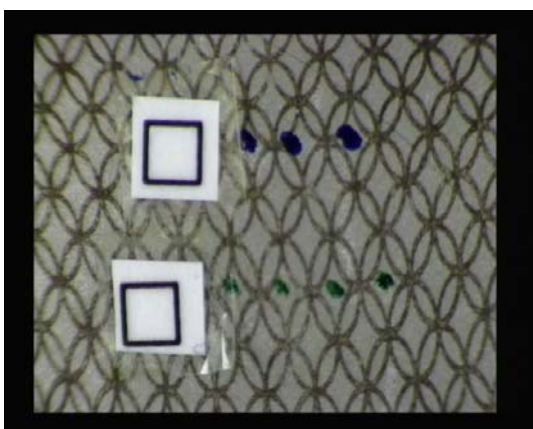
ภาพประกอบ 70 ลักษณะกิริตวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPCC โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer



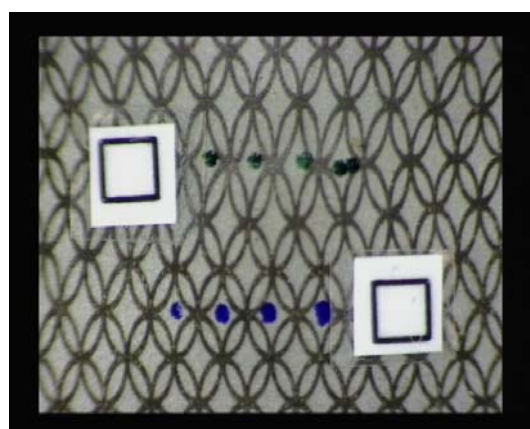
(e) แผ่นแบลงก์ $R = 57.5$ mm.



(f) แผ่นแบลงก์ $R = 65$ mm.



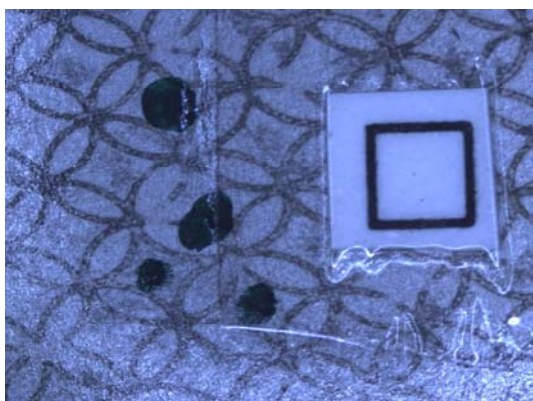
(g) แผ่นแบลงก์ $R = 72.5$ mm.



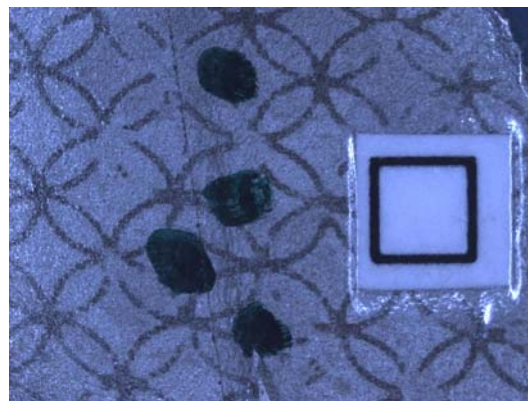
(h) แผ่นแบลงก์ $R = 80$ mm.

ภาพประกอบ 71 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPCC โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer(ต่อ)

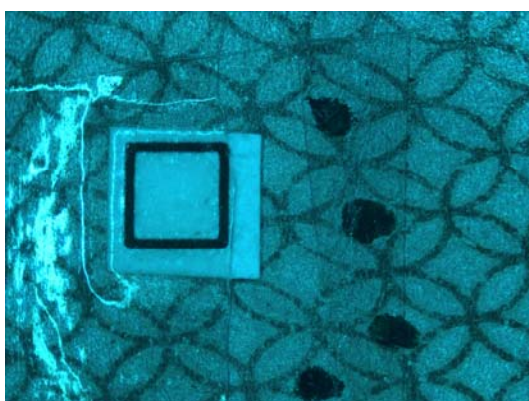
ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม
บนแผ่นเหล็ก SPCE



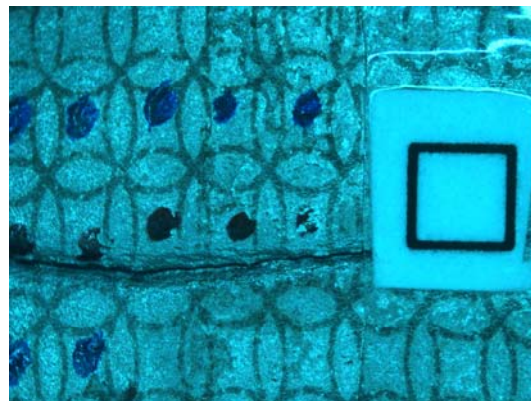
(a) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยน้ำมันขึ้นรูป



(b) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยพลาสติก

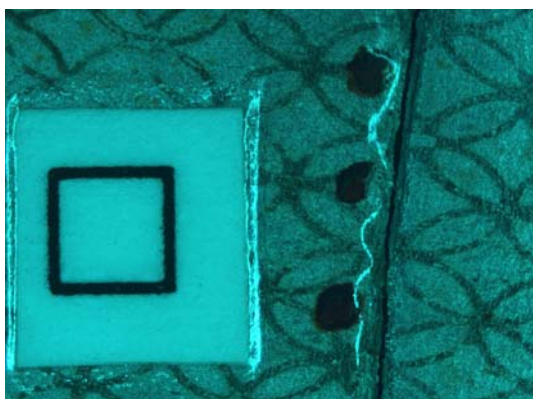


(c) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยน้ำมันมะพร้าว

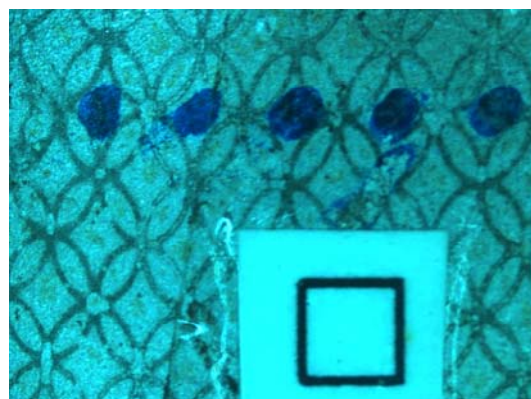


(d) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยน้ำมันSAE40

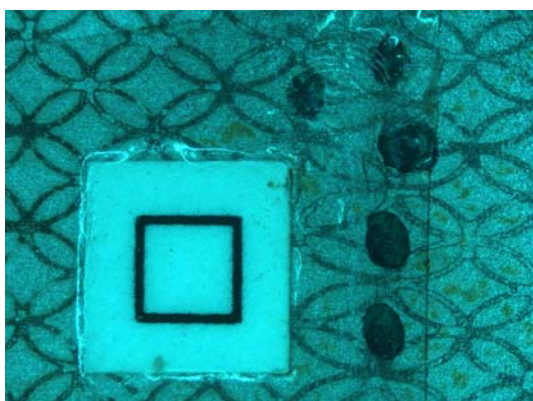
ภาพประกอบ 72 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPCE โดยการถ่ายรูปด้วย Microscope



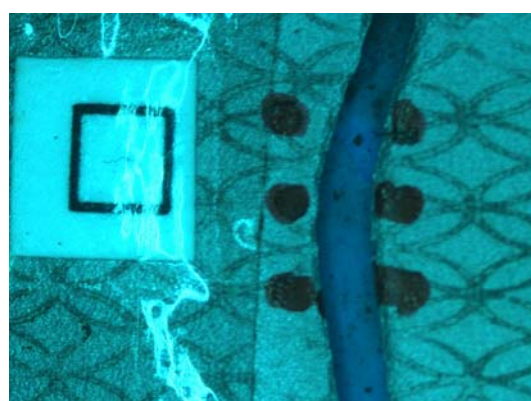
(e) แผ่นแบลงก์ R = 40 mm.



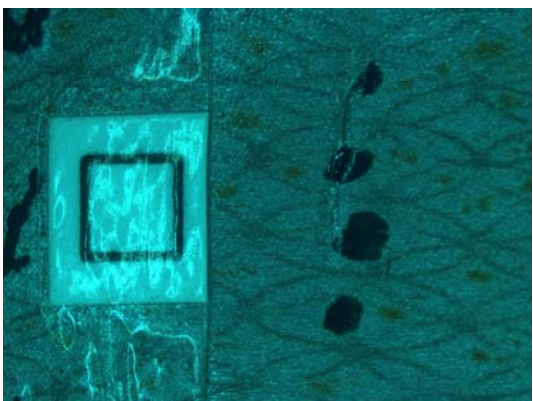
(f) แผ่นแบลงก์ R = 50 mm.



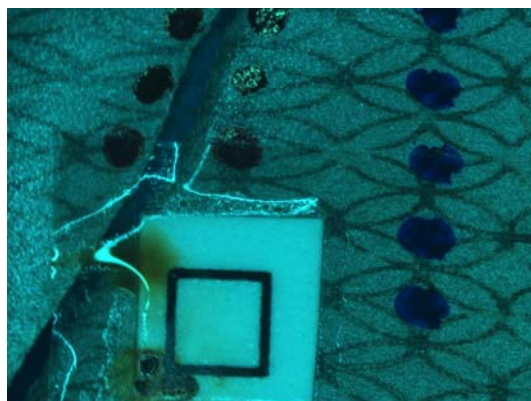
(g) แผ่นแบลงก์ R = 57.5 mm.



(h) แผ่นแบลงก์ R = 65 mm.



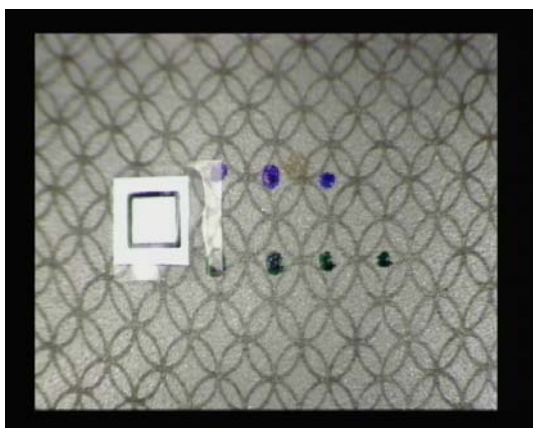
(i) แผ่นแบลงก์ R = 72.5 mm.



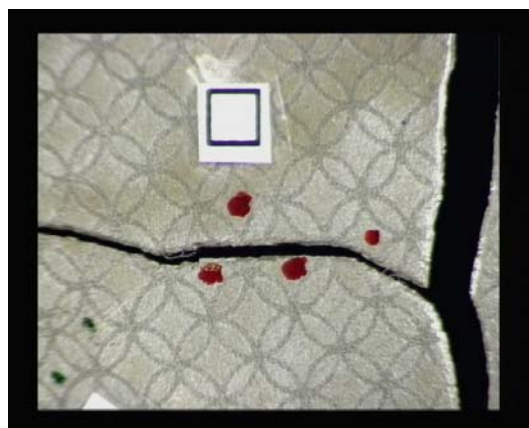
(j) แผ่นแบลงก์ R = 80 mm.

ภาพประกอบ 73 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่น
เหล็ก SPCE โดยการถ่ายรูปด้วย Microscope(ต่อ)

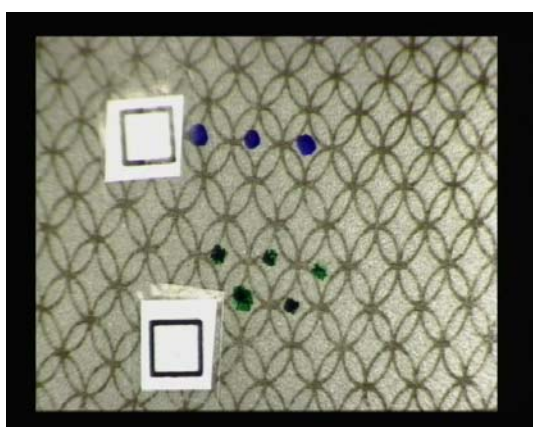
ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม
บนแผ่นเหล็ก SPC270



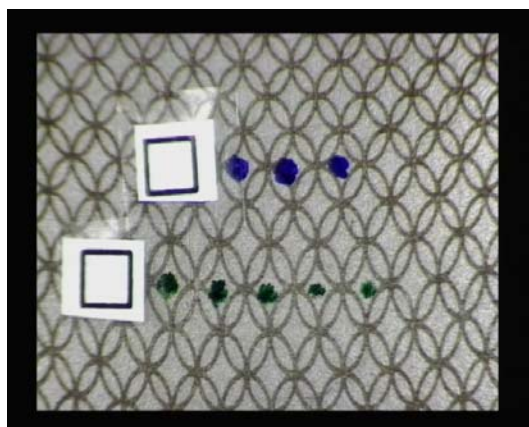
(a) แผ่นแบลงก์($R=0$)หล่อขึ้นด้วยน้ำมันขึ้นรูป



(b) แผ่นแบลงก์($R=0$) หล่อขึ้นด้วยพลาสติก

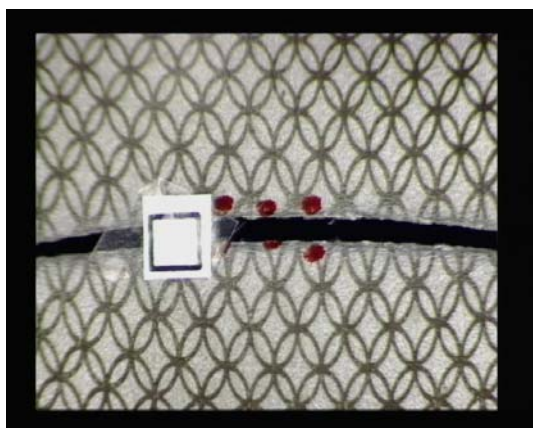


(c) แผ่นแบลงก์ $R = 40$ mm.

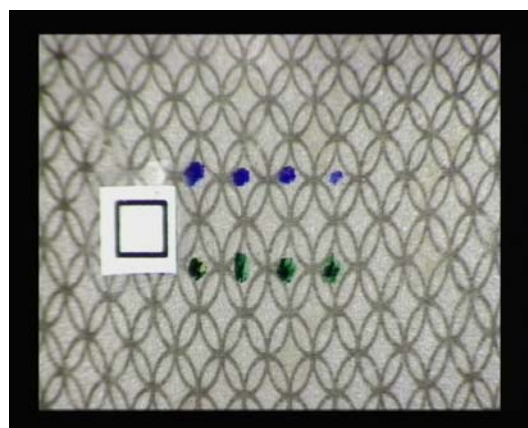


(d) แผ่นแบลงก์ $R = 50$ mm.

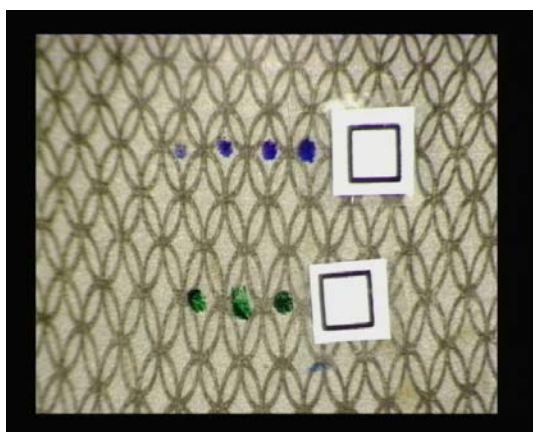
ภาพประกอบ 74 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPC270 โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer



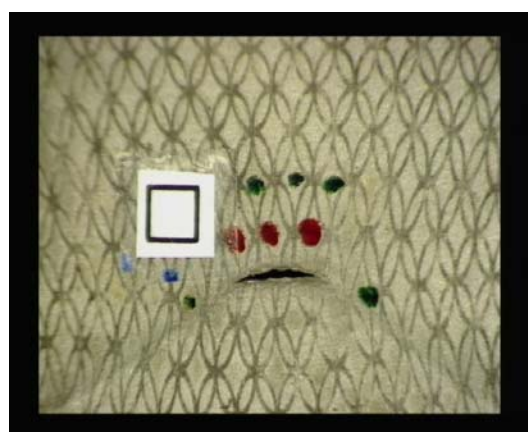
(e) แผ่นแบลงก์ R = 57.5 mm.



(f) แผ่นแบลงก์ R = 65 mm.



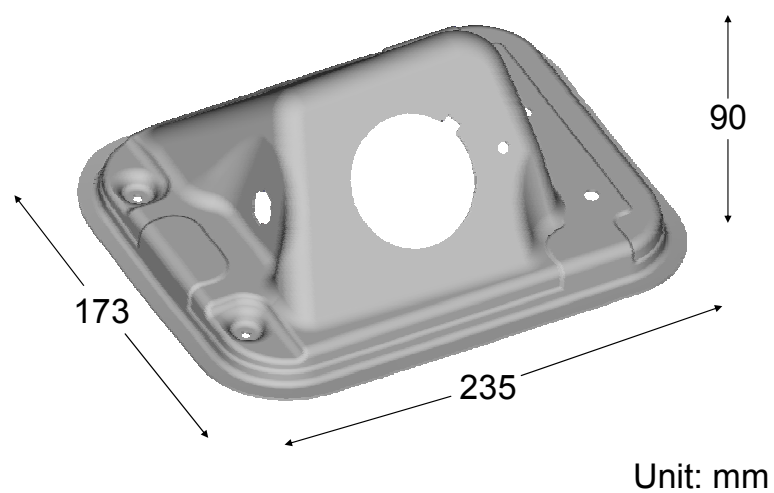
(g) แผ่นแบลงก์ R = 72.5 mm.



(h) แผ่นแบลงก์ R = 80 mm.

ภาพประกอบ 75 ลักษณะกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจากการขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมบนแผ่นเหล็ก SPC270 โดยการถ่ายรูปด้วย Visualizer(ต่อ)

ลักษณะของชิ้นงานจริงที่ใช้ในการวิจัย



ภาพประกอบ 76 ชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในหนา 0.8 mm.



ภาพประกอบ 77 ชิ้นงานรูปถ้วยทรงกรวยหนา 0.8 mm.



(a) หม้อลมเบรกด้านใน



(b) หม้อลมเบรกด้านนอก

ภาพประกอบ 78 ชิ้นงานขึ้นรูปหม้อลมเบรกของเหล็ก SPC270 หนา 1.4 mm.

วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02(Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves)

- มาตรฐานนี้เกิดขึ้นภายใต้ชื่อที่กำหนดว่า E 2218
- หมายเลขที่ต่อจากชื่อจะระบุถึงปีเริ่มแรกของการนำมาใช้หรือในกรณีที่มีการปรับปรุงใหม่หรือปีล่าสุดที่มีการปรับปรุง
- ตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บจะระบุถึงปีล่าสุดของการให้การยอมรับ
- ตัวอักษรเอปไซลอน(ϵ) ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงด้านทฤษฎีการหลังจากมีการปรับปรุงหรือให้การยอมรับ

1. ขอบเขต(Scope)

1.1 วิธีการนี้จะบอกถึงขั้นตอนของการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming limit curve)สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะแผ่น โดยการใช้การทดสอบของพื้นที่ครึ่งทรงกลมจนเกิดการเปลี่ยนรูปและการทดสอบการดึงตามแนวแกนต่อการจำลองด้วยปริมาณการดึงยืดขึ้นรูป(Stretch)สองแกนและกระบวนการตีปดรอว์(Deep draw)

1.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีประโยชน์ในการประเมินการขึ้นรูปของชิ้นงานโดยการวิเคราะห์ความเครียดของชิ้นส่วนที่ผลิตจากโลหะ

1.3 วิธีการนี้ใช้กับโลหะแผ่นจากขนาด 0.5 mm.(0.020 นิ้ว) ถึง 3.3 mm.(0.130 นิ้ว)

1.4 ค่าที่ระบุใน SI Units จะถือเป็นค่ามาตรฐานส่วนค่าโดยประมาณของนิ้ว – ปอนด์จะเป็นค่าเทียบเท่า

1.5 มาตรฐานนี้ไม่ได้มีความหมายครอบคลุมถึงการเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยหรือกับการใช้งาน ต้องถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้ที่จะต้องสร้างความปลอดภัยที่เหมาะสมและด้านสุขอนามัยด้วย รวมทั้งการกำหนดความสามารถในการประยุกต์ใช้ตามกฎหมายเกณฑ์ที่จำกัดไว้ก่อนการใช้งาน

2. เอกสารอ้างอิง(Referenced Documents)

2.1 มาตรฐาน ASTM :

A 568/A 568 M คุณสมบัติเฉพาะสำหรับแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน แผ่นเหล็กกล้าความต้านแรงสูงและแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำทั้งแบบรีดร้อนและรีดเย็น

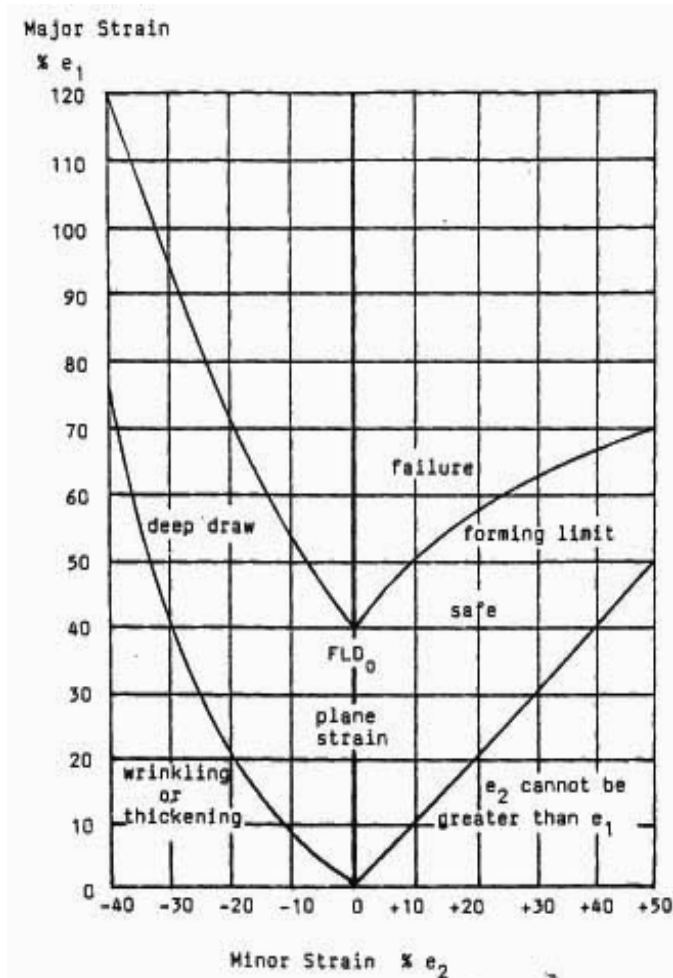
สิ่งที่จำเป็นทั่วไปสำหรับ

E 6 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องถึงวิธีการทดสอบทางเชิงกล

E 8 M วิธีการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เป็นโลหะ(เมตริก)

E 517 วิธีการทดสอบสำหรับอัตราส่วนความเครียดพลาสติก(r) สำหรับโลหะแผ่น

E 646 วิธีการทดสอบสำหรับเลขชี้กำลังการทำได้แข่งด้วยความเครียดการดึง(ค่า n) ของวัสดุที่เป็นโลหะแผ่น



ภาพประกอบ 79 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจาก ASTM E 2218-02

3. ข้อกำหนด(Terminology)

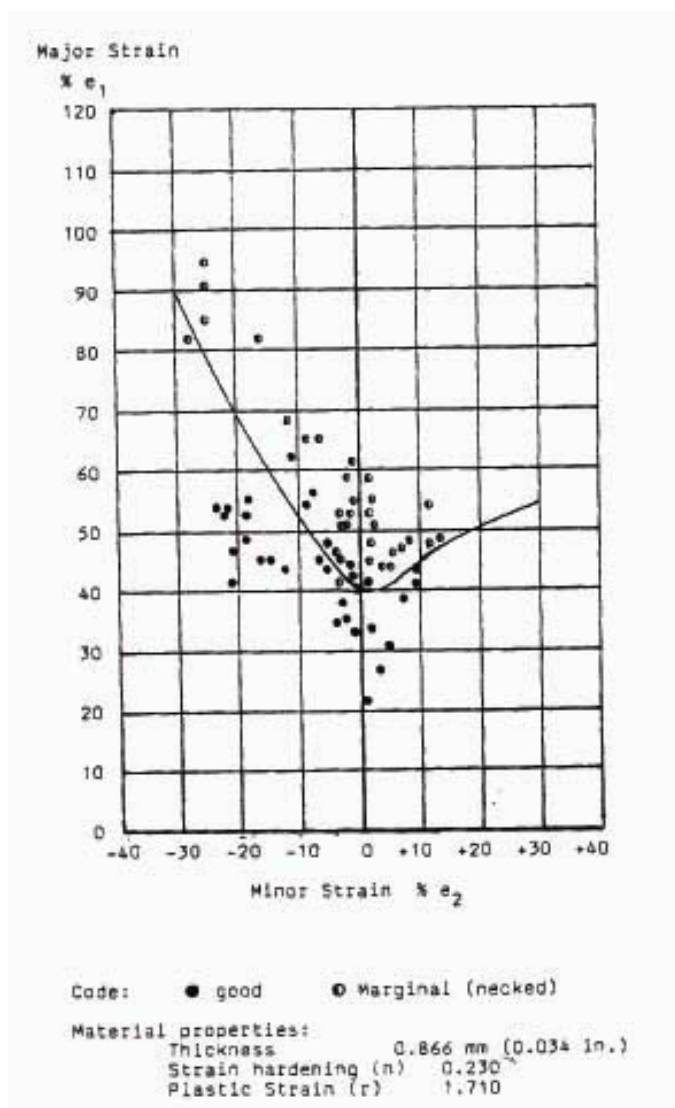
3.1 ข้อกำหนดใน E 6 จะใช้ได้เฉพาะหัวข้อที่ใช้ในวิธีการนี้

3.2 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD)—เป็นกราฟซึ่งเกิดจากการวัดความสัมพันธ์ของความเครียดหลัก(e_1) และความเครียดรอง(e_2) ผสมผสานกันนำมาพล็อตเพื่อการพัฒนาเป็นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(ภาพประกอบ 79)

3.2.1 ข้อโต้ตอบ—สเกลของการแบ่งเป็นชั้นๆของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเครียดซึ่งคำนวณจากความยาวทดสอบเริ่มต้น

3.2.2 ข้อโต้ตอบ—ระยะห่างระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นจะเหมือนกันทั้งสองแกน ความเครียดหลักขนานกับแกน y ในแนวตั้งและความเครียดรองขนานกับแกน x ในแนวนอน นอกเสียจากว่าความแตกต่างจะมีบันทึกในรายงานแล้ว

3.3 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLC)—เป็นส่วนโค้งที่ได้มาโดยการสังเกตแสดงให้เห็นถึงระดับความเครียดสองแกน ซึ่งถัดไปจากตำแหน่งการเกิดรอยคอด(necking)และความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อมาระหว่างการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ(ภาพประกอบ 80)



ภาพประกอบ 80 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมคัลล์สเตลชนิดรีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์ หนา 0.866 mm.

3.3.1 ข้อโต้ตอบ—ส่วนโค้งในภาพประกอบ 80 เป็นขีดจำกัดการขึ้นรูปที่พิจารณา กำหนดสำหรับวัสดุเมื่อโลหะอยู่ภายใต้การทำงานของเครื่องจักรบ่มขึ้นรูป ซึ่งหามาจากแผ่นเหล็กกล้าอะลูมิเนียมคัลล์สเตลชนิดเกรดคุณภาพการดรอว์ ส่วนโค้งในภาพประกอบ 80 จะสัมพันธ์กับส่วนโค้งบนของภาพประกอบ 79 ซึ่งแทนส่วนโค้งของวัสดุที่เป็นแผ่นโลหะมีความเครียดในระนาบ(FLD_0)เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

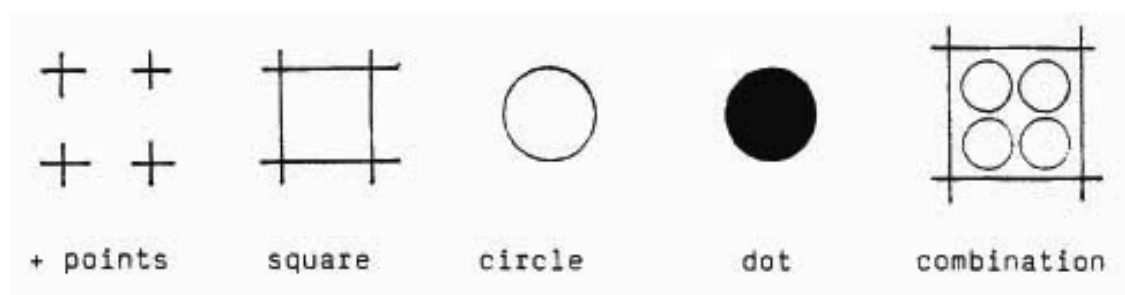
3.3.2 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดจะถูกกำหนดขึ้นจากเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและความเครียดรอง โดยทำการวัดหลังจากการขึ้นรูปแผ่นแบลงก์ขึ้นทดสอบที่ต่อเนื่องกัน โดยใช้รูปแบบของกริด ขนาดความยาวของกริดก่อนและหลังการขึ้นรูปชิ้นส่วนจะถูกวัดเพื่อหาค่า

เปอร์เซ็นต์ความเครียด ส่วนโค้งสำหรับความเครียดรองด้านลบตลอดแนวเส้นโดยทั่วไปจะเป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์พื้นที่ผิวหน้าที่เกี่ยวข้องกับความเครียดหลัก

3.3.3 ข้อโต้ตอบ—ช่วงที่เป็นไปได้ของความเครียดหลักคือจาก 0 เปอร์เซ็นต์ถึงมากกว่า 200 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่เป็นไปได้ของความเครียดรองคือจาก -40 เปอร์เซ็นต์ถึงมากกว่า +60 เปอร์เซ็นต์หรือแม้แต่ว่าระดับความเครียดที่มากกว่าก็สามารถเป็นได้

3.3.4 ข้อโต้ตอบ—เพื่อให้เกิดความเสถียรของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป สามารถพล็อตในช่วงที่ลดลงของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น ความเครียดหลักจาก +20% ถึง +80% และความเครียดรองจาก -20% ถึง +30% ถ้าการเพิ่มขึ้นของความเครียดหลักต่ำสุดของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่เป็น 0 % ของความเครียดหลักจะไม่ถูกบันทึกในรายงาน

3.4 แบบกริด(Grid pattern)—รูปแบบนี้ใช้กับส่วนพื้นผิวหน้าของแผ่นโลหะเพื่อให้เกิดแถวเรียงต่อกันเป็นพื้นที่ของจุดทดสอบ มีความถูกต้องแม่นยำก่อนที่จะขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปร่างสุดท้ายโดยการใช้แรงขึ้นรูป

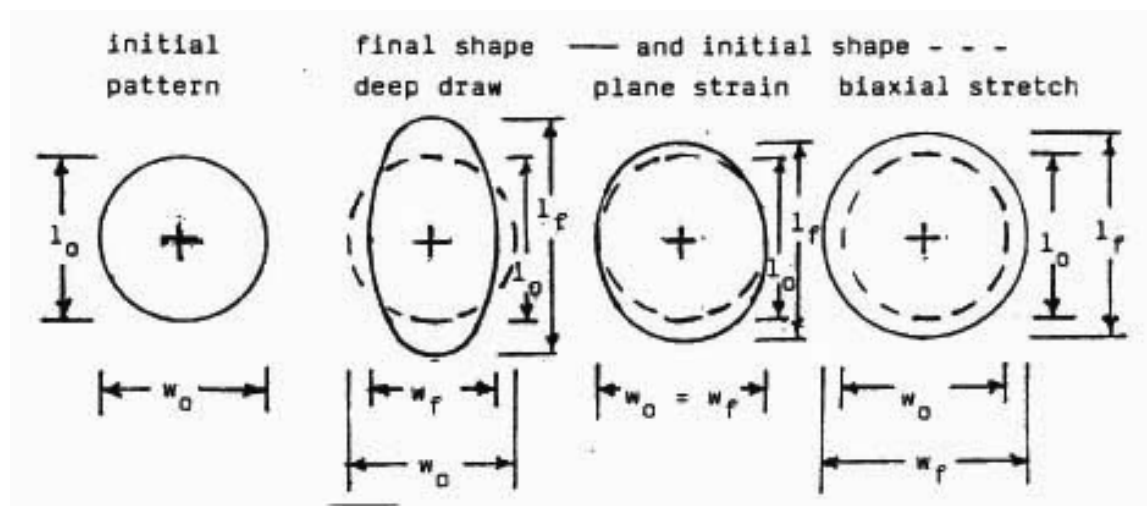


ภาพประกอบ 81 แบบตัวอย่างสำหรับวัดความยาวทดสอบใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

3.4.1 ข้อโต้ตอบ—การเรียงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมหรือทั้งสองแบบ จะถูกพิมพ์ลงบนพื้นผิวหน้าดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 81 รูปแบบจะติดอยู่กับโลหะดังนั้นมันจะไม่เคลื่อนย้ายจากพื้นผิวหน้าหรือถูกกลบออกในขณะที่มีการขึ้นรูป อ้างถึงคุณลักษณะเฉพาะ A568/A568 M ภาพผนวก X4 วิธีการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนรูปช่วงพลาสติก(Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปหรือการดรอว์ วิธีการใช้ภาพกราฟิกและภาพพิมพ์จากระบบเคมีไฟฟ้า(Electrochemically) เป็นแบบกริด(Grid pattern)และการทบทวนถึงการวิเคราะห์ความเครียด

3.4.2 ข้อโต้ตอบ—ขนาดที่แนะนำสำหรับความยาวทดสอบ(Gage length) สำหรับด้านความยาวของแบบที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบที่เป็นวงกลมคือ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) หลังจากส่วนนั้นๆได้ถูกขึ้นรูปบริเวณพื้นที่วิกฤตจะต้องถูกวัดเพื่อใช้เป็นผลลัพธ์ของความยาวทดสอบที่เปลี่ยนแปลงขนาดจาก (L_o) ถึง (L_f) และขนาดความกว้างจาก (W_o) ถึง

(w_f) ที่ 90 องศา ตามแนวยาวซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 82 ความเครียดหลักและความเครียดรองที่สัมพันธ์กันทำมุม 90 องศา สามารถคำนวณจากค่าที่เปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวกริดที่ใช้ทดสอบ ความเครียดสามารถเป็นได้ทั้งแบบความเครียดวิศวกรรม(Engineering Strain) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของความยาวทดสอบเดิมหรือความเครียดจริง(True Strain)



ภาพประกอบ 82 รูปร่างของแบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น

3.4.3 ข้อโต้ตอบ—แบบที่ใหญ่ขึ้นกว่า 6 mm.(0.25 นิ้ว) ถึง 125 mm.(5 นิ้ว) สามารถใช้ในการวัดระดับความเครียดต่ำในการขึ้นรูปขึ้นส่วนได้แต่ไม่ใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

3.4.4 ข้อโต้ตอบ—วงกลมจะถูกแนะนำให้ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปเมื่อความเครียดหลักไม่อยู่ในแนวเส้นตรงกับเส้นต่างๆของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สภาวะเช่นนี้ค่อนข้างจะพบในกระบวนการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปน้อยกว่าการประเมินการผลิตในงานปั๊มขึ้นรูป วงกลมโดยทั่วไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) และสามารถเว้นระยะห่างจากกันได้ถึง 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) มีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางตรงข้ามของวงกลมเมื่อความกว้างของเส้นนั้นน้อยที่สุด สำหรับเส้นที่กว้างกว่าพื้นที่ที่ล้อมรอบวงกลมที่เกิดด้วยกรดควรจะไม่เปลี่ยนแปลงจากวงกลมหนึ่งไปยังอีกวงกลมหนึ่งและทำการวัดด้านตรงข้ามเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จุดวิกฤตที่มากขึ้นนี้ทำให้ความกว้างเส้นมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าความกว้างเส้นของกริดและทำให้ความเครียดหลักสูงขึ้น เมื่อเส้นนั้นแผ่ขยายออกในขณะที่พื้นผิวหน้าของโลหะยืดออกด้วย

3.4.5 ข้อโต้ตอบ—การสลับแบบวงกลมของจุดทึบ(Solid dots)มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เที่ยงตรง ซึ่งจะวัดเส้นผ่านศูนย์กลางตรงข้ามจุดนั้น

3.5 การตีปดรอว์(Deep drawing)—การขึ้นรูปแผ่นโลหะที่ซึ่งเกิดความเครียดบนพื้นผิวหน้าของแผ่นโลหะ ความเครียดเป็นบวกจะอยู่ในทิศทางที่พันธ์เคลื่อนที่เป็นความเครียดหลักและเป็นลบที่มุม 90° ในทิศทางความเครียดหลัก (ภาพประกอบ 82)

3.5.1 ข้อโต้ตอบ—การตีปดรอว์เกิดขึ้นในผนังของการขึ้นรูปทรงกระบอกหรือมุมผนังของส่วนที่ถูกดรอว์ เมื่อแรงจากการจับยึดส่วนที่อยู่ริมขอบมีปริมาณเพียงพอสำหรับการยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะและเกิดรอยย่นขณะที่พันธ์เคลื่อนที่ลงถึงบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นแบลงก์เข้าไปในช่องว่างของด้าย สภาวะความเครียดซึ่งสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดรอยย่นหรือความหนาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 79

3.5.2 ข้อโต้ตอบ—ในการขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โลหะจากพื้นที่บริเวณขอบซึ่งอยู่ใต้แรงจับยึดของแบลงก์โฮลเดอร์จะถูกดึงเข้าไปสู่แม่พิมพ์เพื่อที่จะขึ้นรูปผนังผาด้านข้างของชิ้นส่วนนั้นๆ

3.6 ความเครียดหลัก(Major Strain, e_1)—เป็นความเครียดที่มากที่สุดพัฒนาขึ้นที่ตำแหน่งกำหนดในพื้นที่ผิวหน้าแผ่นทดสอบ

3.6.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดหลักจะถูกวัดไปตามเส้นที่ยึดออกของรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือถูกวัดไปตามแกนหลัก(major axis) ของวงรีซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของกริดวงกลม

3.7 ความเครียดรอง(Minor Strain, e_2)—เป็นความเครียดในพื้นที่ผิวหน้าของแผ่นโลหะในทิศทางตั้งฉากกับความเครียดหลัก

3.7.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดรองถูกวัดที่มุม 90° กับความเครียดหลักตามขนาดที่สั้นที่สุดของรูปร่างสี่เหลี่ยมสุดท้ายของส่วนที่ถูกขึ้นรูปโดยใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square pattern) หรือแกนที่สั้นกว่าของวงรีที่มีผลมาจากการเปลี่ยนรูปของกริดที่เป็นวงกลม ถ้ารูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลับกลายเป็นเอียงหรือเฉียงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านขนานแล้วลักษณะนี้จะไม่ถูกใช้ในการวัดความเครียด

3.8 ความเครียดในแนวระนาบ(Plane Strain)—สภาวะในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นซึ่งคงไว้ที่ระดับใกล้ศูนย์(0 ถึง +5%)ของความเครียดรอง ขณะที่ความเครียดหลักจะเป็นบวก(ในการดึง) บางครั้งจะต้องอ้างอิงในเรื่องแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram) ภาพประกอบ 79 และภาพประกอบ 82

3.8.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดในแนวระนาบเป็นลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรงที่สุดและเป็นสาเหตุให้เกิดจุดต่ำสุดในเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อความสะดวกเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปหลายๆ แบบจะแสดงจุดต่ำสุดที่ 0% ของความเครียดรอง อย่างไรก็ตามการพลิกกลับจับพลัณฑ์ของความเครียดหลักจะไม่เกิดขึ้น ภาพประกอบ 80 และภาพประกอบ 83 ถึง 85

3.9 การดึงยืดขึ้นรูปสองแกน(Biaxial Stretching)—วิธีการขึ้นรูปของแผ่นโลหะซึ่งความเครียดในด้านบวกจะเกิดขึ้นในทุกทิศทางของจุดที่กำหนดให้ ภาพประกอบ 82

3.10 การจำกัดความสูงโดม(Limiting dome Height = LDH)—การทดสอบเพื่อประเมินสำหรับความสามารถในการเปลี่ยนรูป(deformation) ของโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปครึ่งทรงกลมขนาด 200 mm.(8 นิ้ว) และแรงในการจับยึดแผ่นโลหะในแนวเส้นรอบวง(Lock bead) เพื่อป้องกันโลหะจากบริเวณขอบด้านนอกไม่ให้ถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของตาย(Die)

3.10.1 ข้อโต้ตอบ—ทดสอบการจำกัดความสูงโดม(LDH) ถูกออกแบบมาเพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ขณะที่ขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนลักษณะเฉพาะของแผ่นโลหะ ดังนั้นค่าที่วัดได้จะเป็นความสูงของแม่พิมพ์ที่แผ่นโลหะเริ่มจะมีรอยแตก ปัญหาคือจะต้องมีการจับยึดแผ่นโลหะ(Lock bead) ที่แน่นหนาและเชื่อถือได้มีฉะนั้นค่าความสูงโดมที่วัดได้จะคลาดเคลื่อน การแก้ไขคือการทดสอบความสูงโดมใช้แผ่นโลหะยาว 200 mm.(8 นิ้ว) ส่วนความกว้างที่ใช้จะทำให้ค่าความเครียดหลักใกล้ 0% ของความเครียดตรง เมื่อความเครียดของพื้นผิวด้านหน้าแผ่นโลหะวัดโดยการใช้รูปแบบของกริดบนหลักการพื้นฐานนี้ การทดสอบจะถูกพัฒนาไปใช้กับการตัดแผ่นโลหะที่มีขนาดกว้าง 200 mm.(8 นิ้ว) ส่วนความยาวเพียงพอที่จะทำการจับยึดที่แน่นหนาในอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ทดสอบการจำกัดความสูงโดม ความสูงในจุดที่เริ่มแตกร้าจะมีความสัมพันธ์กับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป การทดสอบไม่จำเป็นต้องมีการกระทำซ้ำๆอย่างเพียงพอเพื่อที่จะถูกใช้สำหรับประเมินผลของตัวอย่างแผ่นโลหะ อุปกรณ์ที่ใช้กับขึ้นทดสอบในการดึงยืดขึ้นรูปด้วยรูปแบบของกริดจะมีการตัดเปลี่ยนความกว้างและเป็นวิธีหนึ่งที่หาได้จากช่วงของค่าความเครียดตรงที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าความเครียดหลักสำหรับการพล็อตเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

4. สรุปวิธีการทดสอบ(Summary of Test Method)

4.1 ขั้นตอนในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะต้องเกี่ยวข้องกับเรื่องต่อไปนี้

4.1.1 การใช้เครื่องทดสอบของพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม(LDH tester)บางครั้งเรียกว่าเครื่องทดสอบนูนโป่ง (bulge tester) การทดสอบจำกัดความสูงโดม จะใช้เครื่องจักรพื้นที่ขึ้นรูปที่บริเวณพื้นผิวหน้ามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm.(4 นิ้ว)

4.1.1.1 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์สำหรับประยุกต์โดยใช้แรงและเครื่องเพรสขนาดเล็กที่ใช้แรงกระทำที่ผิวหน้าของโลหะแผ่นด้วยพื้นที่แบบลูกบอลที่มีขนาด 75 mm.(3 นิ้ว), 100 mm.(4 นิ้ว) หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่านี้สามารถนำมาใช้แทนที่อุปกรณ์สำหรับทดสอบการจำกัดความสูงโดม

4.1.2 เตรียมแผ่นแบลงก์ที่ขึ้นรูปกริดเป็นชุดๆ ที่มีความกว้างแตกต่างกันไปและความยาวตามปกติเหมาะสำหรับการจับยึดที่มั่นคงในเครื่องมือทดสอบ

4.1.2.1 ขึ้นทดสอบทั้งหมดจะทำการเป็นชุดๆ มีขนาดความยาวที่หันไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กับทิศทางการรีดเดิมของแผ่นโลหะและในทิศทางซึ่งมีบันทึกไว้ในรายงาน

4.1.3 การหล่อลื่นผิวหน้าสัมผัสของแผ่นแปลงก์และพื้นที่สำหรับการทดสอบพื้นที่แบบเครื่องทรงกลม

4.1.3.1 น้ำมันแร่(Mineral oil) และแผ่นโพลีเอททิลีนบางๆ เป็นการหล่อลื่นที่ดีเยี่ยมชนิดหนึ่ง

4.1.3.2 การใช้ไขมันหล่อลื่นหรือไขมัน(grease)ที่มีแกรไฟต์เป็นที่ยอมรับได้

4.1.3.3 น้ำมันก๊าด(Kerosene) ไม่ใช้การหล่อลื่นที่ดีเพราะมันจะเป็นตัวทำความสะอาดพื้นผิวหน้าเท่านั้นในขณะที่เกิดแรงกด ไม่ช่วยทำให้โลหะแผ่นลื่นไถลในขณะที่ทำการพื้นที่ขึ้นรูป

4.1.4 แม่พิมพ์ที่ใช้แปลงก์โฮลเตอร์ของการทดสอบพื้นที่แบบเครื่องทรงกลมจะต้องมีการแคลมป์(Clamp)ที่แน่นหนาบริเวณขอบนอกของแผ่นแปลงก์ในลักษณะพื้นปลาหรือลอคบีต

4.1.4.1 สำหรับชั้นทดสอบของการทดสอบการดึง ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับชั้นทดสอบแรงดึงของแผ่นโลหะแต่ละชนิดตามที่แสดงในรูปที่ 1 ของ E 8M

4.1.5 การดึงยืดขึ้นรูป(Stretching)พื้นที่ส่วนกลางของแผ่นแปลงก์ เพื่อให้เกิดการยืดแบบสองแกนบริเวณขอบส่วนโค้งของพื้นที่แบบเครื่องทรงกลมหรือการดึงยืดในการทดสอบแรงดึงโดยปราศจากการเข้าไปขัดจังหวะของแรง

4.1.5.1 ความเครียดตรงด้านลบสามารถหาได้โดยใช้การตัดแผ่นโลหะให้แคบลงเพื่อให้พื้นที่ทำการดึงยืดขึ้นรูปของการทดสอบจำกัดความสูงโดม

4.1.6 ให้อยู่พื้นที่หรือแรงเมื่อสังเกตเห็นความหนาของแผ่นโลหะเกิดรอยคอดโดยทันทีถ้าเป็นไปได้หรือทันทีที่เกิดรอยแตกกว้างที่ชั้นทดสอบ

4.1.7 ระยะทางที่แยกห่างจากกันของชั้นทดสอบจากตัวจับยึดเครื่องทดสอบ(Lock bead) กับการขึ้นรูปที่ความกว้างแตกต่างกัน แผ่นแปลงก์ในชุดทดสอบจะเป็นวัสดุที่มีขนาดเท่าเทียมกัน

4.1.8 การวัดและการบันทึกความเครียดหลักและความเครียดตรง จากขนาดของกริดบนพื้นที่ผิวด้านหน้าไกล์รอยคอดของชั้นทดสอบทั้งหมดที่ต่อกันเป็นชุด

4.1.8.1 การวัดเหล่านี้รวมทั้งพื้นที่ที่ดี(ไม่มีรอยคอด) พื้นที่ที่เกิดรอยคอดและพื้นที่ที่เกิดการแตกกว้าง

4.1.8.2 ถ้าในตำแหน่งที่ดี(ไม่มีรอยคอด) ซึ่งประกอบด้วยการวัดแต่ละจุดจะสามารถประเมินได้ด้วยการมองด้วยตาและบันทึกไว้ตามแสดงในภาพประกอบ 80

4.1.9 การพล็อตที่ผสมผสานของความเครียดที่ได้จากการวัดในส่วนของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ภาพประกอบ 80

4.1.10 การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะเชื่อมต่อเหนือส่วนที่ดีที่สุด(ไม่มีรอยคอด)ของความเครียดหลักที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดรอบบนช่วงที่ใช้ในการศึกษา

4.1.10.1 สำหรับการแนะนำในการใช้ได้จริงของชั้นทดสอบซึ่งมีความเครียดที่ด้านล่างของรอยคอดหรือรอยแตกกว้างที่ทะลุ สภาวะเช่นนี้สามารถที่จะวัดที่ตำแหน่งในผังตรงกัน

ข้ามของรอยโป่งนูนครึ่งทรงกลมจากรอยแตกในสภาพที่ดี(ไม่มีรอยคอด) เพื่อให้ได้ค่าในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

4.1.10.2 ขั้นตอนที่ยอมรับอีกอันหนึ่งคือการวัดขนาดกริดใกล้เคียงรอยคอดหรือรอยแตก ตำแหน่งที่ระบุนี้เป็นจุดข้อมูลที่กำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ในภาพประกอบ 80

4.1.10.3 การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับการพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบดูจากการบันทึก ภาพประกอบ 80 มีส่วนดีมากมาย(ไม่มีการเกิดรอยคอด) ของจุดข้อมูลที่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปและจุดที่ใกล้เคียงรอยคอด(จุดวิกฤต)สองจุดต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

4.1.10.4 ส่วนโค้งของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะไม่ได้นับรวมถึงเนื้อที่บริเวณที่เหนือกว่าจุดข้อมูลวิกฤติที่ระดับความเครียดหลักต่ำกว่าการวัดจุดข้อมูลที่ดี(ไม่มีรอยคอด)

5. ความสำคัญและการใช้(Significance and use)

5.1 ส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปให้นิยามว่าเป็นความเครียดสูงสุด(ซึ่งมีขีดจำกัด) ของตัวอย่างแผ่นโลหะซึ่งสามารถเกิดความเปลี่ยนแปลงสำหรับช่วงของสภาวะการขึ้นรูป อย่างเช่นการตีปดรอย การดึงยืดขึ้นรูป การพับขึ้นรูปรีดขึ้นรูปและกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ต่างๆ ซึ่งปราศจากการเกิดรอยคอด ซึ่งอาจจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่กำลังเริ่มขึ้น

5.1.1 ส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถหาได้จากประสบการณ์โดยใช้การทดสอบหาความเครียดในห้องทดลองของการดึงยืดขึ้นรูปแบบสองแกนโดยใช้พันธะครึ่งทรงกลมและทดสอบความเครียดการดึงของชิ้นทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะ จากตัวอย่างวัสดุที่อยู่เหนือขอบเขตการยืดหยุ่น(Elastic limit) ของวัสดุนั้นๆก่อนการเกิดรอยคอดและรอยแตก

5.1.1.1 แต่ไม่สามารถจะกำหนดไว้ล่วงหน้าได้ว่าจะใช้ตัวอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างของรูปสี่เหลี่ยมปรกติหรือวงกลมขนาดเล็กที่จะเป็นแบบกริด เพื่อใช้วัดระยะทดสอบ(Gage length) ของความเครียดขึ้นรูปที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบโดยวิธีที่เหมาะสมเช่น การขีดถ่ายภาพกริด หรือใช้กริดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าและที่เป็นอยู่ในขณะนั้นชิ้นทดสอบแต่ละอันจะก่อให้เกิดจอร์รอยคอดหรือรอยแตกแล้ว

5.1.2 ความเครียดในทิศทางหลักและทิศทางรอง จะถูกวัดโดยใช้จุดบนกริดในบริเวณเนื้อที่ของรอยคอดหรือรอยแตก

5.1.2.1 ความกว้างแผ่นแบลงก์หลายๆแบบจะถูกใช้เพื่อก่อให้เกิดสภาพความเครียดที่อยู่ในช่วงกว้างๆ ในทิศทางของความเครียดตรง

5.1.2.2 ความเครียดหลักถูกกำหนดโดยความสามารถของวัสดุที่ดึงยืดขึ้นรูปในหนึ่งทิศทางพร้อมกับแรงดึงยืดขึ้นรูปอันใดอันหนึ่งที่พื้นผิวหน้าโลหะในทิศทางของความเครียดตรง

5.1.2.3 ในกระบวนการเปลี่ยนรูปของการทดสอบการดึง ความเครียดตรงจะเป็นลบและโลหะจะแคบทั้งสองด้านจากต้นจนจบทั้งความหนาและตามขวางของความกว้าง

5.1.3 ความเครียดเหล่านี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปและส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นการลากเส้นให้ติดต่อกันจากการผสมผสานความเครียดหลักและความเครียดรองที่วัดได้สูงที่สุดรวมจุดข้อมูลที่ดี

5.1.3.1 เมื่อมีการผสมเข้าด้วยกันและไม่มีความแตกต่างที่เด่นชัดระหว่างจุดข้อมูลที่ดีและจุดข้อมูลที่เกิดรอยคอด เส้นโค้งที่มีความพอดีมากที่สุดคือการสร้างขึ้นมาจากจุดข้อมูลที่ดีสูงสุดจึงจะเป็นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

5.1.4 ขีดจำกัดการขึ้นรูปถูกสร้างขึ้นที่ความเครียดหลักสูงสุดที่ได้มาก่อนถึงรอยคอด

5.1.5 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปกำหนดขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปซึ่งเป็นประโยชน์ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น

5.1.6 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเริ่มต้นเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงวัสดุ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกลหรือสมบัติของความสามารถในการขึ้นรูปถูกพัฒนาขึ้นมาระหว่างกระบวนการปฏิบัติงานที่ใช้การทำจากวัสดุ) และความหนาของแผ่นตัวอย่าง

5.1.6.1 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent) ค่า n มีคำนิยามในวิธีทดสอบ ASTM E 646 ผลกระทบต่อขีดจำกัดการขึ้นรูป ค่า n ที่สูงจะเป็นการเพิ่มขีดจำกัดความเครียดหลักให้สูงขึ้น โดยการยินยอมให้การดึงยืดขึ้นรูปมากขึ้นภายใต้สภาวะของความเครียดรองเป็นบวก

5.1.6.2 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain ratio) ค่า r มีนิยามในวิธีทดสอบ ASTM E 517 ผลกระทบต่อความสามารถในการตีปดของวัสดุ ค่า r สูงจะทำให้ความเครียดรองด้านลบเคลื่อนเข้าไปสู่พื้นที่ที่มีความรุนแรงน้อยลงจนถึงด้านซ้ายของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุด (FLD₀) ดังนั้นจึงยอมให้ความเครียดหลักมีการตีปดที่ลึกมากขึ้น

5.1.6.3 ความหนาของวัสดุจะมีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเมื่อขึ้นทดสอบความหนามากกว่าจะมีปริมาณมากขึ้นที่จะตอบสนองต่อกระบวนการขึ้นรูป

5.1.6.4 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กกล้าที่ถูกใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของภาพประกอบ 80 ประกอบด้วยค่า n และค่า r

5.1.7 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการวินิจฉัย สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดของวัสดุและได้ถูกใช้สำหรับประเมินผลการปฏิบัติงานขึ้นรูปและการคัดเลือกวัสดุ

5.1.8 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นตัวให้พื้นฐานที่เกี่ยวกับเส้นกราฟ สำหรับการเปรียบเทียบกับการกระจายความเครียดบนชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยให้ผลสืบเนื่องกับการปฏิบัติงานขึ้นรูป

5.1.9 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่หามาได้โดยวิธีนี้เป็นสัดส่วนคงที่ตามวิถีความเครียด (Strain path) ซึ่งจะมีอัตราส่วนที่แน่นอนของความเครียดหลักไปยังความเครียดรอง

5.1.9.1 ไม่มีการขัดจังหวะในการกระทำของแรงหรือการกลับตรงข้ามของการเกิดความเครียด แต่อัตราของความเครียดอาจจะถูกทำให้ช้าลงขณะที่ขึ้นทดสอบเข้าใกล้การเกิดรอยคอดหรือรอยแตก

5.1.9.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถใช้สำหรับการทำนายโดยประมาณอย่างต่ำๆ กับการกระทำของวัสดุแต่ละประเภทที่มีค่า n (n value), ค่า r (r value) และความหนาของวัสดุแทนประเภทนั้นๆ

5.1.10 การขึ้นรูปแบบสลับซับซ้อนในที่ซึ่งเปลี่ยนแนววิถีความเครียดหรือความเครียดมีลักษณะไม่เหมือนกันตลอดความหนาของแผ่นโลหะ อาจจะทำให้เกิดการจำกัดความเครียดไม่สอดคล้องกับขีดจำกัดการขึ้นรูปที่หามาได้โดยวิธีนี้

5.1.11 ลักษณะของการตอบสนองของวัสดุต่อการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกสามารถเกี่ยวพันกันกับความเครียดไปสู่การเริ่มเกิดการคอดและการแตกร้าว ความเครียดเหล่านี้จะอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

5.1.12 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่เหมาะสำหรับการทดสอบแบบประกันคุณภาพรุ่นต่อรุ่น (lot-to-lot) เพราะว่าวัสดุตัวอย่างมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ซึ่งถูกทดสอบเพื่อที่จะสร้างขีดจำกัดในการขึ้นรูป

6. เครื่องมือ(Apparatus)

6.1 จุดข้อมูล(Data points) สำหรับความเครียดตรงที่ใกล้ 0% และสำหรับความเครียดตรงด้านบวกจะสัมพันธ์กันกับความเครียดหลัก สามารถที่จะหาได้โดยการใช้เครื่องทดสอบพื้นที่แบบครึ่งทรงกลมอย่างเช่น เครื่องทดสอบการจำกัดความสูงโดม(LDH) เครื่องทดสอบการอัดขึ้นรูปเอนกประสงค์หรือเครื่องทดสอบรอยโป่งนูนไฮดรอลิก(Hydraulic bulge Testing machine)

6.1.1 รอยโป่งนูนไฮดรอลิก(The hydraulic bulge) สามารถใช้ของเหลวหรือวัสดุที่ยืดหยุ่นอ่อนนุ่มเป็นตัวสร้างแรงขึ้นรูป

6.2 จุดข้อมูลสำหรับความเครียดตรงด้านลบ จะมีความสัมพันธ์กันกับความเครียดหลัก สามารถที่จะหาได้โดยการใช้เปลี่ยนแผ่นความกว้างในการทดสอบความสูงโดมจำกัด เครื่องทดสอบเอนกประสงค์และวิธีการทดสอบ ASTM E 8M สำหรับการทดสอบการดึงของชิ้นทดสอบซึ่งมีแบบกริดบนพื้นผิว

6.2.1 ชิ้นทดสอบเป็นชุดๆ ที่มีความกว้างแตกต่างกันของส่วนขนานที่ถูกลดลงหรือชุดของแผ่นเต็มความยาวที่ถูกตัดบางส่วน ใช้แบบกริดให้ได้รับความเครียดตามช่วงระยะของความเครียดตรง

6.3 เครื่องมือในการเพรส(The press apparatus) จะต้องมีความสามารถในการจับยึดแผ่นแบลงก์ที่มั่นคงขณะทำการทดสอบ เพื่อป้องกันหรือทำให้เกิดน้อยที่สุดสำหรับการเลื่อนเข้าไปของขอบโลหะ

6.3.1 แม่พิมพ์แบบฟันหยัก(Serrated dies) ทำงานได้ดีกับอุปกรณ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ขนาด 75 mm.(3 นิ้ว) หรือ 100 mm.(4 นิ้ว) ถ้าใช้ลอคบีด(Lock bead) ความพอดีระหว่างการจับยึดชิ้นส่วนทั้งสองจะไม่มีพื้นที่ให้ขอบชิ้นทดสอบถูกดึงเข้าไปโดยแรงที่ขึ้นรูป

6.3.2 การจำกัดวงการดึงเข้าของขอบโลหะจะไม่เป็นจุดวิกฤติในการหาแผ่นสำหรับวัดความเครียดหลักที่สัมพันธ์กับความเครียดตรงต่อการสร้างขีดจำกัดการขึ้นรูป

6.3.3 การจับยึดที่มั่นคงของขอบโลหะเป็นจุดที่ต้องระวังสำหรับทดสอบการจำกัดความสูงโดม ในที่ซึ่งความสูงของพื้นที่ที่กั้นที่ถูกลบทิ้ง

6.4 ระบบการทดสอบจะต้องมีแรงเพียงพอและมีระยะที่แน่ใจว่าพื้นที่ครึ่งทรงกลมสามารถที่จะถูกขับเคลื่อนไปจนกระทั่งแผ่นโลหะเกิดรอยแตก

6.5 เครื่องมือจะต้องก่อให้เกิดแรงที่เพียงพอทั้งสองด้านการจับยึดที่ขอบและการใช้พื้นที่เพื่อทำให้การเปลี่ยนรูปของแผ่นแบลงก์สมบูรณ์ขึ้น

6.6 ถึงแม้ว่าจะไม่มีการวัดระยะพื้นที่หรือแรง การวัดความสามารถที่ต้องการควรจะมีสำหรับการกำหนดข้อมูลเช่น อุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินการทดสอบ

6.7 พื้นที่ครึ่งทรงกลม(The hemispherical punch) เคลื่อนที่กระทำที่อัตราคงที่โดยมีศูนย์กลางของการจับยึดขึ้นทดสอบด้านไว้ จนกระทั่งวัสดุนั้นมีรอยคอดเฉพาะที่(localized necking) และการแตกปรากฏขึ้นบนพื้นผิวหน้าของขึ้นทดสอบ

6.7.1 พื้นที่เคลื่อนที่กระทำอาจจะช้าลงที่ปลายของกระบวนการขึ้นรูป เพื่อที่จะช่วยในการหยุดในขณะที่เริ่มเกิดรอยคอดหรือเมื่อเริ่มเกิดการแตก

6.7.2 ความเร็วของพื้นที่กล่าวนี้จะถูกวัดและรายงานด้วย

6.7.3 นอกเสียจากว่ามีรอยแตกในวัสดุ มันไม่ควรที่จะมีร่องรอยแตกขวางขอบของพื้นที่ (The nose of the punch) ในทางกลับกันเมื่อพื้นที่เคลื่อนที่กระทำเหนือขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ การคอดหรือการแตกหรือทั้งสองลักษณะจะเกิดขึ้นในวงแหวนล้อมรอบปีกวงกลม(round cap)ของบริเวณที่ถูกขึ้นรูป

6.8 การหล่อลื่นช่วยทำให้การลื่นไหลของวัสดุบนพื้นผิวหน้าของพื้นที่ขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกใกล้กับส่วนบน ลักษณะนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นการปรับความเครียดรองเพื่อที่จะทำให้ความเครียดหลักเพิ่มขึ้น

6.9 พื้นที่จะมีขอบครึ่งทรงกลม(hemispherical nose) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อยที่สุดคือ 75 mm.(3 นิ้ว) เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm.(4 นิ้ว) และ 200 mm.(8 นิ้ว)ได้ถูกนำมาใช้

6.9.1 อุปกรณ์ทดสอบการจำกัดความสูงโดมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100mm.(4 นิ้ว) จะเหมาะสมอย่างดีกับความเครียดแผ่นแคบๆ และขนาดแผ่นเต็ม(สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลม) ของการทดสอบแผ่นแบลงก์เพื่อที่จะใช้หาข้อมูลสำหรับการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

6.9.2 ลูกบอลทรงกลม(round ball) ขนาด 75 mm.(3 นิ้ว) ที่ถูกตั้งอยู่ในฐานวงกลมสามารถใช้เป็นเหมือนพื้นที่ขอบครึ่งทรงกลม

6.10 ระยะเพื่อ(Clearance) ระหว่างพื้นที่สำหรับขึ้นรูปและแม่พิมพ์ตัวเมีย(hold down dies) จะต้องใหญ่เพียงพอที่จะป้องกันการกดจิกของโลหะถ้าพื้นที่ได้กระทำอย่างเต็มความสูงของแม่พิมพ์

6.11 การดรอว์เข้าใกล้เส้นรัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย จะต้องเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวของแผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบในบริเวณนั้นระหว่างการดึงยืดขึ้นรูป(Stretching)

6.11.1 ความกว้างแผ่นแบล็ก(Wide Blanks) อาจจะมีรอยย่นหรือก่อให้เกิดขอบฉีกขาดในบริเวณการจับยึดของบีด(Bead) ใกล้ๆเส้นขอบนอก ลักษณะนี้ไม่ถือเป็นความเสียหาย

6.12 รัศมีขอบของพินซ์(the punch nose) และแม่พิมพ์ตัวเมียจะมีความแข็งที่ 50.0 HRC ± 5.0

7. วัสดุ(Materials)

7.1 เตรียมแผ่นลายฉลุกริดต้นแบบ(Stencils) ขนาดเหมาะสมและมีขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรง อาจจะถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์การกัดกรดโดยใช้เคมีไฟฟ้า ภาพถ่ายกริดหรือวิธีการถ่ายภาพอื่น ๆ เพื่อที่จะสร้างแบบกริดของสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม จุด หรือรูปแบบผสมผสานกัน

7.1.1 ขนาดแบบกริดจะต้องถูกตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดลายแต่ละอัน ที่จุดเริ่มต้นและเป็นระยะๆระหว่างการใช้ เพื่อให้แน่ใจว่าขนาดของกริดนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการยึดหรือการหดตัว

7.1.2 การเกิดรอยย่นของแผ่น Stencil จะต้องถูกป้องกัน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความถูกต้องเที่ยงตรงกับความยาวทดสอบ(Gage length) ที่อยู่บนพื้นที่ของกริด

7.1.3 ขนาดของกริดที่ถูกถ่ายภาพโอนมาบนแผ่นแบล็กโลหะจะต้องแน่นอนโดยการสุ่มวัดขนาดของกริดจากชิ้นทดสอบ

7.2 เทคนิคในการประยุกต์ใช้กริดจะถูกอธิบายไว้ในภาคผนวก X1 ของวิธีการนี้

7.2.1 อ้างถึงลักษณะเฉพาะ A 568/A 568M ภาคผนวกที่ X4 สำหรับการถ่ายภาพ (Photographic) และเทคนิคการกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical etching-techniques) การใช้งานที่ไม่เหมาะสมในด้านของกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ ทำให้มีผลกระทบต่อเส้นที่ปรากฏขึ้น ดังนั้นการวัดขอบของเส้นที่ไม่ค่อยชัดจะเป็นการยากเมื่อแบบนั้นได้ขยายขึ้น

7.2.2 แบบกริดที่มีเส้นบางๆสีดำจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ทำให้มีความถูกต้องเที่ยงตรงในการอ่านค่า

7.3 แบบกริดที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมมุมฉากและวงกลมทำด้วยเครื่องมือที่เป็นโลหะ

7.3.1 มีความจำเป็นที่จะต้องวัดวงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เขียนขึ้นก่อนที่จะขึ้นรูปแผ่นแบล็กที่ใช้ทดสอบ เพื่อที่จะทำให้เกิดความยาวทดสอบ(Gage length) เริ่มต้นกับทิศทางในการวัดครั้งสุดท้าย

7.4 แบบกริดที่มีความถูกต้องแม่นยำในความยาวทดสอบ สามารถถูกพิมพ์บนด้านหรือสองด้านของพื้นผิวหน้าชิ้นทดสอบ

7.4.1 บางครั้งบางครั้งมีความจำเป็นเมื่อมีการศึกษาถึงการผลิตขึ้นรูปชิ้นส่วนแต่ไม่ใช่สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

7.5 แบบกริดที่นิยมใช้ประกอบด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.50 mm.(0.100 นิ้ว) หรือวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 mm.(0.100 นิ้ว) เป็นความยาวทดสอบ(Gage length)

7.5.1 ตัวอย่างของแบบกริดได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 81

7.6 ความยาวของด้านข้างแต่ละด้านของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมจะอยู่ภายใน $\pm 0.025 \text{ mm.}$ (0.001 นิ้ว) ของการสร้าง ความยาวทดสอบ

7.6.1 เนื่องมาจากความเปลี่ยนแปลงความกว้างเส้นที่อาจเป็นไปได้ภายในรูปแบบที่ถูกพิมพ์ การวัดจะต้องทำจากด้านในของเส้นจากด้านหนึ่งของสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือของวงกลมไปยังอีกด้านหนึ่งของเส้นตรงข้าม

7.6.1.1 สำคัญเมื่อมีการวัดความเครียดสูงๆที่ซึ่งความกว้างของเส้นเพิ่มขึ้น

7.7 แบบกริดจะครอบคลุมพื้นที่แผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบซึ่งเพียงพอที่จะล้อมรอบบริเวณที่มีความเครียดวิกฤติ

7.8 จุดทึบ(Solid dot) สามารถที่จะใช้ในบริเวณที่มีแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมเปิดจะดีกว่า สำหรับอุปกรณ์การวัดอิเล็กทรอนิกส์บางอย่าง โดยการใช้การถ่ายรูปและโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ดูข้อ 3.4.5 สำหรับขั้นตอนการวัดจุดทึบ(Solid dot)

8. ขั้นตอนทดสอบตัวอย่าง(Sampling)

8.1 แผ่นแบลงก์ที่ถูกทดสอบจะแทนสมบัติของวัสดุ ดังที่ระบุไว้ในการใช้คุณลักษณะเฉพาะผลผลิตและจะนำมาจากแหล่งที่รู้จักทั่วไปด้วยตัวอย่างหนึ่ง

8.1.1 สำหรับวัสดุที่ทำเป็นขดม้วน(Coil processed material) ทิศทางของการรีด(rolling direction) จะต้องระบุให้ชัดเจนบนตัวอย่างและขั้นตอนทดสอบ

8.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นการทดสอบเฉพาะของวัสดุตัวอย่าง

8.3 ความเป็นไปได้สำหรับเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่จะแตกต่างกันสำหรับตัวอย่างของโลหะที่มีการให้เกรดแบ่งแยกออกจากกัน

8.3.1 สาเหตุบางอย่างที่ทำให้แตกต่างกันในเรื่องเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(ค่า n) วัสดุที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาของขั้นตอนทดสอบ และวิธีที่ใช้ผลิตวัสดุ เช่น กระบวนการรีดเย็นและอบเหนียว(Annealing)

9. การเตรียมขั้นตอนทดสอบตัวอย่าง(Sample Preparation)

9.1 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบหลายๆ อันที่ต้องการเพื่อใช้ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

9.1.1 ตัวอย่างเช่น ข้อมูล 64 จุด(64 data points) ในภาพประกอบ 80 จะมีความกว้างที่ต่างๆ กันของขั้นตอนทดสอบ 32 ตัวอย่าง ซึ่งได้ถูกขึ้นรูปโดยวิธีต่างๆ

9.1.2 ช่วงของความกว้างที่อยู่บนขั้นตอนทดสอบถูกใช้เพื่อหาความแตกต่างของความเครียดตรง

9.2 แผ่นแบลงก์จะต้องยาวเพียงพอในทิศทางของความเครียดหลักของการขึ้นรูป เพื่อที่จะยอมให้มีการจับยึดที่มั่นคงในสิ่งที่ใช้จับยึดและยอมให้มีช่วงระยะการยึดตัว

9.2.1 สำหรับความเครียดการดึงถูกประยุกต์ใช้ในเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ แผ่นทดสอบแต่ละมาตรฐานการตัดจะถูกลดลง 50 mm.(2 นิ้ว) หรือสามารถใช้แผ่นแถบยาวด้านขนาน โดยการตัดเปลี่ยนความกว้างหลายขนาด

9.2.2 สำหรับการทดสอบพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม แผ่นแบลงก์จะต้องมีความยาวเพียงพอที่จะถูกจับยึดอย่างมั่นคงในการยึดของแม่พิมพ์โดยปราศจากการดึงเข้าไปมากเกินไปจนเกินไป

9.2.2.1 สภาพการจับยึดที่มั่นคงสำหรับริมขอบไม่ได้เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดในการขึ้นรูปแต่จำเป็นสำหรับทดสอบการจำกัดความสูงโดม

9.2.3 ความยาวตัวอย่างคือ 180 ถึง 225 mm.(7 ถึง 9 นิ้ว) สำหรับการทดสอบโดยใช้พื้นที่ครึ่งทรงกลมขนาด 100 mm.(4 นิ้ว) และสำหรับขึ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบการดึงด้วย

9.3 ความกว้างแต่ละชุดของแผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบนั้นแตกต่างกัน เพื่อที่จะสร้างช่วงระยะของค่าความเครียดรอง

9.3.1 ชุดของขึ้นทดสอบหลายๆชุดอาจมีความจำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอ

9.3.2 ตัดเป็นแผ่นแถบยาวสี่เหลี่ยมผืนผ้า(Rectangular Strips) ความกว้างหลายขนาดเหมือนต้นแบบโดยทั่วไปจะมีขนาดช่วงจาก 12 mm.(0.50 นิ้ว) ถึง 180 หรือ 200 mm.(7 ถึง 8 นิ้ว) ในการเพิ่ม 12 mm.(0.50 นิ้ว) หรือ 25 mm.(1 นิ้ว)

9.4 แผ่นแบลงก์สำหรับทดสอบจากตัวอย่างที่ให้มาจะถูกตัดให้มีความกว้างในทิศทางเดียวกันกับการผลิตแผ่นโลหะ ตามทิศทางการรีดหรือตามขวางกับทิศทางการรีดอย่างใดอย่างหนึ่ง

9.4.1 ความสัมพันธ์ของทิศทางการรีดต่อความยาวของขึ้นทดสอบจะถูกรวมไว้ในรายงาน

9.5 การตัดความกว้างจะต้องทำโดยใช้การตัดด้วยใบมีดที่คมและระยะเผื่อของใบมีด (blade clearance) จะต้องประมาณ 10% ของความหนาของแผ่นโลหะ เพื่อให้การตัดซ้ำ(double shear) เกิดน้อยที่สุดและผลของขอบที่มีรอยเยื้องนั้นอาจจะไม่ปลอดภัยในขณะที่ใช้มือจับขึ้นทดสอบ

9.5.1 จำนวนขอบเขตที่เหมาะสมของรอยเยื้องเนื่องจากการตัดจะไม่มีผลกระทบกับผลลัพธ์ของการทดสอบ

9.5.2 มุมเอียงของใบมีดตัดด้านบนควรจะน้อยกว่า 3 องศา เพื่อป้องกันการม้วนของขึ้นทดสอบที่แคบๆ

9.6 ขอบต่างๆของแผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบอาจจะถูกขัดหรือตกแต่งเพื่อที่จะทำให้รอยเยื้องบริเวณขอบที่มากเกินไปนั้นหลุดออกไป

9.7 ขึ้นทดสอบจะมีขอบซึ่งเป็นด้านขนานกันภายใน 1 เปอร์เซ็นต์ของความยาวของมันทั้งหลาย

10. การสอบเทียบ(Calibration)

10.1 การทดสอบสำหรับเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ทำขึ้นในเครื่องอัดขึ้นรูปที่มีพื้นที่ครึ่งทรงกลมและเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ไม่จำเป็นต้องวัดแรงที่ใช้

10.2 การวัดความเครียดหลักและความเครียดรอง จะต้องมีความเที่ยงตรง $\pm 2.5\%$ ของความเครียด

10.3 ขั้นตอนที่ใช้ในการวัดเหล่านี้อาจจะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หนึ่งในห้าดังต่อไปนี้หรืออาจจะมีเทคนิคการเปรียบเทียบและมีอุปกรณ์ซึ่งให้ความแม่นยำถูกต้องได้เท่าเทียมกัน

10.3.1 ไมโครสโคปทางเครื่องกล(Machinist's microscope) ที่มีการขยายถึง 10 เท่า และสเกล(Scale)ที่ใช้ในการสอบเทียบรวมเข้าด้วยกัน

10.3.1.1 พื้นผิวหน้าที่จะทำการวัดจะต้องถูกจับยึดไว้ในลักษณะตั้งตรงได้จากกับเครื่องไมโครสโคป

10.3.2 สเกลเหล็กกล้า(Steel scale) ที่มีการแบ่ง 0.25 mm.(0.01 นิ้ว) เส้นของสเกลจะต้องอ่านจากศูนย์กลางไปยังศูนย์กลางของความกว้างเส้น

10.3.3 ตัวขยาย(magnifier) ซึ่งอยู่รวมกันกับสเกลสอบเทียบ

10.3.4 สเกลรูปสามเหลี่ยมปลายแหลม(tapered wedge Scale)บนแผ่นพลาสติกใส(ไมลาร์) ซึ่งให้ความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์สำหรับการสร้างความยาวทดสอบ(Gage length) ซึ่งจะขยายความเครียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

10.3.5 ผู้วิเคราะห์กริดวงกลมมีการใช้กล้องถ่ายรูปและเครื่องคอมพิวเตอร์ในการจำลองภาพ(Imaging) ซึ่งทำให้การอ่านเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันหลายเท่า

10.4 ความโค้งของพื้นผิวหน้าขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม จะไม่เป็นระยะวิกฤตบนระยะ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) ซึ่งเป็นความยาวทดสอบเริ่มต้น

11. เงื่อนไขขึ้นทดสอบ(Conditioning of Specimens)

11.1 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นลักษณะเฉพาะกับตัวอย่างวัสดุ มันสามารถเปลี่ยนแปลงถ้าวัสดุนั้นต้องเข้ากับกระบวนการรีดเย็นหรือกระบวนการอบอ่อน(Annealing)ใดๆ ดังนั้นสองตัวอย่างจากที่ให้มาของวัสดุ สามารถสร้างส่วนโค้งที่แตกต่างกันถ้ากระบวนการผลิตแผ่นโลหะเปลี่ยนไป

11.2 ประวัติกระบวนการของวัสดุจะต้องเป็นที่รู้จักดีถ้าการทดสอบจะต้องถูกนำมาพิจารณาให้เป็นตัวอย่างของเกรดผลิตภัณฑ์

11.3 การใช้แบบกริดอาจจะต้องการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าของตัวอย่างซึ่งจะไม่มีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ กริดจะใช้ได้ดีกับโลหะที่เคลือบ(Metallic coated) และพื้นผิวหน้าก่อนมีการหล่อลื่น

12. ขั้นตอน(Procedure)

12.1 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเช็ดให้สะอาดและแห้ง เพื่อที่จะขจัดครวดและทรายออกไป น้ำมันหล่อลื่นชนิดใดๆที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ระหว่างพื้นที่ครึ่งทรงกลมและพื้นผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

12.1.1 น้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มจำนวนของการยึดก่อนเกิดรอยคอดเฉพาะที่และย้ายตำแหน่งไปยังขอบส่วนโค้งของพื้นที่

12.1.1.1 น้ำมันที่สกัดจากแร่ธาตุ(Mineral oil) บวกกับแผ่นโพลีเอททิลีน และสารประกอบของผงแกรไฟต์ จะเป็นตัวหล่อลื่นที่ดีในขณะที่น้ำมันก๊าด(kerosene) ไม่เป็นเช่นนั้น

12.1.2. การหล่อลื่นจะช่วยเปลี่ยนแปลงความเครียดหลักและความเครียดรอง แต่ไม่มีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จุดข้อมูลจะเคลื่อนที่ไปตามส่วนโค้งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดรอง ซึ่งจะกลายเป็นด้านบวกมากขึ้นในบริเวณการดึงยึดขึ้นรูปและมีค่าลบมากขึ้นในบริเวณการดรอว์ของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เมื่อตัวหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพถูกนำมาใช้ในการอัดขึ้นรูป

12.2 โลหะใดๆที่พบอยู่บนพื้นที่จะต้องเอาออกก่อนที่จะทดสอบต่อไป

12.2.1 การเก็บโลหะขึ้นมาเพื่อป้องกันการติดกันโดยไม่มีความร้อน(Cold welding) สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความร้อน แรงกดอัดและการเคลื่อนบนชิ้นทดสอบถ้าไม่มีน้ำมันหล่อลื่น

12.3 ความเร็วของพื้นที่(หรืออัตราการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ) ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสามารถถูกหยุดได้เมื่อเกิดรอยคอดหรือเกิดการแตก

12.3.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป(forming force)เริ่มต้นจะไม่เกิดขึ้นในทันที

12.3.2 การรับโหลดที่เพิ่มขึ้นในที่ซึ่งแรงได้ถูกเอาออกไปและนำมาใช้อีกจะไม่ใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

12.4 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบจะอยู่ตรงจุดศูนย์กลางบนพื้นที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นทดสอบที่ใช้ขึ้นรูปในแผ่นแคบ ๆวางอยู่บนพื้นที่ครึ่งทรงกลม ถ้าพื้นผิวหน้าเพียงด้านเดียวใช้เป็นกริดมันก็จะหลุดออกจากพื้นผิวที่สัมผัสกับพื้นที่

12.4.1 กระบวนการเปลี่ยนรูป(deformation) ของแผ่นโลหะใดๆ สามารถถูกนำมาใช้ได้ถ้ามันมีการต่อเนื่องและไม่ได้ขัดจังหวะก่อนสิ้นสุดการทดสอบ ตัวอย่างเช่นเครื่องทดสอบการจำกัดความสูงโดมที่มีการใช้พื้นที่ครึ่งทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm.(4 นิ้ว) เครื่องทดสอบพื้นที่แบบลูกบอลอื่นๆที่ใช้พื้นที่แบบทรงกลมและการทดสอบการดึงมาตรฐานในเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ สามารถใช้ควบคุมแรงในการขึ้นรูปแผ่นโลหะ

12.5 เครื่องทดสอบจะกระทำให้เกิดการยึดในแผ่นแบลงก์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงระยะเริ่มต้นของการคอด ซึ่งสามารถสังเกตเห็นด้วยตาหรือโดยการเฝ้าตรวจการลดลงของแรงที่ใช้ในเครื่องทดสอบ

13. ผลลัพธ์และการคำนวณ(Results and Calculations)

13.1 การคัดเลือกความยาวทดสอบที่จะถูกวัด

13.1.1 ไม่จำเป็นที่จะวัดตำแหน่งทดสอบ(Gage) แต่ละอันด้วยรูปแบบที่เป็นจุด(dot pattern) ตำแหน่งทั้งหมดสามารถที่จะวัดได้โดยการใช้ผู้วิเคราะห์กริดวงกลม แต่การทำเช่นนั้นต้องใช้เวลามากถ้าทำโดยการใช้ถือสเกลและแว่นขยายด้วยมือ

13.1.2 วงกลมที่เปลี่ยนรูปร่างจะเกิดขึ้นเป็นวงรีที่มีเส้นกว้างออกตรงส่วนปลายรูปด้านความยาว ลักษณะนี้จะถูกวัดจากด้านในของเส้นหนึ่งไปยังด้านในของเส้นที่อยู่ตรงข้าม

13.1.3 ความยาวทดสอบทั้งหมดที่ถูกวัดจะอยู่ใกล้ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการคอดบนชั้นทดสอบ วงรีที่มีไม่มากกว่า 2 หรือ 3 วงรี ห่างจากรอยคอดหรือการแตกร้าว ที่ตั้งอยู่ในทิศทางของรัศมีจะสัมพันธ์กับขอบส่วนโค้งของพื้นผิว

13.1.4 ถ้ามีรอยแตกเกิดขึ้นมันจะเกิดขึ้นบนด้านหนึ่งของขอบพื้นผิวครึ่งทรงกลม (Hemisphere pole) กริดที่เหมาะสมสำหรับการวัดระดับความเครียดที่ตำแหน่งรอยคอด สามารถพบได้บนขอบพื้นผิวด้านตรงข้าม

13.2 อัตราการมองเห็นพื้นที่กริดที่เปลี่ยนรูปร่างแต่ละอัน จะถูกทำขึ้นด้วยกลุ่มแต่ละกลุ่มที่ทำให้ได้ดี(ไม่มีรอยคอด) กลุ่มวิกฤติ(ตำแหน่งที่มีรอยคอด) หรือกลุ่มรอยแตก มีนิยามคือ

13.2.1 ส่วนที่ดี(หมายถึงการไม่มีรอยคอด การผ่านหรือการยอมรับบนชั้นส่วนของการผลิต) ตำแหน่งกริดที่เปลี่ยนรูปร่าง(Deformed grid) ในพื้นที่ด้านนอกทั้งหมดของบริเวณรอยคอดของชั้นทดสอบ

13.2.2 ช่วงวิกฤติ(ซึ่งเรียกเป็นตำแหน่งรอยคอด หรือช่วงที่คาบเกี่ยว, Borderline) ตำแหน่งกริดที่เปลี่ยนรูปร่างในบริเวณจุดที่ทำให้เกิดการบางหรือร่องในพื้นที่ผิวชั้นทดสอบ

13.2.2.1 สำหรับแบบกริดวงกลมถ้าวงรีนั้นมีรูปร่างฉีกขาด(Tear-drop shaped) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ(Nonuniform strain) มันก็จะไม่ถูกวัด สภาวะเช่นนี้สามารถทำให้เหมาะสมได้โดยใช้กริดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

13.2.3 การแตก(บางที่เรียกว่าความเสียหาย, Fail) การแยกขาดจากกันของชั้นทดสอบที่ความยาวทดสอบของกริดแยกออกเป็นสองส่วนและเนื้อที่บริเวณอยู่ถัดไปจากขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถถูกวัดเพื่อจุดประสงค์ของข้อมูลแต่ละข้อมูล

13.3 การวัดความเครียด(Strain measurements)

13.3.1 ความเครียดหลักและความเครียดรองของการเลือกกริดที่เปลี่ยนรูปร่างจะถูกวัดภายใน $\pm 2.5\%$, สำหรับความยาวทดสอบเริ่มต้นที่มีขนาด 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) นั่นคือ ± 0.075 mm.(0.0025 นิ้ว)

13.3.2 แผนภาพที่เป็นแบบตัวอย่างสามรูปแบบที่กริดวงกลมสามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างดังแสดงในภาพประกอบ 82 แทนการตรึง(Draw) ความเครียดในแนวระนาบ(Plane strain) การดึงยืดขึ้นรูปสองแกน(biaxial stretch)

13.3.3 การคำนวณความเครียดหลักที่สัมพันธ์กับความเครียดรอง ตามที่ได้แสดงมานั้น จะพบว่าความเครียดหลักเป็นการเกิดขึ้นตรงกันพอดีกับทิศทางของการเปลี่ยนรูปหลัก และความเครียดรอง คือที่มุม 90 องศากับทิศทางของความเครียดหลัก

$$\text{ความเครียดหลัก} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 = e_1 (\%)$$

$$\text{ความเครียดรอง} = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100 = e_2 (\%)$$

ซึ่ง L = ความยาว(length)

W = ความกว้าง(Width)

O = จุดเริ่มต้น

f = จุดสุดท้าย

14. เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Curve)

14.1 ข้อมูลสำหรับความเครียดหลักและความเครียดรองของกริดที่คัดเลือกแล้ว จะถูกพล็อตลงบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ตามที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 80

14.2 จุดข้อมูลแต่ละจุดถูกระบุไว้โดยโค้ดที่เป็นส่วนที่ดี(ไม่มีรอยคอด) หรือบริเวณวิกฤต(มีรอยคอด) บริเวณกริดที่มีรอยแตกโดยปกติจะไม่ถูกวัด

14.3 ส่วนโค้งที่ได้สัดส่วน(Smooth curve)จะถูกวาดบนส่วนของจุดข้อมูลที่ดี(ไม่มีรอยคอด)

14.3.1 ในกรณีที่จุดข้อมูลที่ดีบางจุด(ไม่มีรอยคอด)ถูกผสมผสานระหว่างกันกับจุดวิกฤต(marginal)ที่มีรอยคอด ส่วนโค้งจะทอดตัวอยู่ใต้จุดวิกฤตเหล่านี้(Marginal points) นอกเสียจากว่ามีการวัดความเครียดเพิ่มบนชิ้นทดสอบ(Specimen) ที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกัน ที่แสดงถึงความสำคัญกว่าของจุดข้อมูลที่ดีในบริเวณของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

14.4 ช่วงระยะของความเครียดหลักสามารถที่จะเป็นได้จาก 0% ถึง มากกว่า 200%

14.5 ช่วงระยะของความเครียดรองสามารถที่จะเป็นได้จาก -40 % ถึง มากกว่า +60%

14.6 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับวัสดุสามารถลดช่วงระยะลงได้ ถ้าขีดจำกัดที่ต่ำลงของขนาดความเครียดหลักไม่ได้แสดงออกมาเป็น 0% ลักษณะนี้จะถูกบันทึกไว้ในรายงาน

15. การรายงาน(Report)

15.1 การรายงานเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะต้องประกอบด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

15.1.1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่มีขีดจำกัดต่ำลงของแกนความเครียดหลักจะถูกบันทึกไว้ถ้ามันมีความแตกต่าง 0% ของความเครียดหลักบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

15.1.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ถูกวาดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

15.1.3 ชื่อเรียกที่กำหนดของวัสดุและการประมวลผลถ้าไม่มีเกรดมาตรฐาน

15.1.4 ความหนาของวัสดุ

15.1.5 การกำหนดทิศทางด้านยาวของแผ่นแบลงก์จะสัมพันธ์กับทิศทางของการประมวลผลแบบม้วน(Coil processing direction)

15.1.6 อุณหภูมิของเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบถ้านอกเหนือจากอากาศที่ล้อมรอบ

15.1.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ครึ่งทรงกลมใด ๆ ที่ใช้ในการยืดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

15.1.8 ความเร็วพื้นที่ของเครื่องที่ใช้เคลื่อนที่ลงในช่วงการทดสอบไม่นับรวมการช้าลงในช่วงสุดท้าย

15.1.9 การหล่อลื่นที่ใช้บนพื้นผิวหน้าสัมผัส

15.1.10 ขนาดแผ่นแบลงก์ ความยาวและความกว้างที่ใช้

15.1.11 ปริมาณขนาดขึ้นทดสอบที่ได้ถูกทดสอบซ้ำ ๆ กันสำหรับตัวอย่างเดี่ยว ตัวอย่างคู่ ตัวอย่างแบบสามอัน

15.1.12 ความยาวทดสอบของกริดที่ใช้

15.2 การรายงานอาจจะรวมถึงค่าของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุด(FLD₀)

16. ความเที่ยงตรงและความลำเอียง(Precision & Bias)

16.1 วิธีนี้จะไม่เชื่อถือกับข้อเสนอแนะของความลำเอียงระบบใดๆ

16.2 การใช้สเกลสอบเทียบ(Calibrated scales) เพื่อวัดกริดที่มีการขยายใหญ่เพียงพอในการกำหนดความเที่ยงตรง ความแม่นยำในการอ่านความเครียดหลักแต่ละค่าที่สัมพันธ์กับความเครียดที่มีความยาวทดสอบเริ่มต้นที่ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) ควรจะอยู่ภายใน $\pm 0.5\%$ (0.012 mm. หรือ 0.0005 นิ้ว)

16.3 เนื่องจากวิธีการตามที่รู้สึกของผู้ทดสอบในการคัดเลือกพื้นที่ที่จะวัดและแบ่งแยกตามรอยคอดหรือไม่เป็นรอยคอด ความเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัวอาจจะแสดงถึงการไม่เห็นด้วย(disagreement)ในระหว่างผู้ทดสอบ สำหรับวัสดุที่จะกำหนดให้เส้นโค้งขีดจำกัดในการขึ้นรูปควรจะทำซ้ำภายใน $\pm 5\%$

17. คำศัพท์หลัก ๆ(Keywords)

Circle grid	=	กริดวงกลม
Forming limit curve(FLC)	=	เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป
Forming limit diagram(FLD)	=	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
Limiting dome height(LDH)	=	การจำกัดความสูงโดม
Major Strain	=	ความเครียดหลัก
Minor strain	=	ความเครียดรอง
Strain analysis	=	การวิเคราะห์ความเครียด

ภาคผนวก
(ข้อมูลไม่เกี่ยวกับข้อบังคับ)
X1. เทคนิคสำหรับการประยุกต์ใช้แบบกริด

บทนำ

มีวิธีที่หลากหลายวิธีสำหรับการประยุกต์ใช้การทำเครื่องหมายที่ตัววัดทดสอบ(Gage) บริเวณด้านหน้าของโลหะแผ่น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดความเครียดสำหรับพล็อตบน แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป จากนั้นก็จะหาเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปได้ สำหรับแบบกริดที่ให้ประโยชน์ในการขึ้นรูปโดยปกติประกอบด้วยสี่เหลี่ยมวงกลม จุด หรือผสมกันในแบบต่างๆ

X1.1 การทำเครื่องหมายด้วยการ 펀ช์(Punch marks) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดด้วยการทำความยาวทดสอบ(Gage length) 2 ส่วนสำหรับความเครียดหลักและทำมุม 90 องศาทั้งสองส่วนเป็นความเครียดตรง การวัดระยะก่อนและหลังการขึ้นรูปขึ้นทดสอบมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเครียดซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของความยาวทดสอบเริ่มต้นในแต่ละทิศทาง การทำเครื่องหมายด้วยการ 펀ช์จะทำให้เกิดรอยตื้นๆและอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ความเสียหายถึงก่อนกำหนดในวัสดุบางชนิด สำหรับสาเหตุนี้เองการทำเครื่องหมายด้วยการ 펀ช์ จะถูกใช้เมื่อมีการประเมินวัสดุให้มีความสามารถในการขึ้นรูปอย่างสูงๆ เท่านั้น

X1.2 การเขียนรูปสี่เหลี่ยม(Scribed Square) เขียนเส้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมบนแผ่นโลหะเพื่อใช้ศึกษาการขึ้นรูปขึ้นส่วนสำหรับการประเมินความเครียด เพื่อต้องการให้เกิดความถูกต้องในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จุดตัดผ่านกันของการเขียนเส้นแต่ละเส้นในพื้นที่วิกฤติจะมีการวัดบริเวณที่สำหรับทำเครื่องหมายไว้

X1.3 การเขียนวงกลม(Scribed Circle) ใช้วงเวียนเหล็กจุดที่ตำแหน่งเขียนวงกลมบนพื้นผิวด้านหน้าของชิ้นส่วนเพื่อศึกษาการกระจายความเครียดซึ่งเป็นการกระทำอย่างธรรมดาบนพื้นที่ที่ใช้งานในระดับความเครียดต่ำ ขนาดปกติเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 mm.(5 นิ้ว) ใช้กับความเครียดที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 5% วงกลมที่คล้ายกันขนาด 2.5 mm.(0.10 นิ้ว) สามารถใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปได้เหมือนกัน

X1.4 การถ่ายภาพกริด(Photogrid) การถ่ายภาพแบบพิมพ์สามารถพิมพ์บนพื้นผิวด้านหน้า โดยการใช้เทคนิคที่ได้บรรยายในคุณสมบัติเฉพาะ A 568/A568 M, ภาคผนวก X4 ความสามารถนี้ใช้เพื่อหารูปแบบเส้นที่คมชัดบนพื้นผิว ปัญหาหนึ่งที่มีแนวโน้มทำให้แบบแยกออกจากกันภายใต้ความเครียดสูงๆที่ซึ่งสามารถทำให้ผลของการอ่านไม่ถูกต้อง

X1.5 การพิมพ์ภาพด้วยสีผ่านแบบผ้าไหม(Silk screen,ซิลค์สกรีน) รูปแบบวงกลมสี่เหลี่ยม หรือรูปร่างแบบอื่นๆที่น่าสนใจ สามารถทำโดยกระบวนการซิลค์สกรีน กระบวนการนี้ใช้พัฒนาสร้างกริดวงกลมมาก่อน แต่ความยาวทดสอบน้อยกว่า 25 mm.(1 นิ้ว) ไม่สามารถสร้างได้อย่างถูกต้องด้วยการใช้หมึกซิลค์สกรีนหรือการระบายสี

X1.6 การกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้าคือการสกัดของวิธีซิลค์สกรีน แผ่นกริดต้นแบบ(Stencils) ซึ่งหาซื้อได้จากแบบที่แตกต่างกันหลายๆแบบ สำหรับใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้เพื่อกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป รูปแบบความกว้างเส้นจะคม ละเอียด ชัดเจนและไม่ยืดขยายตัวหลังจากการขึ้นรูป

X1.6.1 เทคนิคนี้ใช้เป็นอันดับแรกเพื่อทำให้เกิดรอยกดและเป็นข้อมูลบนชิ้นส่วนโลหะ

X1.6.1.1 การพิจารณาความจำเป็นสำหรับการใช้ข้อมูลเฉพาะและเป็นคำแนะนำสำหรับใครก็ตามที่จะใช้วิธีการกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้าควรจะได้มีการฝึกอบรมอย่างถูกต้องเป็นอันดับแรก โดยบุคคลที่มีความรู้ในเรื่องนี้อย่างดี

X1.6.2 หม้อแปลงชนิดพิเศษและสารละลายกัดกรดหาได้จากผู้ขาย Stencils ก่อนการใช้ Stencils ให้จุ่มเบาะรองในน้ำยาเคมีวางทับและกดลงไป ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนเบาะรองอย่างต่อเนื่องมากที่สุด

X1.6.3 อุปกรณ์การปรับแต่งกระแสไฟฟ้า(Rectifier)ในการทำงานใช้ 115 โวลท์ 60 เฮิร์ต ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุต(Output)ขึ้นไปถึง 10 แอมป์ แรงเคลื่อน 0-26 โวลท์ ใช้เป็นตัวนำต่อเข้ากับลูกกลิ้งผ่านไปถึงชิ้นงาน

X1.6.4 Stencil จะถูกเคลือบด้วยสารละลายกัดกรดและวางบนวัสดุ นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยสารละลายทางเคมีด้วยเหมือนกันตามลักษณะเฉพาะของโลหะวางอยู่บน Stencil อีกทีหนึ่ง แผ่นเบาะรองจะต้องมีปริมาณสารละลายที่เพียงพอแต่ไม่มากเกินไปเพราะอาจจะสร้างปัญหาได้ ความหนาแผ่นเบาะรองควรจะมีประมาณ 3 mm.(1/8 นิ้ว)

X1.6.5 เปิดกระแสไฟฟ้าที่ Rectifier ลูกกลิ้งจะถูกหมุนอย่างช้าๆตรงความกว้างของแผ่นรอง Stencils ไม่ควรหมุนลูกกลิ้งไปข้างหลังและมาข้างหน้าด้วยการพิมพ์ 2 ครั้ง เพราะอาจจะเกิดการเลื่อนของแผ่น Stencils ภายใต้แผ่นรอง

X1.6.5.1 ถ้าการพิมพ์หรือกดที่เบาเกินไปแผ่นรองอาจจะต้องมีสารละลายกัดกรดมากกว่าปกติหรือถ้ามันเข้มข้นและเด่นชัดเกินไปสามารถปรับโวลท์เพื่อให้เหมาะสมกับวิธีปฏิบัติ

X1.6.5.2 คำเตือน ควรจะฝึกเพื่อไม่ให้ตะลูกกลิ้งโลหะและวัสดุที่กำลังกัดกรดไฟฟ้าอาจจะช็อตผู้กำลังทำงานในขณะถือลูกกลิ้งและเปิดกระแสไฟฟ้าในระหว่างการกัดกรด

X1.6.6 แผ่นเบาะรองและ Stencils จะถูกเอาออกจากแผ่นโลหะหลังจากทำการกัดกรดแล้ว แบบของเส้นที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอจะอยู่บนพื้นผิวและควรจะแห้งก่อนจะใช้มือจับสามารถจะเช็ดออกได้ ส่วนที่ติดเส้นบางๆจากแบบที่กัดกรดจะทำให้อ่านได้ยากยิ่งขึ้น

X1.6.7 สารละลายที่แตกต่างกันหลาย ๆ แบบที่หาได้จากบริษัทผู้จัดหา Stencils สำหรับใช้บนพื้นผิวของเหล็กกล้า สแตนเลส อลูมิเนียม ทองเหลือง สังกะสี และโลหะอื่นๆ

X1.6.7.1 กระแสไฟ AC และ DC สามารถใช้ได้ขึ้นอยู่กับผิวสำเร็จที่น่าพอใจต่อรูปแบบและวัสดุขณะที่ทำการกัดกรด

X1.6.8 สารละลายกัดกรดเป็นตัวกัดกร่อนอย่างอ่อนๆและถ้าไม่ถูกล้างหรือทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายอีกตัว พื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าจะเป็นสนิมเมื่ออากาศเข้าไปรวมตัวในเวลาสั้นๆ

สารละลายนี้สามารถทำให้มีขนาดลดลงโดยไม่มีสารละลายที่มากกว่าปรกติบนแผ่นรอง สารละลายบางชนิดประกอบด้วยน้ำยากันสนิม

X1.6.9 การเช็ดพื้นผิวที่ถูกกรดกัดด้วยน้ำมันหล่อลื่นจะเป็นการป้องกันการเกิดสนิมที่มากเกินไป

X1.6.10 ความยาวทดสอบของกริดจะถูกตรวจสอบที่ตำแหน่งการสัมผัสบนชั้นทดสอบก่อนการใช้เพื่อความแน่ใจว่าความยาวทดสอบจะไม่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแผ่น Stencils

X2. ตัวอย่างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมคิลล์สตีลชนิดคุณภาพการดรอว์, อะลูมิเนียม ชนิด 3003-0 และทองเหลืองผสม C260

บทนำ

เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปได้ถูกกำหนดขึ้นสำหรับ 3 วัสดุ โดยการใช้ขั้นตอนที่ได้อธิบายในวิธีการนี้

X2.1 วัสดุแรกคือแผ่นอะลูมิเนียมคิลล์สตีลชนิดรีดเย็น ซึ่งคล้ายๆกับภาพประกอบ 79 ซึ่งเป็นวิธีสำหรับสร้างขีดจำกัดการขึ้นรูป ทำให้มีผลกับตำแหน่งเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเหนือตำแหน่งที่ดี(วงกลมทึบ)และต่ำกว่าจุดข้อมูลวิกฤต(วงกลมระบายสีดำครึ่งวงกลม) ตามภาพประกอบ 83

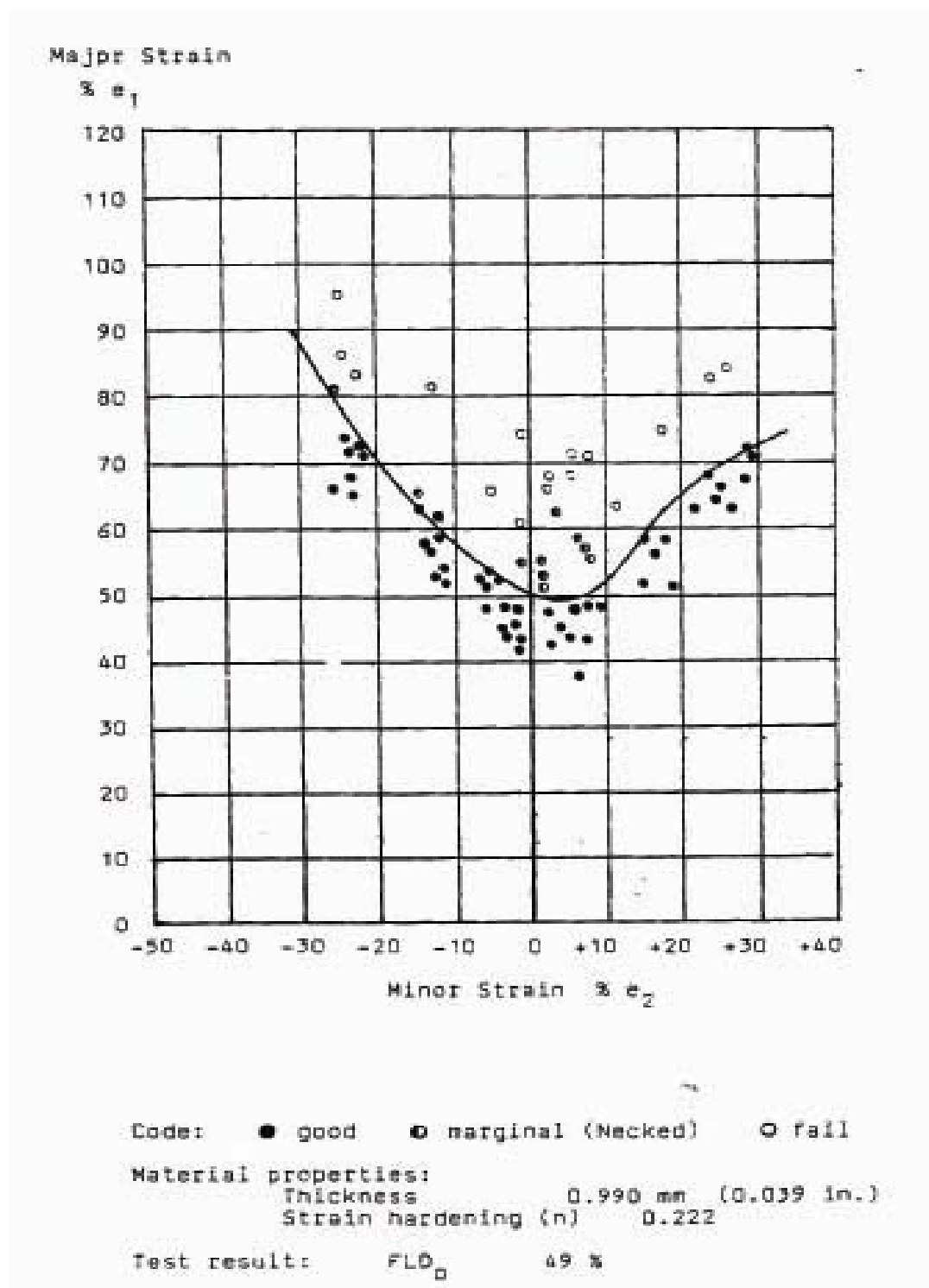
X2.1.1 ค่าของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุดสำหรับเหล็กกล้าอยู่โดยรอบประมาณ + 5 % ของความเครียดรอง ซึ่งหาความเครียดในระนาบ(FLD_0)ได้เท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก

X2.2 วัสดุที่สองคือแผ่นอะลูมิเนียม 3003-0 ตามภาพประกอบ 84

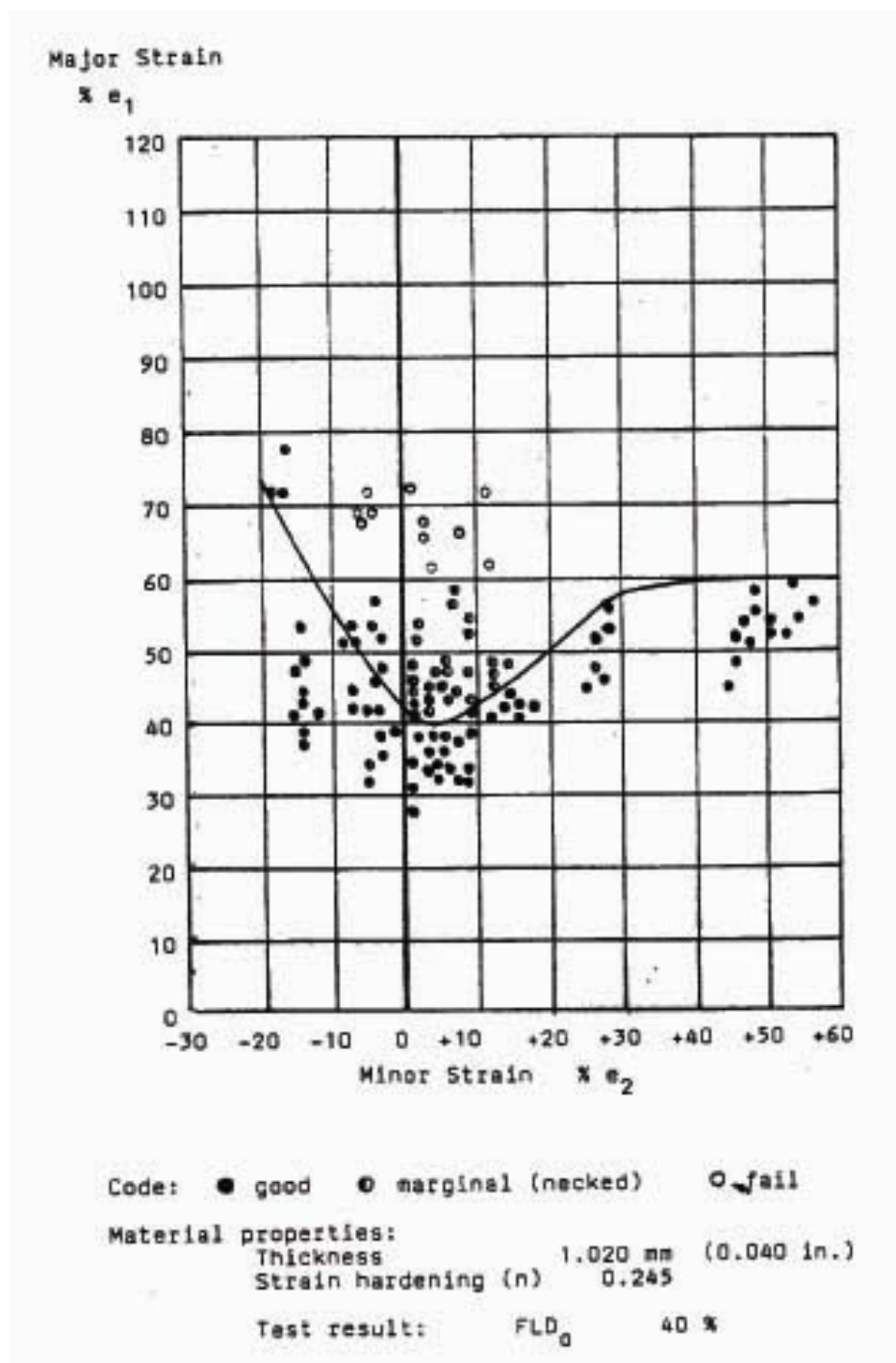
X2.2.1 ค่าของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุดสำหรับอะลูมิเนียมอยู่โดยรอบประมาณ +5 % ของความเครียดรอง ซึ่งหาความเครียดในระนาบ(FLD_0)ได้เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก

X2.3 วัสดุที่สามคือแผ่นทองเหลือง C260 ตามภาพประกอบ 85

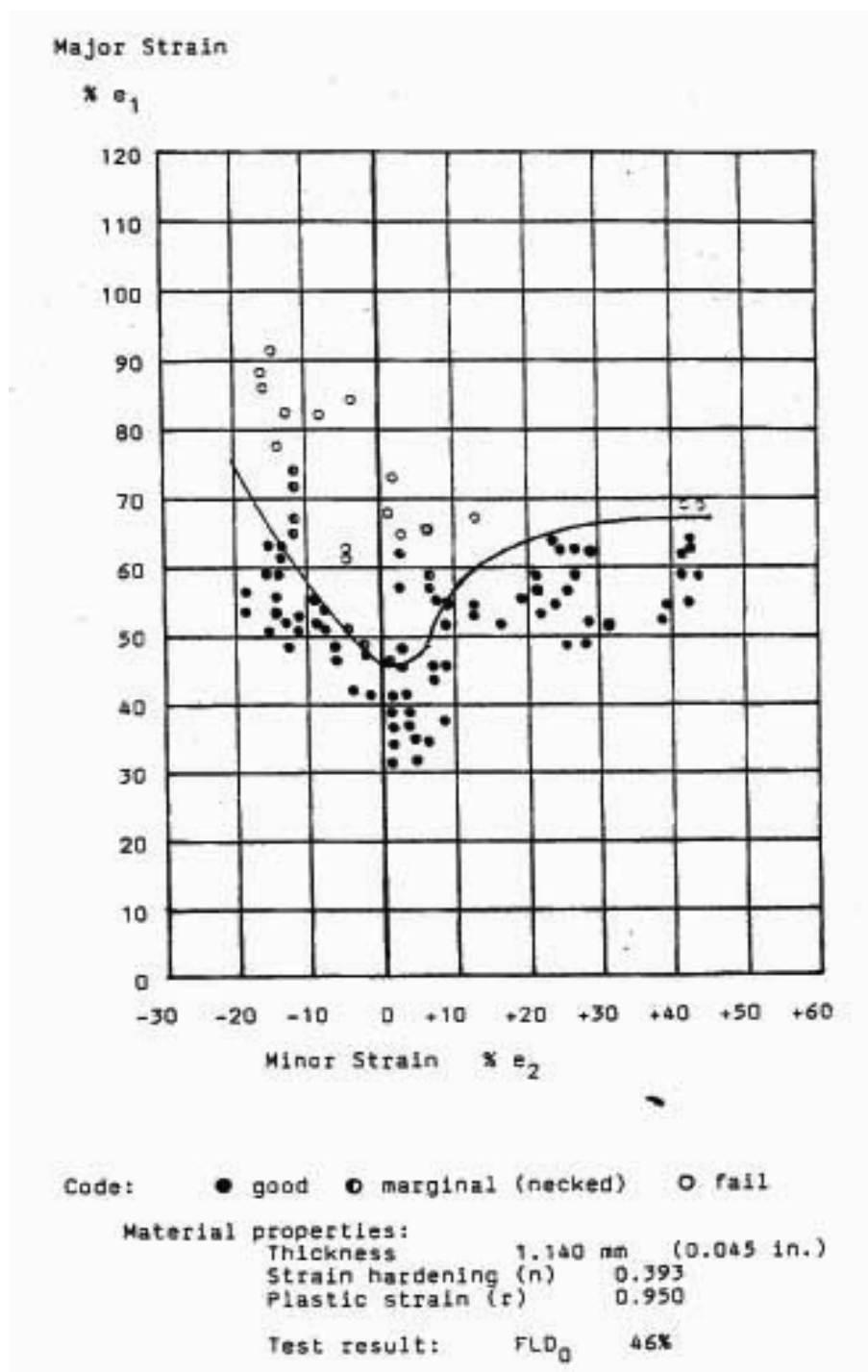
X2.3.1 จุดต่ำสุดบนเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นทองเหลืองนี้อยู่ระหว่าง 0 และ +5 % ของความเครียดรอง ซึ่งหาความเครียดในระนาบ(FLD_0)ได้เท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



ภาพประกอบ 83 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมคัลล์สตีลชนิดรีด
 เย็นเกรดคุณภาพการดรอว์ หนา 0.990 mm.



ภาพประกอบ 84 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมเจือชนิด 3003-O



ภาพประกอบ 85 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นทองเหลือง C 260



Certificate of Participation

This is to certify that

Mr. Sawad Sodamuk

participated and presented a paper at the

***20th Conference of Mechanical Engineering
Network of Thailand***

organized by

***School of Mechanical Engineering
Institute of Engineering
Suranaree University of Technology***

18-20 October 2006

*Mandalin Golden Volley Hotel & Resort Khao-Yai
Nakhon Ratchasima*

Kont Chit.

*Assoc. Prof. Capt. Dr. Kontorn Chamniprasart
Chair of school*

V. Khompi

*Assoc. Prof. Gp. Capt. Dr. Varapot Khompi
Dean of Institute*

**การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
Formability Prediction of The Automotive Parts
Using Forming Limit Diagrams**

สวัสต์ โสตามุข^{1*} วิชิต บัวแก้ว¹ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน² สุวัฒน์ จีระธีรนาถ³

¹โครงการความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ. องครักษ์ จ. นครนายก 26120

โทร 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 E-mail: sawad_sdm@yahoo.com vichitb@swu.ac.th

²วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถ. พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

โทร 0-2913-2500 ต่อ 6437 โทรสาร 0-2587-3921 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-6500 ต่อ 4360 โทรสาร 0-2564-6370 E-mail: suwatj@mtec.or.th

Sawad Sodamuk^{1*} Vichit Buakeaw¹ Suparerk Sirivadin² Suwat Jirathearnat³

¹Srinakarinwirot University and Chulachomkiao Royal Military Academy Jointed Graduated Program

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkarak Nakhonnayok 26120, Thailand. Tel: 0-2664-1000 Ext 2055, Fax: 0-3732-2609, E-mail: sawad_sdm@yahoo.com vichitb@swu.ac.th

²College of Industrial Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand. Tel: 0-2913-2500 ต่อ 6437 Fax: 0-2587-3921 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³National Metal and Materials Technology Center, 114 Thailand Science Park, KlongLuang, Pathumthani 12120

Tel: 0-2564-6500 Ext 4360, Fax: 0-2564-6370, E-mail: suwatj@mtec.or.th

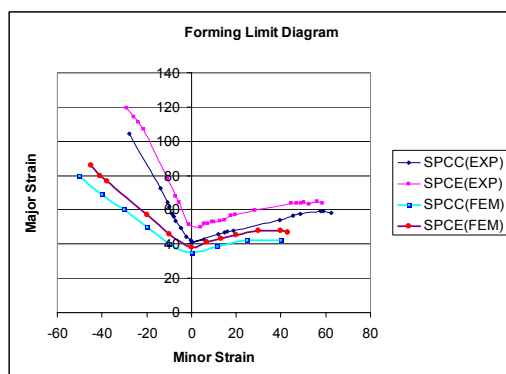
บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนวัสดุในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram, FLD) เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทย โดยการใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCE หนา 0.8 มม. สร้าง FLD ด้วยการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นแบลงก์ทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิคด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ 100 มม. กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วัดการเปลี่ยนรูปของกริดวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง นำ FLD มาประยุกต์ใช้ขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองแตกต่างกัน เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดรองในขณะที่เกิดการคอดสูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้มากกว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและผลลัพธ์ของระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

Abstract: The aim of this research is to study the effect of steel sheets produced by different manufacturers upon their forming limit. This work used forming limit diagram (FLD) to determine the formability of different trade marks steel sheets SPCC and SPCE, which have the same thickness of 0.8 mm. These two steel sheets are commonly used to produce automotive parts in Thai automotive industry. The circular marks were formed onto the surface of blank sheet using electro-etching technique. Subsequently, the blank sheet was continuously formed a hemispherical-dome shape by hydraulic press machine with a 100-mm punch. The pressing process was stopped when local necking and cracks were observed on the surface. The deformations of circular marks were accurately measured to

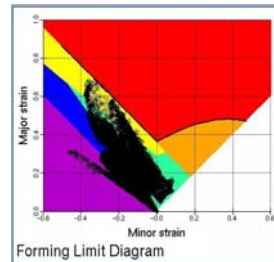
obtain the percentages of major and minor strains. Afterward, this process was repeated again for different semi-dome's radii in order to produce FLD. The results were found that FLDs of SPCC and SPCE are slightly different. It has been found that SPCE has the values of major and minor strains higher than SPCC. In other words, it indicates that SPCE has better formability than SPCC. The FLDs of both steel sheets have predicted failure in forming process consistent with the real experiment and finite element result.

Keywords: Forming Limit Diagram, Sheet Metal Forming, Low Carbon Steel, Formability, Autobody Inner Part

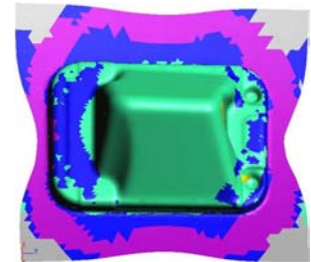
แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในปริมาณมากโดยมีคุณภาพที่เหมือนกันและมีต้นทุนการผลิตต่ำ องค์ประกอบที่ทำให้แม่พิมพ์มีคุณภาพดีคือการออกแบบที่ดี ถูกต้อง และเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นก่อนจะมีการผลิตแม่พิมพ์ออกมาควรจะมีการทดลองและประเมินผลที่เป็นระบบจนแน่ใจว่าชิ้นงานมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสามารถใช้งานได้ ซึ่งการประเมินที่ใช้กับงานขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นในโปรแกรมการวิเคราะห์จะมีการประเมินโดยใช้ FLD อยู่แล้ว ซึ่งสร้างจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุกับสมการที่ใช้ในโปรแกรม แต่ขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit) ของวัสดุแต่ละชนิดไม่ได้ขึ้นอยู่กับการคำนวณเพียงเท่านั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกหลายอย่างที่เป็นตัวแปรทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุไม่ตรงกับความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจริงๆ ทำให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์คลาดเคลื่อน จึงจำเป็นต้องสร้าง FLD ของแต่ละวัสดุขึ้นมาใหม่ ซึ่ง รศ. ชญา ญัตตงาน[1] กล่าวว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นและ Banabic, D.; et al. [2] ยังกล่าวว่าใช้สำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ แต่ Hecker, S.S. [3] กล่าวว่าวัสดุแตกต่างกัน FLC ใช้วิเคราะห์ร่วมกันไม่ได้ทำให้ผลลัพธ์ไม่ตรงกับความเป็นจริงพร้อมกับเสนอแนะวิธีการหา FLC ที่ได้มาตรฐานซึ่งจากการศึกษา FLC ตาม ASTM E 2218-02 (Standard test method for determining forming limit diagram.) [4] นั้นว่าเหมาะสม สามารถวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงก่อนมีการสร้างแม่พิมพ์ ช่วยให้การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการ Tryout ชิ้นงาน



รูปที่ 1 เปรียบเทียบ FLC จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCE ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน แต่ตำแหน่งแตกต่างกันโดย SPCE สูงกว่า SPCC ผลจากการทดลองขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลมจะได้ FLC สูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะในโปรแกรมจะคำนึงถึงความปลอดภัยของชิ้นงานมากกว่าการขึ้นรูปจริง เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดตรงสูงกว่า SPCC จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง(Automotive Part) สามารถขึ้นรูปได้มากกว่าทั้งในการลากขึ้นรูป(Drawing)และการดึงยืดขึ้นรูป(Stretching) เหล็ก SPCC จากการขึ้นรูปจริงจะเกิดความเสียหายบริเวณ Plane Strain และด้านขวาของ FLD ซึ่งเกิดจากการดึงยืดขึ้นรูป ส่วนเหล็ก SPCE จะเกิดความเสียหายบริเวณ Plane Strain และด้านซ้ายของ FLD ซึ่งเกิดจากการดรอว์ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง และผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขีดจำกัดความเครียด(Limit Strain) ที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้น FLC ส่วนที่เกิดความเสียหายขีดจำกัดความเครียดอยู่เหนือเส้น FLC

[1] ชญา ญัตตงาน. (2547). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[2] Banabic, D.; et al. (2000). Formability of metallic materials. Germany: Springer

[3] Hecker, S.S. (1975). Simple technique for determining forming limit curves. Sheet metal industries, pp. 671-676. Los Alamos University

[4] Standard test method for determining forming limit diagram. (2005). Annual book of ASTM Standards, section 3, volume 03.01 pp.1252-1266. Philadelphia: ASTM International.

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

สัญลักษณ์	หน่วย
E = โมดูลัสของการยืดหยุ่น	GPa
e_u = การยืดตัวที่แรงสูงสุด	mm.
k = สัมประสิทธิ์ความต้านการดึง	-
LDR = การจำกัดอัตราส่วนการตรอว์	-
LDH = การจำกัดความสูงโดม	-
m = ความไวของอัตราความเครียด	-
n = เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด	-
r = อัตราส่วนความเครียดพลาสติก	-
r_m = แอนไอโซทรอปีตั้งฉาก	-
r_0 = แอนไอโซทรอปีคตามแนวทิศทางการรีด	-
r_{45} = แอนไอโซทรอปีคทำมุม 45 องศากับแนวทิศทางการรีด	-
r_{90} = แอนไอโซทรอปีคทำมุม 90 องศากับแนวทิศทางการรีด	-
t = ความหนา	mm.
u = การกระจัด	mm.
w = ความกว้าง	mm.
[B] = แมทริกซ์จำนวนเชิง	-
[D] = แมทริกซ์การยืดหยุ่น	-
[K] = แมทริกซ์ความแข็งเกร็งรวม	-
[K] = แมทริกซ์ความแข็งเกร็งตั้งฉาก	-
[N] = ตำแหน่งของฟังก์ชัน	-
{F} = เวกเตอร์แรง	-
$\{f(x,y)\}$ = เวกเตอร์ของการกระจัดในเอลิเมนต์	-
{R} = เวกเตอร์แรงรวม	-
{U} = เวกเตอร์การกระจัดสำหรับวัตถุทั้งหมด	-
{x} = เวกเตอร์การกระจัด	-
ν = อัตราส่วนปัวซอง	-
τ_{xy} = แรงเฉือนระนาบ xy	MPa
Δ = พื้นที่ของเอลิเมนต์	-
Δr = แอนไอโซทรอปีระนาบ	-
σ = ความเค้น	MPa
σ_f = ความเค้นไหล	MPa

σ_r	= ความเค้นจริง	MPa
σ_y	= ความเค้นที่จุดคราก	MPa
ϵ	= ความเครียดจริง	-
ϵ_1	= ความเครียดหลัก	-
ϵ_2	= ความเครียดรอง	-
ϵ_t	= ความเครียดจริงในแนวความหนา	-
ϵ_w	= ความเครียดจริงในแนวความกว้าง	-
ϵ_u	= ความเครียดแรงดึงสูงสุด	-
$\{\epsilon\}$	= เวกเตอร์ความเครียด	-
$\{\delta\}^e$	= การกระจัดในเอลิเมนต์ e	-

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายสวัสดิ์ โสตามุข
วัน เดือน ปี เกิด	29 กรกฎาคม 2502
สถานที่เกิด	อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	99/2629 หมู่ 6 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี (12120)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ครู อันดับ คศ. 2
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	แผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง ถนนสร่งประภา แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ (10210) โทร 0-2565-5277-9 Fax 0-2565-5278 E-mail: sawad_sdm@yahoo.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2519	มัธยมศึกษาปีที่ 3 จากโรงเรียนแก่งคอย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี
พ.ศ. 2522	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.) สาขาช่างกลโรงงาน จากวิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์
พ.ศ. 2524	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) สาขาช่างกลโลหะ จากวิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์
พ.ศ. 2526	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต(อศ.บ.) สาขาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ