

ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา

ปริญญานิพนธ์

ของ

คมสันต์ งามขำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2550

ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา

ปริภูมิตนพ
ของ
คมสันต์ งามขำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์เรื่องซีตจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา สำเร็จลงได้นั้นผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต บัวแก้ว และ ดร. สุวัฒน์ จีระเรียรนาถ เป็นอาจารย์ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี จนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน เป็นอาจารย์ที่ช่วยให้คำปรึกษาคำแนะนำในการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ชาญ ถนัดงาน เป็นประธานคณะกรรมการสอบปากเปล่า และ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีวัชร วีระแก้ว กรรมการสอบปากเปล่า ที่ช่วยให้ข้อสังเกต ข้อแนะนำในการแก้ไขงานวิจัยจนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒกับโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถทางวิชาการและเป็นแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่าย วัสดุอุปกรณ์ คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยและประสานงานกับบริษัทเอกชน

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและเครื่องเพรสไฮดรอลิกส์ขนาด 80 ตัน

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบริษัท ตราเพชร จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปร่างล่างภาชนะ และผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา พี่ น้อง ครอบครัวเพื่อนร่วมงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสุพรรณบุรี ที่ให้โอกาสให้กำลังใจในการศึกษาการทำวิจัยอย่างดีเสมอมา

คมสันต์ งามขำ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
สมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	4
กระบวนการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น.....	21
การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	56
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....	56
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	57
4 ผลการวิจัย.....	67
สมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304.....	67
ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ที่มีความหนาต่างกัน.....	68
ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิต SUS 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	72
ผลการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	77
ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	84
5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	93
สรุปผล.....	93
อภิปรายผล.....	94

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ข้อเสนอแนะ.....	94
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304	100
ภาคผนวก ข เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติทางกลของ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304	104
ภาคผนวก ค การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304	119
ภาคผนวก ง วิธีทดสอบสำหรับอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) สำหรับโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E 517-92a	131
ภาคผนวก จ วิธีทดสอบสำหรับเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วย ความเครียด(n) ของวัสดุโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E 646-91	140
ภาคผนวก ฉ วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัด การขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02	149
ภาคผนวก ช การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20	176
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย	180
ประวัติย่อผู้วิจัย	184

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304.....	67
2 สมบัติและการใช้งานตามเกรด บริษัท ไทยน็อกซ์สตีล จำกัด.....	102
3 เปรียบเทียบมาตรฐานและส่วนประกอบทางเคมี.....	103
4 ผิวสำเร็จชนิดต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	103
5 ขนาดชั้นทดสอบของอัตราส่วนความเครียดพลาสติก.....	135
6 ขนาดที่ต้องการสำหรับการกำหนดค่า n แบบ “Plain- End” Specimen	144

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว	5
2 ในการทดสอบการดึง	9
3 วัสดุส่วนมากเป็นไปตามกฎยกกำลังของการทำให้แข็งด้วยความเครียด	12
4 อัตราของการทำให้แข็งด้วยความเครียดสูง ซึ่งแสดงค่า n	13
5 ตัวอย่างการยืดที่จุดครากของเหล็กกล้าจะหายไปถ้านำเหล็กกล้าไป บ่มความเครียดหลังการเปลี่ยนรูป	15
6 ผลึกเดี่ยวเปลี่ยนรูปโดยการดึง	16
7 การพัฒนาเนื้อวัสดุ	17
8 ด้านแลตทิซ ระนาบสลิป และทิศทางสลิป	20
9 ชั้นทดสอบการดึงแสดงทิศทางหลัก	21
10 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียดสำหรับการเปลี่ยนรูปที่จุดเล็ก ๆ	24
11 แสดงตารางวงกลมบนโลหะแผ่น	25
12 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆของถ้วยทรงกระบอก	26
13 แผนภาพความเครียดที่แสดงถึงความแตกต่างของสัดส่วนความเครียดที่ สอดคล้องกับการขึ้นรูป	28
14 ลักษณะการดึงสองแนวแกน (Equal biaxial stretching) เกิดจากการ ขึ้นรูปโดม	28
15 ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเครียด(Plane strain) เกิดขึ้นด้านข้างของชิ้นส่วนที่มีการขึ้นรูปแนวยาว	29
16 ลักษณะการขึ้นรูปแบบการดึงหนึ่งแนวแกน (Uniaxial tension) ของขอบชิ้นงานแบบ Extrude hole	29
17 ลักษณะของกริดวงกลมแสดงถึงความเค้นเฉือน (Pure shear) ที่ปีกขอบถ้วยที่เกิดจากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก	29
18 ลักษณะของกริดวงกลมบนขอบปีกถ้วย เกิดความเค้นอัดในแนวแกน (Uniaxial compression)	30
19 แผนภาพความเครียดแสดงถึงความแตกต่างของลักษณะการเปลี่ยนแปลง รูปร่างและสัดส่วนความเครียด (Strain ratio)	30
20 เอลิเมนต์มิติเดียว	33
21 เอลิเมนต์สองมิติ	33
22 เอลิเมนต์สามมิติ	34

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 แผนภาพการดำเนินการวิจัยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา	57
24 ลักษณะชั้นทดสอบหาสมบัติทางกล	58
25 การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	59
26 การหาค่า r โดยการเทียบจากแผนภาพความเครียด	59
27 แผนภาพการลงจุดความเค้นจริง ความเครียดจริง ความเค้นทางวิศวกรรม และความเครียดทางวิศวกรรม	60
28 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วย ความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power function)	61
29 ลักษณะการตัดส่วนโค้งด้านข้าง	61
30 แม่พิมพ์ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	62
31 การวัดความเครียดหลัก e_1 ความเครียดรอง e_2	62
32 ลักษณะการวัดความเครียดหลักความเครียดรองโดยโปรแกรม (Program dcal)	63
33 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304	64
34 การสร้างกริดวงกลมบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนขึ้นรูปร่างล่างภาชนะ	64
35 อ่างล่างภาชนะที่เสียหายจากการขึ้นรูป	65
36 ลักษณะถ้วยทรงกรวย (Conical cup)	66
37 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304 หนา 0.40 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง	68
38 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304 หนา 0.58 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง	69
39 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304 หนา 0.78 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง	70
40 ผลเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304 มีความหนา 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง	71
41 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปวิเคราะห์การขึ้นรูป อ่างล่างภาชนะ โดยใช้ขนาดแผ่นแบล็ก 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่น เป็นน้ำมันและโพลีเอททิลีน ใช้แบล็กไฮโดรเจนความดัน 180 kg/cm ²	72

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- | | |
|---|----|
| <p>42 แสดงจุดการวัดความเครียด 1 ถึง 15 บริเวณที่ตึงเครียดของอ่างล้างภาชนะ โดยใช้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันและโพลีเอททิสัน ใช้แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm².....</p> | 73 |
| <p>43 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปด้วยทรงกรวยหนา 0.40 mm.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm.สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม.....</p> | 74 |
| <p>44 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปด้วยทรงกรวยหนา 0.58 mm.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm.สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม.....</p> | 75 |
| <p>45 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปด้วยทรงกรวยหนา 0.78 mm.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm.สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม.....</p> | 76 |
| <p>46 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ หนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm². ไม่มีตรอร์บีด (Draw bead).....</p> | 77 |
| <p>47 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ หนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm² แบบมีตรอร์บีด</p> | 78 |
| <p>48 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ หนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm² แบบมีตรอร์บีด เทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปหนา 0.40 mm.</p> | 79 |
| <p>49 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน.....</p> | 80 |

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

50 ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.58 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน.....	81
51 ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.78 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน.....	82
52 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm, 0.58 mm. และ 0.78 mm.	83
53 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีการทดลอง (EXP0.40) กับ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.40) หนา 0.40 mm.	84
54 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีการทดลอง (EXP0.58) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.58) หนา 0.58 mm.	85
55 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีการทดลอง (EXP0.58) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.58) หนา 0.78 mm.	86
56 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอ่างล้างภาชนะและการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm.	87
57 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณ จุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของอ่างล้างภาชนะเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm.	88
58 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงถ้วยทรงกรวยกับการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm.	88
59 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณ จุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm.	89
60 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงถ้วยทรงกรวยกับการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.58 mm.	90

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
61 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณ จุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.58 mm.....	90
62 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงถ้วยทรงกรวยกับการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.78 mm.....	91
63 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณ จุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.78 mm.....	92
64 ขนาดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน.....	105
65 เครื่องทดสอบการดึง (Universal Testing machine, Dynamic type).....	105
66 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืด (Extensometer).....	106
67 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดด้านขวาง (Extensometer).....	106
68 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test).....	107
69 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริง ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm.....	107
70 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและความเค้น-ความเครียด จริงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.58 mm.....	111
71 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจริง และความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.78 mm.....	115
72 ลักษณะแผ่นขึ้นทดสอบ.....	120
73 ลักษณะการตัดส่วนโค้งด้านข้างที่รัศมีต่างๆ.....	120
74 ลักษณะแผ่นขึ้นทดสอบที่ถูกตัดด้านข้าง.....	121
75 ผ้าสักหลาดสำหรับชุบน้ำยา.....	121
76 แผ่นกรองกัด (Stencils).....	122
77 อุปกรณ์สร้างกระแสไฟฟ้า (Lectroetch power unit).....	122
78 ลักษณะการกลิ้งลูกกลิ้ง.....	122
79 แสดงขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโดม.....	123
80 ลักษณะแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโดม.....	123
81 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็ม.....	124
82 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 40 mm.....	124

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
83 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 50 mm.....	124
84 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 57.5 mm.....	125
85 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 65 mm.....	125
86 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 72.5 mm.....	125
87 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 80 mm.....	126
88 ลักษณะขึ้นทดสอบที่เกิดการคอด.....	126
89 ลักษณะการติดกระดาษที่ขนาด 2.5x2.5 mm.....	127
90 ลักษณะกล้องไมโครสโคปที่ใช้ถ่ายภาพและการบันทึกภาพ.....	127
91 ลักษณะภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป.....	128
92 ลักษณะการแสดงผลของโปรแกรมดีแคล.....	128
93 การลงจุดค่าความเครียดจุดปลอดภัย จุดเกิดการคอด จุดเสียหาย ในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	129
94 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองนำไปใช้งาน.....	130
95 ขึ้นทดสอบอัตราส่วนความเครียดพลาสติก.....	135
96 ขึ้นทดสอบสำหรับการกำหนดค่า n แบบ“Plain-End” Specimen.....	144
97 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จาก ASTM E 2218-02.....	151
98 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) สำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมซีรีส์สตีลชนิด รีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์.....	152
99 แบบตัวอย่างสำหรับวัดความยาวทดสอบใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีด จำกัดการขึ้นรูป.....	153
100 รูปร่างของแบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง โลหะแผ่น.....	154
101 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมซีรีส์สตีลชนิด รีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์.....	173
102 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมเจือชนิด 3003-0.....	174
103 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นทองเหลือง C 260.....	175

คมสันต์ งามข้า. (2550). *ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304* จากการเปลี่ยนความหนา. ปริญญาโท ว.ศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว, อาจารย์ สุวัฒน์ จีระเหียรนาถ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram, FLD) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 จากการเปลี่ยนความหนา ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวย และเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้วัสดุหนา 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm. นำขึ้นทดสอบมาสร้างกริดวงกลมด้วยวิธีการกัดกรวดด้วยไฟฟ้า ขึ้นรูปด้วย 펀ช์ครึ่งทรงกลม (Hemispherical dome punch) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. วัดค่าความเครียดบริเวณจุดปลอดภัย บริเวณจุดเกิดการคอด บริเวณจุดเสียหาย มาลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2) สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit curve, FLC) จากนั้นนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไปวิเคราะห์การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ และถ้วยทรงกรวย โดยสร้างกริดวงกลมบนแผ่นแบล็ก (Blank) ขึ้นรูปแผ่นแบล็ก วัดค่าความเครียดบนชิ้นงานและนำมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พร้อมกับเปรียบเทียบผลจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม AUTOFORM 3.26

ผลการวิจัย พบว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 สร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 และความหนาขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา สามารถประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะและถ้วยทรงกรวยได้ การเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงให้ผลสอดคล้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Komsan Ngankun. (2007). *Forming Limit of Austenitic Grade Stainless Steels in Various Thicknesses*. Master thesis, M.Eng.(Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Vichit Buakaew, Dr. Suwat Jirathearanat

The purpose of this research is to experimentally determine Forming Limit Curves (FLC) of Austenitic Stainless Steels SUS 304 with thickness of 0.4 mm, 0.58 mm, and 0.78 mm, then to apply the forming limit curves in Forming Limit Diagrams (FLD) for part formability evaluation of a kitchen sink and conical cups, and finally to compare the experimental forming results to the Finite Element (FE) simulation results. These forming limit curves are process-limit curves of sheet metals plotted along the first and second principle strain space at necking (engineering major and minor strains) beyond which fractures are predicted. These necking strains were experimentally determined by stretch-forming of sheet blank samples with circle-grid-etched surface into a hemispherical-dome shape till necking appears. Major strain (e_1) and minor strain (e_2) are measured around the necked sites and used to plot the FLC. As for industrial forming experiments, circle-grid-etched blanks were used to form a kitchen sink part and conical cup parts. Then critical part strains measured from these parts were compared to the FLC for its usability. Finite element simulations (AUTOFORM 3.26) were conducted and compared with the experiment part results as well.

The results were found that the forming limit curves of the stainless steels austenitic SUS 304 (constructed following ASTM E 2218-02) seemed to move upward along the major strain axis with the increase of specimen thickness in a nonlinear fashion. It was also shown that these forming limit curves can be applied and used to analyze part formability of the kitchen sink and conical cups. The experimental forming results of these parts also agreed well with the finite element simulation results.

ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา

บทคัดย่อ
ของ
คมสันต์ งามขำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2550

FORMING LIMIT OF AUSTENITIC GRADE STAINLESS STEELS IN VARIOUS THICKNESSES

ABSTRACT

BY

KOMSAN NGAMKUM

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

ปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านการผลิตชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ได้เข้ามาสัมผัสกับชีวิตประจำวันของคนไทยมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมอาหาร เฟอร์นิเจอร์ งานตกแต่ง และอุปกรณ์เครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตดังกล่าว ใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

องค์ประกอบที่สำคัญของการเปลี่ยนรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลึก ขึ้นอยู่กับสมบัติและสภาพการขึ้นรูปได้ ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 เครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูป แม่พิมพ์และสารหล่อลื่น ดังนั้นความสามารถที่จะขึ้นรูปให้ได้รูปทรงมีมิติในด้านความลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลึกคือ ไม่ได้รูปทรงชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจาก การเกิดรอยย่น (Wrinkling) การเกิดการคอด (Necking) การเกิดฉีกขาด (Fracture) ปัญหาดังกล่าวล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียเวลาและต้นทุนการผลิตทั้งสิ้น ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาของภาคอุตสาหกรรม การผลิตในปัจจุบัน ทำได้โดยการทดลองปรับแต่ง เครื่องมืออุปกรณ์ แม่พิมพ์ จนได้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

แนวทางที่ช่วยประเมินสภาพปัญหา จากกรรมวิธีการผลิตด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลึกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิธีการทดลองนั้น มีอีกแนวทางหนึ่ง คือ การใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming-limit diagram ; FLD) ที่ประกอบด้วยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming-limit curve; FLC) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแกนหลัก (Major strain ; ϵ_1) และความเครียดในแกนรอง (Minor strain ; ϵ_2) ซึ่งเป็นเครื่องมือช่วยในการประเมินสภาพปัญหา โดยการวิเคราะห์ความเครียดจากการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมเป็นวงรี ทำให้ทราบบริเวณวิกฤตบนชิ้นงาน การเกิดรอยย่น การเกิดการคอด และการฉีกขาดที่อาจเกิดขึ้นทันทีทันใดในระหว่างการผลิต การวิเคราะห์ความเครียดโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปนี้ช่วยหาสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย เช่นสาเหตุเกิดจากเครื่องมือสึกหรอ การเปลี่ยนสารหล่อลื่น การปรับตั้งเครื่องเพรสและอื่นๆได้ ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาถึงผลของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการเปลี่ยนความหนาขึ้นทดสอบ โดยการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษามาใช้ประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ในประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02
2. ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากทดลอง ไปวิเคราะห์การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวย
3. เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.4 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm โดยวิธีการทดลอง
2. ขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ (Sink) หนา 0.4 mm. ของบริษัท ตราเพชร จำกัด รุ่น MD100 ความลึก 130 mm.
3. ขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย (Conical cup) หนา 0.4 mm., 0.58 mm และ 0.78 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm.
4. จำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ (Sink) และถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป หมายถึง แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง ใช้วิเคราะห์ทำนายผล สภาวะความเครียดบอกตำแหน่ง การเกิดการฉีกขาด การเกิดการย่นและการเกิดการคอดของชิ้นงาน
2. เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป หมายถึง เส้นโค้งที่คงอยู่ในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้บอกขีดจำกัดในการขึ้นรูป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ได้นำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD) ไปใช้ออกแบบกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
2. พัฒนาแนวทางการประยุกต์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์การขึ้นรูปและหาขีดจำกัดการขึ้นรูป ทำให้ลดเวลา ลดขั้นตอนการทดลองการผลิต และลดต้นทุนการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. สมบัติเชิงกลของวัสดุ
2. กระบวนการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น
3. การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการดึง (Mechanical properties tension)

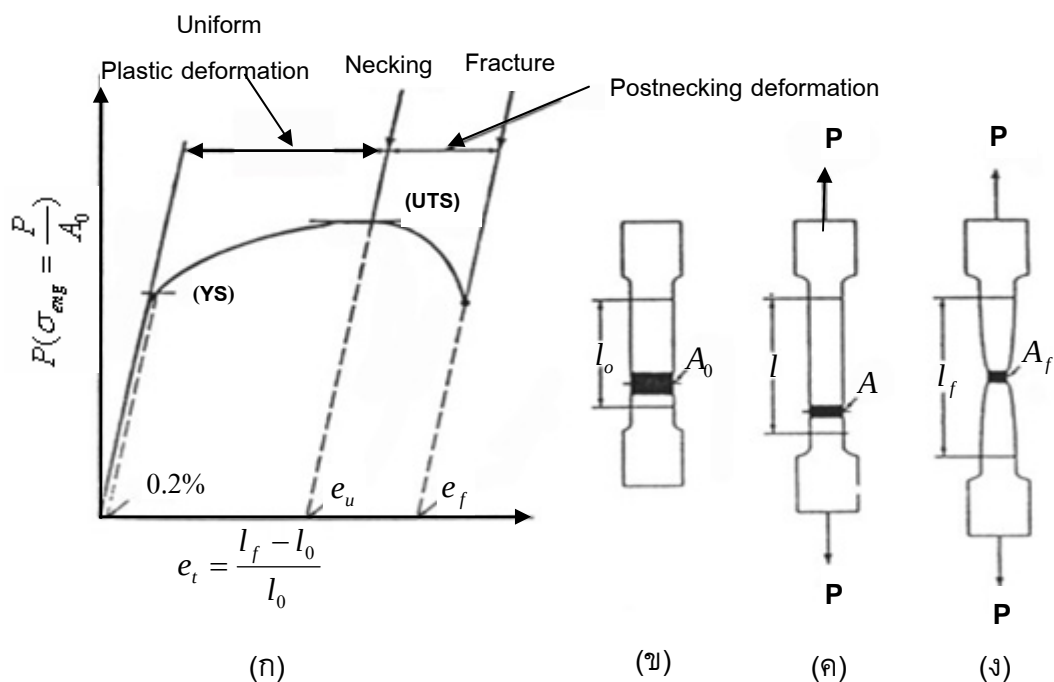
ชาญ ฤกษ์งาน (รากฐานวิศวกรรมการผลิต : 1-5) กล่าวไว้ว่า สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือ ความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรง มีหลายประเภท เช่น แรงใช้งาน (Service load) แรงสถิต (Static load) เป็นต้น

การทดสอบการดึง (Tension test)

วิธีการหาสมบัติวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบการดึง (Tension test หรือ Tensile test) เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป จึงต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ASTM Standard E8 หรือมาตรฐานอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยสากล

เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain curve)

ในระหว่างการทดสอบการดึง ทั้งโหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืด จากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการกระจัด (Force-displacement diagram) ดังแสดงใน ภาพประกอบ 1 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียวเช่น เหล็กกล้า ที่ทดสอบในอุณหภูมิปกติ



ภาพประกอบ 1 (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว(ข) ชิ้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม (ค) เปลี่ยนรูปอย่างพลาสติก - สม่าเสมอในช่วงความยาวทดสอบและ (ง) การคอดและขาด

ถ้าขนาดหน้าตัดขวางของชิ้นทดสอบมีขนาดเพิ่มขึ้น จะได้เส้นโค้งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เพราะชิ้นทดสอบขนาดใหญ่ต้องการใช้แรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการทำให้ผลการทดสอบสามารถใช้ได้กับชิ้นงานทุกขนาดจึงต้องจัดรูปแบบของผลการทดสอบให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นกลาง เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การหารแรง P ด้วยพื้นที่ A โดยทั่วไปความเค้น (Stress) มีนิยามว่า แรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ ในวัตถุที่รับแรงภายนอก ความเค้นปกติ หรือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) แรงกระทำตั้งฉากกับหน้าตัด และแทนด้วย σ ค่าของความเค้นคือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

ในขณะที่ทดสอบการดึง ชิ้นทดสอบได้รับแรงดึงให้ยืดออก การประมาณครั้งที่หนึ่งคือ วัสดุวิศวกรรมส่วนมากยืดตัวไม่ได้ ในระหว่าง การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น (Elastic deformation) ปริมาตรเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ในระหว่างการเปลี่ยนรูปพลาสติก หรือการเปลี่ยนรูปถาวร

(Plastic deformation) ปริมาตร V เกือบคงตัวทั้งหมด ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นหลักการปริมาตรคงตัว (Principle of constancy of volume)

$$V = A_0 l_0 = A_f l_f = Al \quad (2)$$

เมื่อ A และ l คือ พื้นที่หน้าตัดขวางและความยาวชั่วขณะตามลำดับ ตัวห้อย 0 อ้างอิงถึงมิติเริ่มต้น ส่วนตัวห้อย f อ้างอิงถึงมิติสุดท้าย เนื่องจากปริมาตรคงตัว เมื่อความยาวขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบภาพประกอบ 1(ค) กับภาพประกอบ 1(ข)) พื้นที่หน้าตัดขวางของขึ้นทดสอบจึงต้องลดลงเพื่อชดเชยกัน แต่อย่างไรก็ตาม ก็ไม่อาจหาค่าพื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกต้องได้ทันที, ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงปรับเปลี่ยนการคำนวณเป็น แรง P หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม A_0 จากนิยาม, ความเค้นคือแรงที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ แต่เมื่อหารด้วยพื้นที่ A_0 จึงได้ผลลัพธ์ที่ไม่ใช่ ความเค้นจริง (True stress) จึงเรียกความเค้นที่ได้ว่า ความเค้นวิศวกรรม (Engineering stress, σ_{eng})

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0} \quad (3)$$

ความยืดก็สามารถคำนวณให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นกลางได้โดยหารความยาวที่เปลี่ยนแปลงด้วยความยาวเดิม ปกติมักเรียกว่า ความเครียดดึงวิศวกรรม (Engineering tensile strain, e_t)

$$e_t = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

เมื่อ $l - l_0 = \Delta l$ คือความยาวที่เปลี่ยนแปลงเพื่อความสะดวกในงานจริงจึงมักบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

$$e_t(\%) = \frac{l - l_0}{l} * 100 \quad (5)$$

ความต้านแรงในการดึง (Strength in tension) จากการพิจารณาเส้นโค้งความเค้นกับความเครียดแสดงให้เห็นจุดที่สำคัญหลายจุดที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของวัสดุ คือ **โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)** ในช่วงแรกของการทดสอบ แรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นสัดส่วนกับความยืด เส้นโค้งความเค้นกับความเครียดในช่วงนี้เป็นไปตาม กฎของฮุก (Hooke's law)

$$\sigma = Ee_t \quad (6)$$

ค่าคงตัวของความเป็นสัดส่วน (ความชันของเส้นตรง) เรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus, E)

$$E = \frac{\sigma}{e_t} \quad (7)$$

ถ้าปล่อยแรงดึงขึ้นทดสอบในช่วงนี้ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีความยาวเท่าเดิม หรือ เรียกว่า การเปลี่ยนรูปทั้งหมดเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastics)

ความต้านแรงคราก (Yield Strength)

เมื่อทดสอบวัสดุเหนียวขณะที่ความเค้นถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งความชันของเส้นโค้งเปลี่ยนแปลง ความเค้นค่านี้เรียกว่า ขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional limit) การหาค่าความเค้นนี้ทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้เองจึงมักเลือกจุดที่ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปถาวร ความเค้นวิศวกรรมที่จุดนี้เรียกว่าความต้านแรงคราก R_p โลหะส่วนมากมักใช้การเปลี่ยนรูปถาวร 0.2% เป็นจุดเริ่มต้น เพราะวัดค่าได้ง่ายและเรียกความต้านแรงนี้ว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) $R_{p0.2}$ ดังนั้น

$$R_{p0.2} = \frac{p0.002}{A_0} \quad (8)$$

สังเกตว่า จากนิยามความเครียด 0.002 เป็นความเครียดถาวร (พลาสติก) ทั้งหมด เพราะฉะนั้น แรง $P_{0.2}$ จึงหาได้โดยการลากเส้นจาก $e_1 = 0.002$ ขนานกับเส้นยืดหยุ่น ถ้าปล่อยแรงดึงขึ้นทดสอบที่จุดนี้ การเปลี่ยนรูปทั้งหมดจะถอยกลับด้วยความชันเดิมของของเส้นโค้งแรงกับการกระจัด เมื่อลากเส้นขนานแล้ว ส่วนของความเครียดยืดหยุ่นที่อยู่ในความเครียดทั้งหมดจะหมดไป ภาพประกอบ 1 (ก)

ความต้านแรงครากเป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้นในโครงสร้างวิศวกรรม จึงมักกำหนดค่าความเค้นออกแบบให้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของความเค้นพิสูจน์ $R_{p0.2}$ โดยใช้ค่าความปลอดภัยหรือการออกแบบมักใช้ค่าความเค้นต่ำกว่า $R_{p0.2}$

ความต้านแรงดึง (Tensile Strength)

เมื่อออกแรงดึงขึ้นทดสอบให้ยืดมากขึ้น ช่วงความยาวทดสอบยืดมากขึ้น แต่ยังคงยืดออกอย่างสม่ำเสมอ ภาพประกอบ 1 (ค) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มแรง วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นตามการเปลี่ยนรูปซึ่งเรียกว่า วัสดุเกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening) ขณะที่การเปลี่ยนรูปถึงค่าวิกฤติค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและที่มาของกระบวนการผลิตวัสดุ การทำให้แข็งด้วยความเครียดจะไม่สามารถสมดุลกับความต้านแรงที่ลดลงเนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด จึงเกิดรอยคอดขึ้น ณ จุดที่อ่อนแอที่สุด เนื่องจากในขณะนี้หน้าตัดขวางลดลงเฉพาะแห่ง หน้าตัดขวางบริเวณนี้จึงรับแรงได้น้อยลง จึงทำให้แรง P ลดลงในขณะที่การเปลี่ยนรูปในบริเวณรอยคอดเพิ่มมากขึ้น ภาพประกอบ 1(ง) และในที่สุด ขึ้นทดสอบก็ขาด

ความเค้นวิศวกรรมขณะที่แรงดึงสูงสุด เรียกว่า ความต้านแรงดึง R_m หรือมักเรียกว่า ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

$$R_m = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (9)$$

ความต้านแรงดึงไม่ใช่ความเค้นจริง เพราะแรงหารด้วยพื้นที่ซึ่งไม่ใช่พื้นที่จริงที่จุดนั้น แต่ก็ยังเป็นค่าที่ดีมากในเชิงปฏิบัติสำหรับใช้เพื่อการควบคุมคุณภาพ นอกจากนั้นยังใช้วัดแรงสูงสุดที่ชิ้นส่วนสามารถรับได้ก่อนเสียหายรุนแรง

สภาพดัดยืดยืดจากการดึง (Ductility in Tension)

เส้นโค้งความเค้นกับความเครียดวิศวกรรม ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติยืดดึงของวัสดุ คือ ความสามารถเปลี่ยนรูปโดยไม่แตกร้าว

1. ความยืดสม่ำเสมอ (Uniform elongation) ก่อนเกิดการคอดหน้าตัดขวางของชิ้นทดสอบในช่วงความยาวทดสอบลดลงเกือบสม่ำเสมอ เพราะฉะนั้น ความเครียดวิศวกรรมขณะที่รับโหลดสูงสุด เรียกว่า ความยืดสม่ำเสมอ แทนด้วย ε_u

$$\varepsilon_u = \frac{l_u - l_0}{l_0} \quad (10)$$

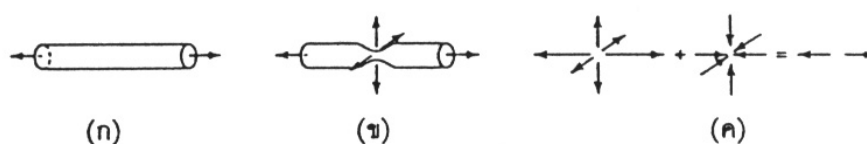
เมื่อ l_u คือความยาวขึ้นทดสอบเมื่อเริ่มเกิดการคอด ความยืดสม่ำเสมอจะมีความสำคัญสำหรับกระบวนการ เปลี่ยนรูปบางกระบวนการ แต่มีการนำไปใช้งานน้อยทางด้านสมบัติการใช้งาน

2. ความยืด (Elongation) บ่อยครั้งที่ ความยืดทั้งหมดขณะขาด (Total elongation to fracture) หรือเรียกว่า ความยืดทั้งหมด และบางครั้งทำให้เกิดความเข้าใจผิดโดยเรียกว่า ความยืด จากภาพประกอบ 1(ก) และภาพประกอบ 1(ง) เห็นได้ว่า คือผลรวมของความยืดสม่ำเสมอกับความยืดที่รอยคอด ดังนั้นความยาวทดสอบจึงมีผลต่อความยืดมากขึ้นทดสอบที่มีความยาวทดสอบสั้นกว่าจะมีความยืดได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องกำหนดความยาวทดสอบไว้ ความยืดทั้งหมด ซึ่งเป็นปริมาณที่วัดได้และเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพ

การลดพื้นที่หน้าตัด (Reduction in Area)

การวัดค่าที่มีอิทธิพลต่อสมบัติยืดดึงของวัสดุได้ง่ายที่สุด คือ การวัดการลดทอนพื้นที่ ขณะขาดเพื่อทำความเข้าใจต่อการลดทอนพื้นที่ จำเป็นต้องพิจารณาสภาพความเค้นด้วยการเปลี่ยนรูปของความยาวทดสอบในตอนต้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบเล็กลงอย่างสม่ำเสมอ ภาพประกอบ 2(ก) วัสดุเป็นไปตามกฎปริมาตรคงตัว สมการ (2) ดังนั้น เพื่อชดเชยความยาวที่เพิ่มขึ้น หน้าตัดขวางของชิ้นทดสอบต้องลดลง ความเค้นเกิดขึ้นในทิศทางเดียวเท่านั้น คือ ความเค้นดึงในแนวแกน; สภาพความเค้นเป็นแบบ การดึงในแนวแกนเดียว

การเปลี่ยนรูปที่กล่าวมาข้างต้นเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการคอด รอยคอดเป็นส่วนที่อ่อนแอที่สุดของชิ้นทดสอบ ดังนั้น จึงมีการเปลี่ยนรูปมากที่รอยคอด วัสดุที่รอยคอดไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้โดยอิสระ เพราะเนื้อวัสดุที่อยู่ติดกันยังไม่เปลี่ยนรูป จึงต้านทานไว้ ทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี ด้วยเหตุนี้เอง ภายในบริเวณรอยคอด สภาพความเค้นจึงเปลี่ยนไปเป็น การดึงในสามแกน ภาพประกอบ 2(ข)



ภาพประกอบ 2 ในการทดสอบการดึง, สภาพความเค้นคือ (ก) การดึงในแกนเดียวระหว่างการยืดสม่ำเสมอแต่ (ข) การดึงในสามแกนที่บริเวณรอยคอด เมื่อซ้อนทับด้วยความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) ทำให้การดึงในสามแกนหมดไป (ค) ยับยั้งการเกิดโพรง

การดึงในสามแกนจะฉีกวัสดุออกจากกันตอนแรกโพรง(ช่องว่าง) เกิดขึ้นที่ศูนย์กลางของรอยคอดเมื่อมีความเครียดเพิ่มขึ้นโพรงในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนจะต่อถึงกันพื้นที่หน้าตัดขวางที่เหลือเป็นรูปวงแหวน ไม่เพียงพอที่จะรับแรงกระทำจึงขาดวัดและคำนวณพื้นที่หน้าตัด

ขวางเล็กสุดของชิ้นทดสอบ A_f และคำนวณหาการลดทอนพื้นที่ q (หรือ RA) ได้จากสมการ

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (11)$$

การเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะ (Plastic deformation of metal)

การเปลี่ยนรูปถาวร หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงาน โดยไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือหลอมเหลววัสดุ เห็นได้ชัดว่า สิ่งสำคัญก็คือ วัสดุควรสามารถผ่านการเปลี่ยนรูปถาวรได้โดยปราศจากการแตกร้าว แต่เนื่องจากการเปลี่ยนรูปทั้งหมดเกิดขึ้นในสภาพแข็ง (Solid state) การที่วัสดุจะเข้าไปในดาย (Die) จนเต็มจึงไม่ง่ายเหมือนกับการหล่อ เพราะฉะนั้น การออกแบบชิ้นส่วนและกระบวนการแปรรูปโลหะจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาทั้งกฎเกณฑ์ที่ควบคุมการไหล (เนื่องจากเป็นตัวกำหนดว่าจะได้ตามรูปทรงที่ต้องการหรือไม่) รวมทั้งสมบัติการยึดติ่งของวัสดุ (เนื่องจากเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปที่สามารถเป็นไปได้) ความดัน แรง และกำลังที่ต้องการ (เนื่องจากเป็นตัวกำหนดภาระของเครื่องมือและอุปกรณ์)

ความสำเร็จของกระบวนการขึ้นอยู่กับการกระทำระหว่างสมบัติวัสดุ กับสภาวะของกระบวนการหลักการที่จะอธิบายต่อไปนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ในสากล อย่างไรก็ดีตาม ด้วยเหตุผลเชิงปฏิบัติ ปกติจะแบ่งกระบวนการแปรรูปโลหะออกเป็นสองกลุ่ม คือ กระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะก้อน (Bulk deformation processes) ซึ่งความหนาเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือมิติหลักอย่างอื่นของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงมาก และกระบวนการแปรรูปโลหะแผ่น (Sheet – metalworking processes) ซึ่งความหนาเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนั้น แผ่นวัสดุซึ่งเป็นวัสดุเริ่มต้นของกระบวนการ คือ ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะก้อนคือผลิตภัณฑ์จากการรีด (rolling) ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักมูลที่ประยุกต์ใช้ได้ทั้ง กระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะก้อน และกระบวนการแปรรูปโลหะแผ่น

สมบัติวัสดุ

ในที่นี้จะกล่าวถึงสมบัติวัสดุที่เน้นถึงความสัมพันธ์กับกระบวนการเปลี่ยนรูป
ความเค้นไหลในงานแปรรูปเย็น (Flow stress in cold working)

สำหรับการคำนวณในงานแปรรูปโลหะความต้านแรงครากและความต้านแรงดึงคือสมบัติเบื้องต้นที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นความเค้นที่ต้องการใช้ในการเปลี่ยนรูปวัสดุชิ้นงาน

ความเค้นไหลในการดึง (Flow stress in tension)

ความเค้นวิศวกรรมตามที่คำนวณจากการทดสอบการดึง มีใช้ในการคำนวณน้อย สิ่งที่ต้องการคือความเค้นจริง (True stress) ที่มีนิยามว่า แรง P หารด้วยพื้นที่ชั่วขณะ A

สามารถวัดพื้นที่หน้าตัดขวางชั่วขณะได้ แต่ในการคำนวณมักใช้หลักการปริมาตรคงตัวเมื่อความยืดยาวในช่วงความยาวทดสอบยังคงสม่ำเสมอ (สมการ)

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} = \frac{V}{l} \quad (12)$$

เมื่อ l คือความยาวชั่วขณะเมื่อเกิดการคอดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดซึ่งเป็นผ่านศูนย์กลางที่สัมพันธ์กับความยาวเป็นตัวไม่รู้ค่า

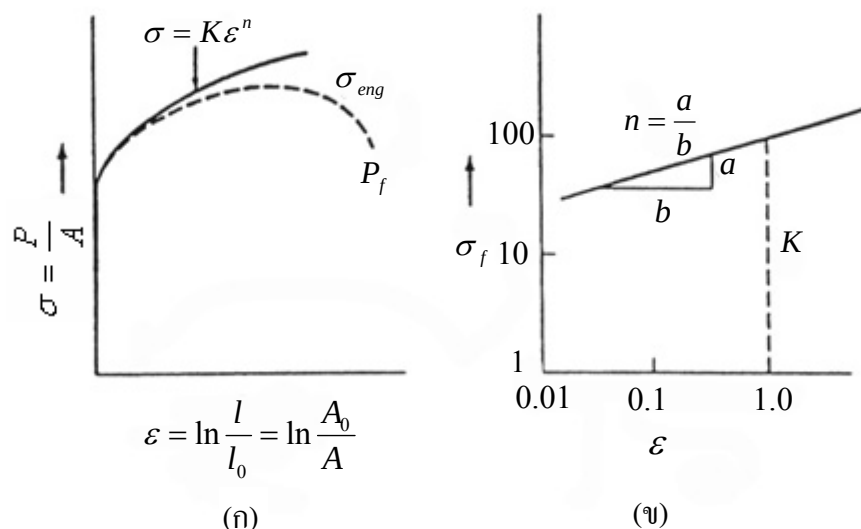
เนื่องจากสนใจการเปลี่ยนรูปถาวรซึ่งเริ่มต้นที่จุดคราก ตามปกติจะคำนวณความเค้นจริงตั้งแต่เริ่มต้นครากจนเกิดการคอด จุดที่คำนวณแต่ละจุดบ่งบอกค่าความเค้นที่ต้องใช้เพื่อรักษาให้วัสดุเปลี่ยนรูปต่อไปหรือไหลต่อไป ดังนั้นจะเรียกความเค้นนี้ว่าความเค้นไหล (Flow stress, σ_f)

$$\sigma_f = \frac{P}{A} \quad (13)$$

เมื่อ P คือแรงชั่วขณะ เมื่อลงจุดความเค้นไหลสัมพันธ์กับความเครียดดึงวิศวกรรม e_t (สมการ 4), (สมการ 5) ต้องการ ใช้ ความเครียดจริง (True strain, ε) ซึ่งอาจเรียกว่า ความเครียดธรรมชาติ (Natural strain) หรือความเครียดเชิงลอการิทึม (Logarithmic strain) จากนั้น ความเครียดจริงหาได้จากลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความยาวชั่วขณะ l ต่อความยาวเดิม l_0

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (14)$$

ข้อมูลที่ได้จากเส้นโค้งแรงดึงกับระยะยืดสามารถนำมาลงจุดเป็นเส้นโค้งความเค้นจริงกับความเครียดจริง ภาพประกอบ 3(ก) เพื่อเปรียบเทียบกันจึงแสดงเส้นโค้งความเค้นกับความเครียดวิศวกรรมด้วยเส้นประ



ภาพประกอบ 3(ก) วัสดุส่วนมากเป็นไปตามกฎยกกำลังของการทำให้แข็งด้วยความเครียด (ข) การลงจุดความเค้นไหลกับความเครียดจริงบนสเกลล็อก - ล็อก

เส้นโค้งความเค้นไหลของวัสดุชนิดต่าง ๆ มีการรวบรวมไว้ในหนังสือคู่มือวัสดุ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณและสะดวกในการบันทึกมากกว่า เมื่อลงจุด σ_f กับ ϵ บนกระดาษล็อก - ล็อก มักจะได้เส้นตรงดังภาพประกอบ 3(ข) แสดงว่า σ_f ต้องเป็นฟังก์ชันยกกำลังของ ϵ

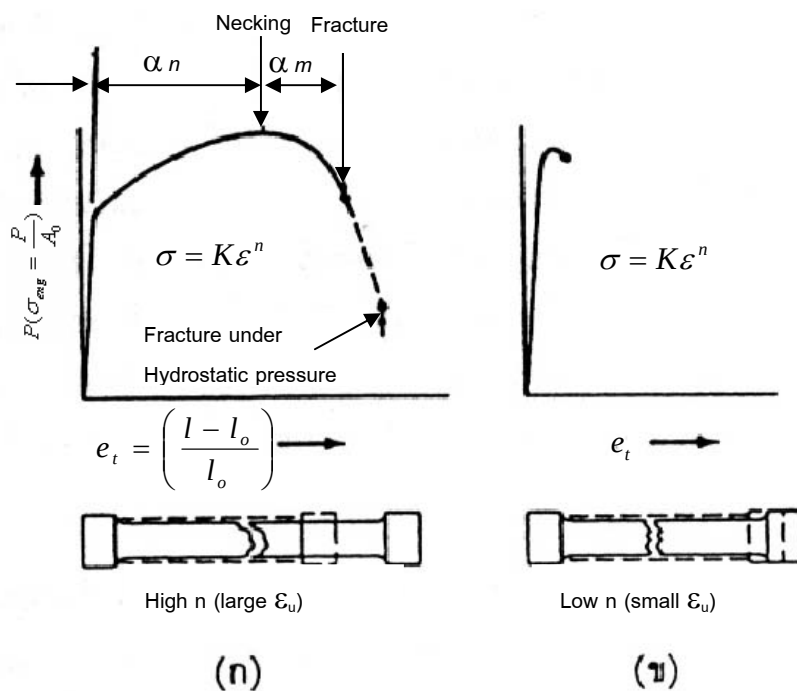
$$\sigma_f = K\epsilon^n \quad (15)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient) และ n คือ เลขชี้กำลังของการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain - hardening exponent) จากการลงจุดแบบล็อก - ล็อก K คือ ความเค้นเมื่อความเครียดเท่ากับหนึ่งและ n คือความชันของเส้นวัดบนสเกลเส้นตรงอีกวิธี

ผลของการทำให้แข็งด้วยความเครียดต่อการคอด

ข้อสังเกตที่สำคัญก็คือการทำให้แข็งด้วยความเครียดทำให้เกิดการคอดซาลง ซึ่งจะเข้าใจได้เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ในการเกิดรอยคอด ขณะที่ขึ้นทดสอบยืด รอยคอดอาจเริ่มต้นที่ใดก็ได้ในช่วงความยาวทดสอบโดยทั่วไปอยู่ที่จุดที่ไม่เป็นเอกพันธ์ (Inhomogeneity) คือวัสดุอ่อนแอกว่าที่อื่นด้วยเหตุผลต่าง ๆ เช่น ผิวไม่สม่ำเสมอ มีสารฝังใน หรือมีเกรนขนาดใหญ่ในทิศทางที่อ่อนแอ เป็นต้น ถ้า n มีค่ามาก การเปลี่ยนรูปเฉพาะแห่งในบริเวณที่เริ่มรอยคอดทำให้ค่า σ_f ที่จุดนั้นเพิ่มขึ้น (สมการ 15) การเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นต่อไปในบริเวณอื่นที่เกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียดน้อยกว่า จนกระทั่งความแข็งไม่สามารถต้านทานได้อีกต่อไปเมื่อ

ความสามารถในการรับโหลดลดลง เพราะหน้าตัดขวางเล็กลง ขณะนี้ รอยคอดเสถียรและคอดต่อเนื่อง ภาพประกอบที่ 4(ก) ส่วนแรงดึงลดลง วัสดุที่เป็นไปตามกฎยกกำลังของการทำให้แข็งด้วยความเครียด(สมการ 15) ค่า n เท่ากับค่าความเครียดสม่ำเสมอที่แสดงด้วยความเครียดจริง เพราะฉะนั้น วัสดุที่มีค่า n น้อยจึงเกิดการคอดหลังจากเริ่มครากไม่นานนัก ภาพประกอบ 4(ก) และ 4(ข)



ภาพประกอบ 4 (ก) อัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดสูงซึ่งแสดงค่า n มากมีผลทำให้ส่วนยืดมาก การเปลี่ยนรูปหลังคอดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความไวต่ออัตราความเครียดหรือค่า m และการขาดขาดลงภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก (ข) วัสดุที่มีค่า n น้อยจะคอดเร็วและถ้า m มากจะขาดเร็ว

ความเค้นไหลในการดึง (Flow Stress in Tension)

ปัญหาของการทดสอบการดึงก็คือ การคอดทำให้ความเครียดสม่ำเสมอมีค่าจำกัด และการหาค่าความเค้นไหลไม่แน่นอนเมื่อความเครียดมีค่ามาก กระบวนการแปรรูปโลหะมีการเปลี่ยนรูปมาก การทดสอบการกดใช้ประโยชน์ได้มากกว่า พื้นที่หน้าตัดชั่วขณะคำนวณได้จากหลักการปริมาตรคงตัวเช่นกัน แต่ในที่นี้ความยาวเปลี่ยนเป็นความสูง h จากนิยาม ความเครียดจริง ϵ คือ

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (16)$$

การคำนวณนี้ได้ค่าเป็นลบ เมื่อพิจารณาทางด้านวัสดุการเปลี่ยนรูปโดยการกดหรือการดึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเชิงโลหะวิทยาเหมือนกันด้วยเหตุนี้เองจึงสัญลักษณ์ไว้และหาค่าบวกของความเครียดจริง โดยใช้อัตราส่วนของค่ามากต่อค่าน้อย ในการคำนวณหาค่าลอการิทึมธรรมชาติ

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{A}{A_0} \quad (17)$$

การหาค่าความเค้นจริงในสมการ (13) ตามความเป็นจริงแล้ว ค่าความเค้นจริงนี้ คือ ความดันที่ผิวสัมผัส และอาจถือว่าเป็นความเค้นไหลได้เฉพาะเมื่อไม่คิดผลของความเสียหาย

การครากไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous yielding)

โลหะและโลหะเจือบางชนิด แสดงการเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนรูปถาวรอย่างไม่ราบรื่น นอกจากนั้นการแข็งด้วยความเครียดก็ไม่ต่อเนื่อง ความผิดปกติในพฤติกรรมการไหลอย่างพลาสติกมีเหตุผลในเชิงโครงสร้าง

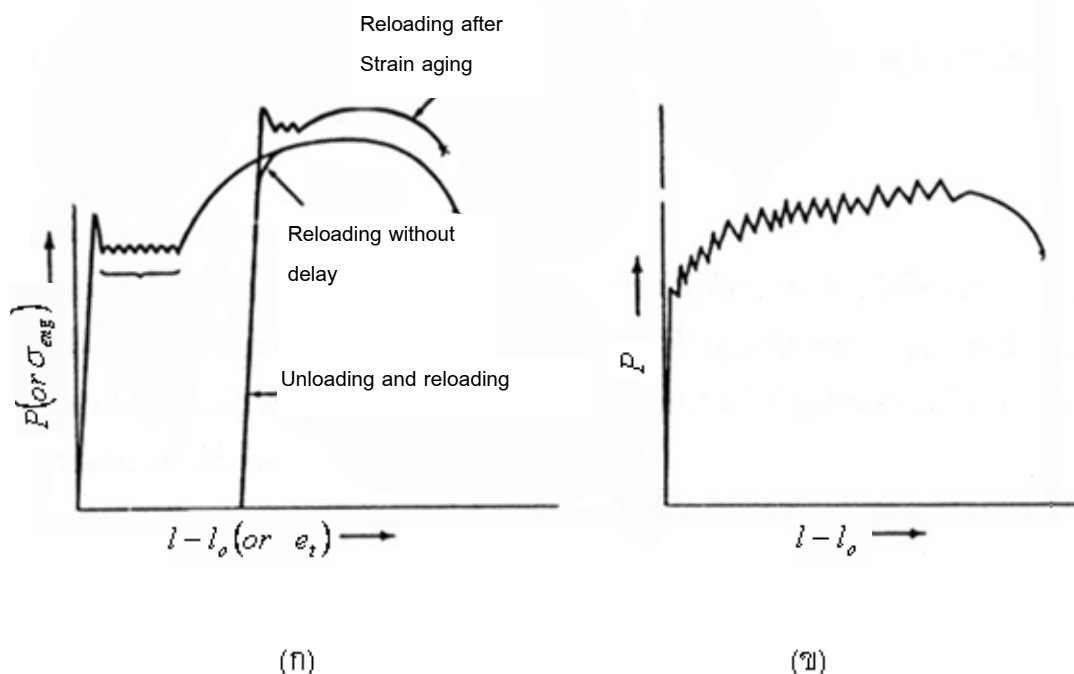
การยืดที่จุดคราก (Yield-Point Elongation)

มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสารละลายของแข็งระหว่างอะตอม (Interstitial solid solution) ซึ่งอะตอมตัวละลาย (Solute atoms) ที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมสารละลาย (solvent atoms) เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมในแลตทิซพื้นฐาน อะตอมตัวละลายเหล่านี้มักจะเสาะหาแหล่งที่สะดวกในแลตทิซที่บกพร่อง เช่น โพรงในโครงสร้าง สิ่งที่พบชัดเจนมากที่สุดคือ คาร์บอนและไนโตรเจนในเหล็ก เนื่องจากขนาดอะตอมเล็กมากเพียงพอที่จะแทรกเข้าไปในแลตทิซได้ แม้ว่าจะเป็นเช่นนั้น อะตอมเหล่านี้ก็มีแนวโน้มที่จะย้ายไปยังดิสโลเคชัน (Dislocation) ที่มีช่องว่างมากกว่าเมื่อแลตทิซบิดเบี้ยวไป อะตอมตัวละลายทำให้เกิด Condensed atmosphere ที่ทำให้แลตทิซสมบูรณ์และหยุดการเคลื่อนไหว คือ pins the dislocations.

ในการเปลี่ยนรูปอย่างต่อเนื่อง, ต้องใช้ความเค้นมากเพื่อให้ดิสโลเคชันสามารถแตกออกจาก condensed atmosphere ของอะตอมคาร์บอนหรือไนโตรเจน ซึ่งทำให้ปรากฏจุดครากบนเส้นโค้งความดันกับความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

อย่างไรก็ตาม สังเกตว่า การที่แรงมีค่ามากในตอนต้นเป็นผลมาจากสมบัติยืดหยุ่นของอุปกรณ์ทดสอบ เพราะฉะนั้น สิ่งที่เราเรียกว่า จุดครากบน จึงไม่ใช่พารามิเตอร์ของวัสดุจริง หลังจากที่ดินโลเคชันแตกออกจาก pinning atoms จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นและเคลื่อนที่เป็นกลุ่มใหญ่ในทิศทางของความเค้นเฉือนสูงสุด (ประมาณ 45 องศากับทิศทางของแรงกระทำ) ภายใต้สภาวะการณ์ที่เหมาะสม จะมองเห็นการครากเฉพาะแห่งได้เมื่อปรากฏเส้นลีดเดอร์ (Lueders line) หรือแถบความเครียด (Strain bands) บนผิวของชิ้นทดสอบ (ภาพประกอบ 6) แต่มีผลลัพธ์เป็นรอย ร้าวคราก (Stretcher strain) บนผิวของชิ้นงานโลหะแผ่นที่ผ่านการยืดขึ้นรูป (Stretch-

formed)การเกิดแถบความเครียดอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของชิ้นทดสอบ เมื่อความเค้นมีค่าค่อนข้างน้อย ทำให้เกิดการยืดย



ภาพประกอบ 5 (ก) ตัวอย่างการยืดที่จุดครากของเหล็กกล้าจะหายไปถ้านำเหล็กกล้าไปบ่มความเครียดหลังการเปลี่ยนรูป (ข) จุดครากหยักเป็นตัวอย่างของโลหะเจือสารละลายของแข็ง

ซึ่งเรียกว่า การยืดที่จุดคราก (Yield-point elongation) ภาพประกอบ 5(ก) เมื่อแถบความเครียดครอบคลุมผิวทั้งหมดกลายเป็นพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียดปกติ

ถ้าทำให้วัสดุเกิดความเครียดแล้วหยุดเป็นจังหวะ เส้นโค้งการทำให้แข็งด้วยความเครียดจะต้อกัน อย่างไรก็ตาม ถ้ามีเวลาเพียงพอให้อะตอมที่แทรกอยู่เสาะหาตำแหน่งดิสโลเคชันใหม่ (ซึ่งคาร์บอนและไนโตรเจนจะกลั่นตัวอีกครั้งหนึ่ง) เหล็กกล้าจะต้านทานแรงเพิ่มขึ้นและปรากฏการณ์จุดครากจะเกิดขึ้นอีก (เส้นประในภาพประกอบ 5) พฤติกรรมนี้เรียกว่า การบ่มเครียด (Strain aging)

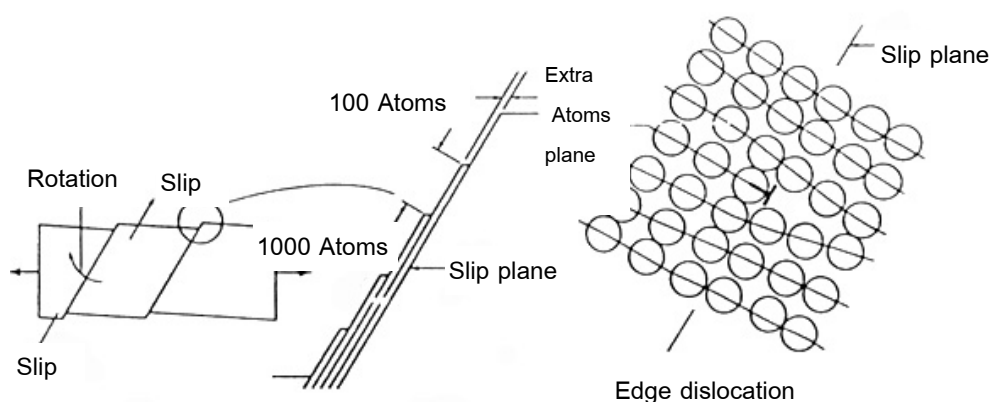
จุดครากหยัก (Serrated Yielding)

จากการสังเกต การครากไม่ต่อเนื่องระหว่างการทำให้แข็งด้วยความเครียดของวัสดุบางชนิด ถึงสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับความไวของอัตราความเครียดเป็นลบนอกเหนือจาก Dislocation pinning เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง ที่ “ไม่แข็งแรงนัก” (ค่าคงตัวสปริงต่ำ) เกิดการครากเป็นขั้น ๆ แต่เมื่อทดสอบบนเครื่องที่แข็งแรงแล้ว แรงลดลงอย่างไม่แน่นอนและรวดเร็ว (จุดคราก

หยัก) ดังภาพประกอบ 5(ข) พฤติกรรมเช่นนี้สร้างปัญหาให้กับอะลูมิเนียมเจือบางชนิด เพราะจะทำให้เกิดรอยที่มองเห็นได้ชัดบนผิว

เนื้อวัสดุ (แอนไอโซทรอปี)

ผลึกของโลหะเปลี่ยนรูปโดยการสลิป (Slip) บนระนาบที่สะดวก ถ้ายาวมากขึ้น ระนาบสลิปต้องหมุนไปในทิศทางของความเครียดถ้าการเปลี่ยนรูปเป็นการกดระนาบสลิปจะหมุนวางทิศทางของความเครียด ลักษณะเช่นนี้มีความสำคัญต่อผลลัพธ์ที่ตามมาในวัสดุหลายรูปผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจำนวนระนาบสลิปจำกัด



ภาพประกอบ 6 ผลึกเดี่ยวเปลี่ยนรูปโดยการดึง (ก) การสลิปของบริเวณที่ติดกัน (ข) เมื่อขยายภาพใหญ่ขึ้นจะเห็นระนาบสลิปที่อยู่ติดกัน (ค) ภายในระนาบสลิปจะมีความบกพร่องเป็นเส้น คือ ดิสโลเคชัน

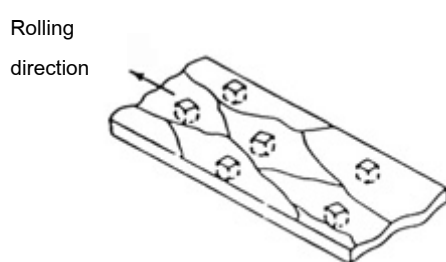
ก่อนการเปลี่ยนรูปวัสดุมีสมบัติเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) หมายถึงสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางแสดงถึงสมบัติเฉลี่ยของผลึกที่จัดวางตัวอย่างสุ่มการเปลี่ยนรูปมีผลลัพธ์ทำให้เกรนยัดและภายในเกรนระนาบสลิปหมุนไปซึ่งนำไปสู่การจัดวางทิศทางของรูปผลึกในทิศทางที่สะดวกหรือเป็นทิศทางของเนื้อวัสดุดังภาพประกอบ 7 (ก) วัสดุรูปผลึกจะมีเนื้อซึ่งแสดงสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของผลึกเดี่ยว สมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง หรือ แอนไอโซทรอปี (Anisotropy) ซึ่งขึ้นกับทิศทางที่ทำการทดสอบ ประกอบด้วย โมดูลัสยืดหยุ่นความต้านแรงคราก ความต้านแรงดึง, ความยืด และสมบัติอื่น ๆ ภาพประกอบ 7 (ข) สมบัติเหล่านี้สามารถใช้ประโยชน์ได้ตามความมุ่งประสงค์พิเศษบางอย่างดังนั้น แผ่นเหล็กกล้าซิลิกอน 3Si-0.003C จึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ขอบของลูกบาศก์อยู่ในแนวทิศทางการรีด เพื่อให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด เพื่อ

ใช้สำหรับทำแกนของหม้อแปลง สิ่งที่สำคัญมากที่สุดในงานโลหะก็คือ ค่าความเครียดสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงระหว่างการเปลี่ยนรูป

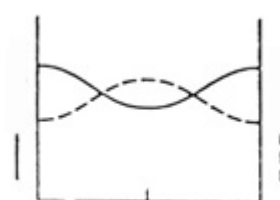
แอนไอโซทรอปีของการเปลี่ยนรูป (Anisotropy of Deformation)

จากหลักการปริมาตรคงตัว สามารถเขียนในพจน์ของความเครียดจริงได้คือ ผลรวมของความเครียดจริงหลักเท่ากับศูนย์

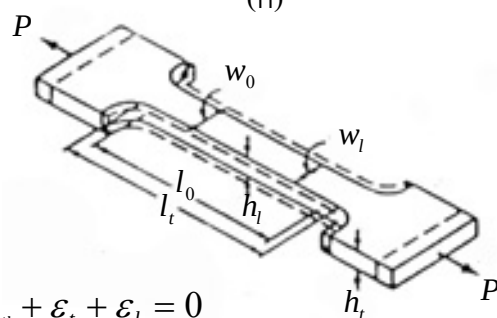
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (18)$$



(ก)



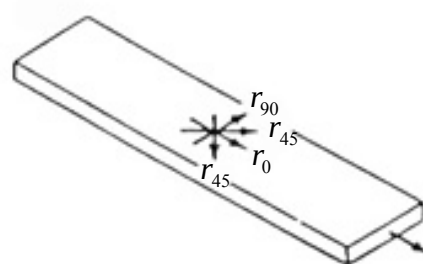
(ข)



$$\varepsilon_w + \varepsilon_t + \varepsilon_l = 0$$

$$\varepsilon_w = \ln \frac{w_1}{w_0}, \varepsilon_t = \frac{h_1}{h_0}, r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

(ค)



(ง)

Rolling direction

ภาพประกอบ 7 (ก) การพัฒนาเนื้อวัสดุ (ข) สะท้อนถึงการแปรผันสมบัติเชิงกล (ค) ผลของแอนไอโซทรอปีต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดสอบการดึง (ง) ทิศทางต่าง ๆ เทียบกับทิศทางการรีด

ในการทดสอบการดึง ความเครียดค่ามาก ε_t เป็นความเครียดดึง ส่วนความเครียดในแนวขวางคือ ε_2 และ ε_3 เป็นความเครียดกด ดังนั้น เพื่อความสะดวกจึงมักกล่าวถึงความเครียดแนวยาว ε_t ความเครียดแนวกว้าง ε_w และความเครียดแนวหนา ดังภาพประกอบ 7 (ค) เพราะฉะนั้น

$$\varepsilon_w + \varepsilon_t + \varepsilon_l = 0 \quad (19)$$

ความสัมพันธ์นี้ใช้ได้เสมอ แต่ ε_w และ ε_t ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน จากสัญลักษณ์ขนาดของความเครียดแนวขวางสัมพันธ์แสดงโดยค่า r ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเครียดแนวกว้างต่อความเครียดแนวหนา

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (20)$$

ชนิดของแอนไอโซทรอปี (Types of Anisotropy)

แอนไอโซทรอปีมีโอกาสดังขึ้นหลายอย่าง

1. เมื่อวัสดุเป็น ไอโซทรอปิก (isotropic) $\varepsilon_w = \varepsilon_t$ และ $r = 1$ โดยไม่จำเป็นว่าจะตัดขึ้นทดสอบในทิศทางการรีด หรือขวางทิศทางการรีด หรือทำมุมเอียงใด ๆ (ภาพประกอบ 7 ง) ในวัสดุแอนไอโซทรอปิก

$$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1 \quad (21)$$

2. สังเกตว่าค่า r แปรผันในทิศทางเทียบกับทิศทางการรีด

$$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90} \quad (22)$$

ซึ่งแสดงถึง แอนไอโซทรอปีระนาบ (Planar anisotropy) และทำให้เกิดปัญหา เช่น รอยดิ่ง (Earring) บนชิ้นงานลากขึ้นรูป (Deep drawing)

3. ถ้าค่า r วัดในระนาบของแผ่น และมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ทิศทาง แต่มีค่าไม่เท่ากับหนึ่ง

$$r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1 \quad (23)$$

เรียกว่า แอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก (Normal anisotropy) เพราะการเปลี่ยนรูปของ
ชั้นทดสอบในแนวความหนา (ตั้งฉากกับผิวแผ่น) มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าในทิศทางกว้าง

4. โดยปกติแล้ว แอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉากและในระนาบเกิดขึ้นพร้อมกัน

$$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90} \neq 1 \quad (24)$$

เพื่อแสดงความแตกต่างของแอนไอโซทรอปีทั้งสองชนิด จึงนิยามค่า r เฉลี่ยว่า r หรือ r_m

$$r_m = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{4} \quad (25)$$

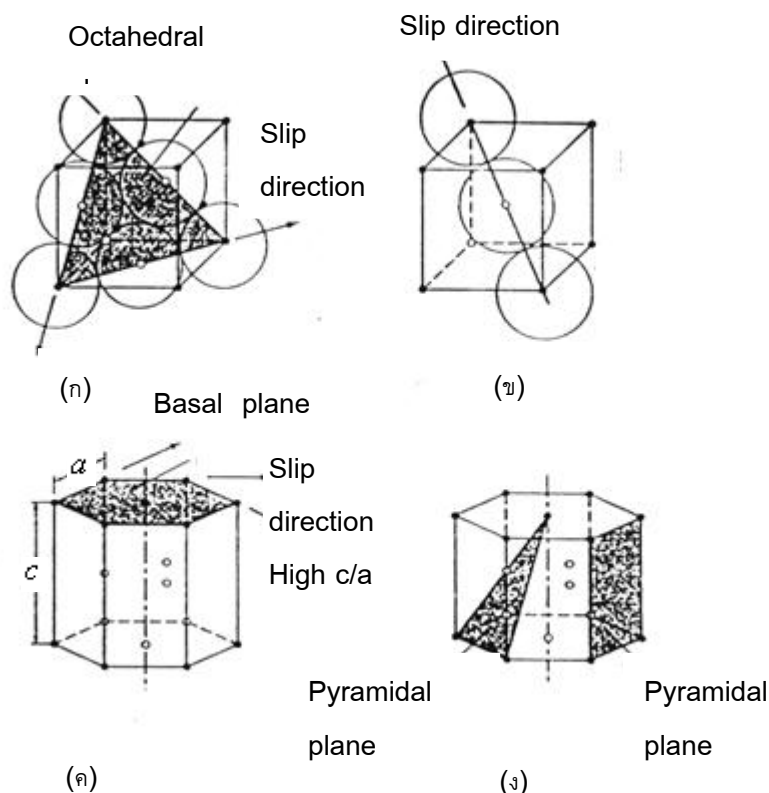
เป็นการวัดแอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก (มักใช้สัญลักษณ์ r แทน r หรือ r) การวัดแอนไอโซ
ทรอปีระนาบคือ Δr

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{2} \quad (26)$$

แอนไอโซทรอปีคของวัสดุแผ่น (Anisotropy of Sheet Materials)

การพัฒนาการเนื้อวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกอย่างมาก

1. ในวัสดุเฮกซาโกนัล (hexagonal hcp) เนื่องจากมีจำนวนระนาบสลิปจำกัด
จึงพัฒนาการเนื้อวัสดุหลังจากเปลี่ยนรูปเล็กน้อย (20-30%) ระนาบรากฐาน (Basal planes)
แทบทั้งหมดอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงรีด นั่นคือ ระนาบรากฐานเกือบทั้งหมดขนานกับ
ผิวแผ่น เมื่อชั้นทดสอบการดึงที่ตัดออก



ภาพประกอบ 8 ด้านแสดงทิศระนาบสลิป และทิศทางสลิป (ก) fcc (ข) bcc (ค) hcp ไปยึดออก การเปลี่ยนรูปจึงเป็นแอโนไอโซทรอปิกมาก

ก. วัสดุเฮกซาโกนัล (hcp) ที่มี อัตราส่วน c/a มาก การสไลด์จำกัดอยู่เฉพาะบนระนาบรากฐานเท่านั้นภาพประกอบ 8 (ค) ดังนั้น ความหนาของแผ่นจึงลดลง ในขณะที่ความกว้างไม่เปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบได้กับกองไฟที่ไฟบนบนสามารถเลื่อนได้บนไฟที่อยู่ด้านล่าง ค่า r น้อยมาก ตัวอย่างเช่น สังกะสีค่า $r = 0.2$

ข. การเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการดึงที่ตัดจากวัสดุ hcp ที่มี อัตราส่วน c/a น้อย แสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันมากมาย เนื่องจากการสลิปเกิดขึ้นบน Prismatic และหรือ Pyramidal planes ภาพประกอบ 8 (ง) ความหนาแผ่นไม่ลดลงแต่การเปลี่ยนรูปแทบทั้งหมดเกิดจากการจัดวางตัวใหม่ของ hexagonal prisms ทำให้ความกว้างของชิ้นทดสอบลดลง ค่า r ในทางทฤษฎีมีค่าอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติไม่เกิน 6 ซึ่งเป็นของไทเทเนียม

2. โลหะที่มีโครงสร้าง fcc มีระบบสลิปหลายระบบ ดังภาพประกอบ 8 (ก), ดังนั้นเมื่อมีการลดทอนมากกว่า 50% จึงมีพัฒนาการเนื้อขึ้น การจัดวางรูปผลึกแบบสุ่มของวัสดุ fcc เกือบเป็นไอโซทรอปิก ($r = 1$) อย่างไรก็ตาม หลังการเปลี่ยนรูป ค่า r อาจลดลง และอะลูมิเนียมเจือส่วนมากมีค่า r อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.8

3. ทิศทางการสลิปทั่วไปของวัสดุ bcc ภาพประกอบ 8 (ข) สามารถใช้ประโยชน์โดยกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้ค่า r อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 2

กระบวนการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น (Sheet deformation processes)

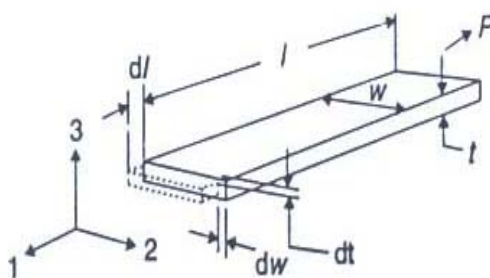
Z.Marciniak, (1991:14-33) กล่าวว่าถ้าจากสมบัติวัสดุเริ่มจากทำความเข้าใจความเหมาะสมสำหรับความเค้นความเครียด (Stress-strain) ในขณะที่ทดสอบการดึงทำให้เปลี่ยนรูปในขณะนั้นชี้ให้เห็นเส้นโค้งของความเค้นจริง-ความเครียดจริง (True stress-strain) ได้มาจากการทดลองเป็นอย่างไร และสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับกระบวนการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนรูปที่เป็นลักษณะโลหะแผ่นบาง

ลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของกระบวนการเปลี่ยนรูป คือ ความโค้งงอตั้งฉากกับพื้นผิวของแผ่นเล็กๆเปรียบเทียบกับความโค้งในระนาบของแผ่นบาง ถ้าเรากำหนดให้ความเค้นตั้งฉากมีค่าเท่ากับศูนย์ ความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดความเข้าใจง่าย ดังนั้นในลักษณะที่เราเรียกว่า (Plane stress) กระบวนการนี้ มีลักษณะทะลุความหนา หรือ ความโค้งเส้นตั้งตรงจากการเปลี่ยนแปลงรูปและทฤษฎีของจุดครากสำหรับกระบวนการนี้มีรายละเอียดกระบวนการนี้ มีลักษณะทะลุความหนา หรือ ความโค้งเส้นตั้งตรงฉาก

การทดสอบการดึงเป็นแนวทางกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น

การดึงแกนเดียว (Uniaxial tension)

ให้พิจารณาจุดเล็กๆในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่ละน้อยจนถึงจุดสูงสุดเราพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็กๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1,2,3



ภาพประกอบ 9 ชิ้นทดสอบการดึงแสดงทิศทางหลัก

การเพิ่มขึ้นของความเครียดหลัก (Principal strain increment)

ระหว่างการดึง ความยาวแนวแกน การเพิ่มขึ้นของความเครียด คือ

$$d\varepsilon_1 = \frac{dl}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (21)$$

ในลักษณะเดียวกัน ในการเพิ่มความยาวต่อความยาวเดิม

$$d\varepsilon_2 = \frac{dw}{w} \quad \text{และ} \quad d\varepsilon_3 = \frac{dt}{t} \quad (22)$$

เงื่อนไขปริมาตรคงที่ (Constant volume conditions)

ได้มีการกล่าวไว้ในกระบวนการเปลี่ยนรูปเกิดใช้ปริมาตรคงที่ความเครียดเพิ่มขึ้น ทำให้เปลี่ยนรูปร่าง แต่ไม่มีการเปลี่ยนปริมาตรความแตกต่างของปริมาตรมีค่าเป็นศูนย์

มาจาก

$$d(lwt) = d(l_0 w_0 t_0) = 0$$

หรือ

$$dl \times wt + dw \times lt + dt \times lw = 0$$

$$\frac{dl}{l} + \frac{dw}{w} + \frac{dt}{t} = 0$$

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad (23)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนรูปปริมาตรคงที่ คือ ผลรวมของความเครียดหลักมีค่าเท่ากับศูนย์

อัตราส่วนความเค้นความเครียด; สมบัติวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Stress and strain ratio; Isotropic material)

ถ้าจะวิเคราะห์เฉพาะวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic materials) เมื่อวัสดุสมบัติเหมือนกันทุกอย่างจะวัดได้ทุกทิศทาง เหมือนมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง

$$d\varepsilon_2 = d\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1 \quad (24)$$

เราอาจสรุปกระบวนการทดสอบสำหรับ Isotropic materials ในเทอม Strain increment และ Stress ที่เพิ่มขึ้น

$$d\varepsilon_1 = \frac{dl}{l}; \quad d\varepsilon_2 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1; \quad d\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1 \quad (25)$$

และ

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}; \quad \sigma_2 = 0; \quad \sigma_3 = 0$$

การบันทึกเงื่อนไขและขบวนการวิธีการทดสอบเพื่อใช้ประโยชน์

- การเพิ่มขึ้นของความเครียดแล้วไม่กลับไปที่เดิมเราเรียกว่า Monotonic
- ในระหว่างการทดสอบการดัดรูปแบบการเปลี่ยนรูปเริ่มจากจุดคราก (Yield) ถึงจุดสูงสุดของแรงดึงทำให้วัสดุเริ่มผิบบางและเกิดการคอด (Diffuse, necking) สัดส่วนของความเครียดหลักได้จากค่าคงที่ขึ้นตอนนี้เรียกว่า Proportional

- ยึดทิศทางหลักในวัสดุทิศทางหนึ่งตลอดความยาวของชิ้นทดสอบและการหมุนรอบเล็กๆหมุนของวัสดุสัมพันธ์กับทิศทางหลัก

สำหรับการเปลี่ยนรูปของวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic materials) แนวแกนความเครียด คือ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{w}{w_0} = -\frac{1}{2}\varepsilon_1; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -\frac{1}{2}\varepsilon_1 \quad (26)$$

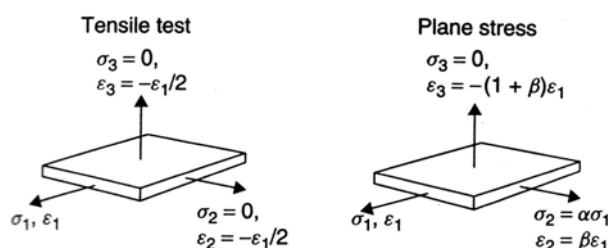
กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น; ระบายความเค้น (General Sheet Processes; Plan stress)

ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่า เป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็กๆที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิว

แท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วจะน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จากคำชี้แนะผ่านมาเราให้เป็นศูนย์ได้และให้เป็น Plane stress deformation

อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and strain ratios)

ในความหมายเฉพาะ ที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็กๆ Element ในแต่ละเทอมของอัตราส่วนความเครียด (Strain ratio, β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, α) สำหรับวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด



ภาพประกอบ 10 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด สำหรับการเปลี่ยนรูปที่จุดเล็กๆ

ในหลักทิศทางดั่งนั้นให้ $\sigma_1 > \sigma_2$ และทิศทางทั้งสามตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ $\sigma_3 = 0$ ลักษณะการเปลี่ยนรูปดั่งนี้

$$\begin{array}{lll} \epsilon_1; & \epsilon_2 = \beta\epsilon_1; & \epsilon_3 = -(1 + \beta)\epsilon_1 \\ \sigma_1; & \sigma_2 = \alpha\sigma_1; & \sigma_3 = 0 \end{array}$$

การครากตัวในระนาบความเค้น (Yielding in Plane Stress)

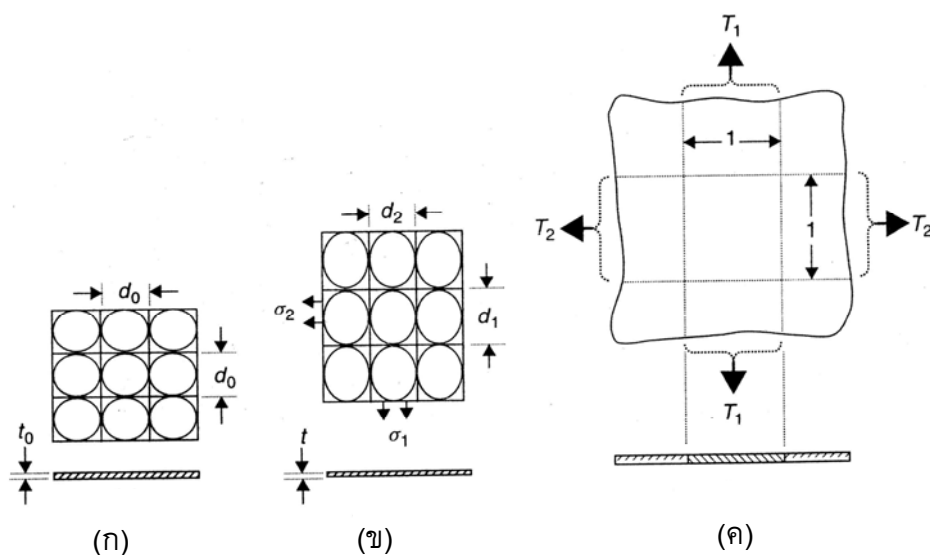
ในความต้องการความโค้งงอที่จุดคราก(Yield)ของวัสดุจุดเล็กๆภายใต้ระนาบความเค้น (Plane Stress) จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแผ่นบาง และ (Stress ratio α) ในความจริงการหาความแข็งแรงของแผ่นบางในเทอมของ $\sigma = 0$ ตัวอย่างนี้ใช้กับ Stress Strain เป็นที่แน่ชัด σ_f ขึ้นอยู่กับค่าเปลี่ยนรูปของแต่ละ Element ที่จะเปลี่ยนรูปในกระบวนการนี้สำหรับในขนาดนี้จะพิจารณาหากระบวนการสามารถทราบค่าของ σ_f เพื่อที่จะหาค่า α , σ_1 , σ_2 ที่จุด Yield plastic flow ที่กำลังเปลี่ยนแปลงทีละน้อยเราพิจารณาจากเงื่อนไขที่เพิ่มให้ทีละน้อยของค่าความเครียดเราสามารถขยายทฤษฎีสำหรับการเปลี่ยนรูปได้อย่างต่อเนื่อง

มีจำนวนตัวแปรในทฤษฎีสำหรับที่จะหาความเค้นภายใต้วัตถุเล็กๆที่จะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งแต่ละทฤษฎีมีสมมติฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุที่แตกต่างกัน ในครั้งนี้จะ

พิจารณาสองรูปแบบและใช้วิธี Plastic stress ในสมการที่ 2.6 หลายปีที่ผ่านมา มีหน่วยงานวิจัยที่มีการทดลองจุด Yield plastic ของวัสดุอย่างไรสำหรับการหา Isotropic Materials ซึ่งแต่ละโมเดลสามารถได้ความถูกต้อง

การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

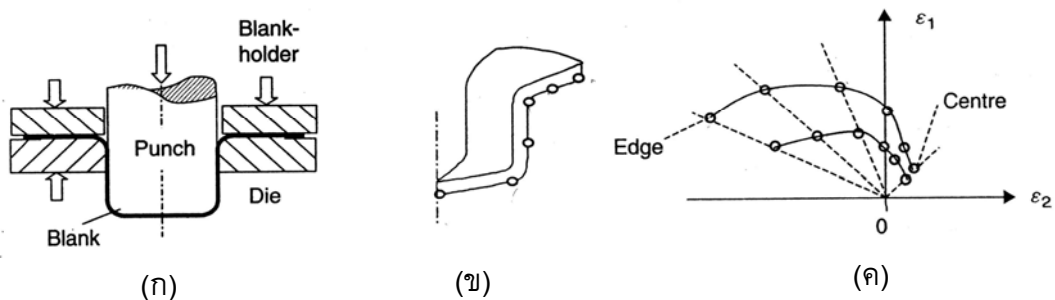
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูประนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work-hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน ภาพประกอบ 11 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 แสดงในภาพประกอบ 11 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางการหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพประกอบ 11 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังภาพประกอบ 11 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2



ภาพประกอบ 11 แสดงตารางวงกลมบนโลหะแผ่น (ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลมที่อยู่ตารางคงสภาพเดิม (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรอง คือ d_2 (ค) การดึง T , หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง

แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในภาพประกอบ 12 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมแบบภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 12 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก (ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก

ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (27.1)$$

อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (27.2)$$

ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการ 27.1 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta) \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (28)$$

จากสมการ 28 ความหนาโดยทั่วไปคือ

$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (29)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (30)$$

สรุปการเปลี่ยนรูปที่จุดต่าง ๆ (Summary of deformation at a point)

จากสมการที่ผ่านมาความเครียดหลักและอัตราส่วนความเครียดสามารถหาได้ในกระบวนการค่าความเครียดหลักได้ ดังนี้

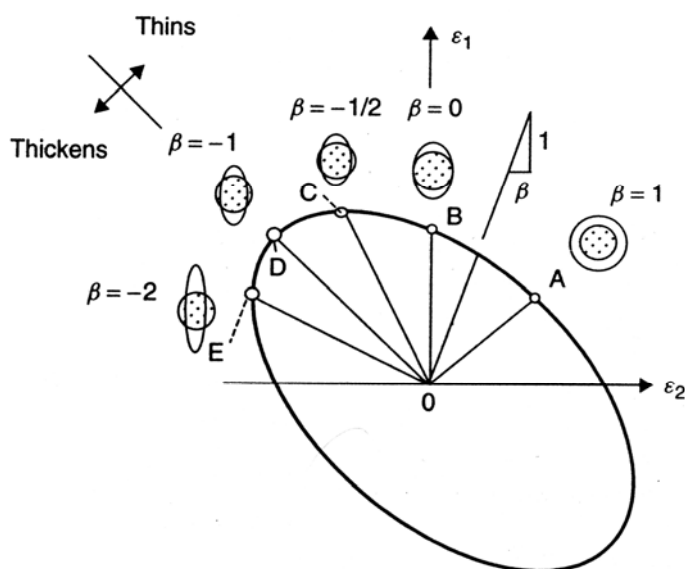
$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) = \beta\varepsilon_1 \quad \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = -(1 + \beta)\varepsilon_1$$

เมื่อ β คือ ค่าคงที่แต่ละจุดที่อยู่ในแผนภาพ ภาพประกอบ 15 ซึ่งให้เห็นถึงจุดสุดท้าย (Major strain) และ (Minor strain) การรวมจุดนี้ทำให้เกิดเป็นเส้น ภาพประกอบ 16 ในการทดสอบซึ่งให้เห็นลักษณะสำคัญของความแตกต่าง (Strain path) แผนภาพนี้ไม่ได้บอกถึงกระบวนการ แต่ใช้อธิบายถึงความแตกต่างของกระบวนการขึ้นรูป การแสดงวงรี คือ ขอบเขตผลกระทบจากความเครียด (Effective strain, $\bar{\varepsilon}$) แต่ละจุดของวงรีจะแสดงความเครียดเป็นจุด

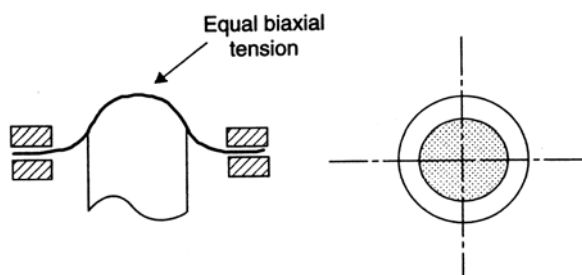
เล็ก ๆ ของวัสดุโดยสมมติฐาน (Work-hardening) จริง ๆ มีลักษณะเหมือนความเค้นไหล (Flaw stress)

ฐานนิยมการเปลี่ยนรูป (Mode of deformation)

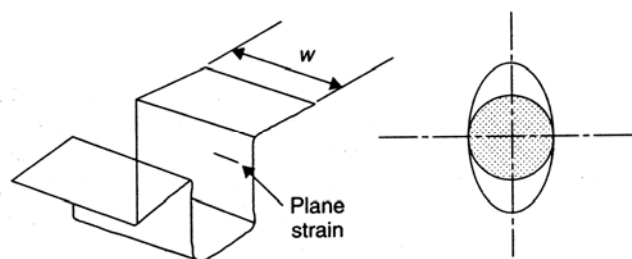
ถ้าให้เหมาะสมเรากำหนดให้ทิศทาง 1 เป็นทิศทางหลักจนไปถึงความเค้นหลักและความเครียดหลัก ดังนั้นทุกจุด ทางซ้ายของเส้นเอียง ที่อยู่ทางขวาของภาพประกอบ 13 ทางซ้ายของเส้น เป็นเส้นแนวความเครียด (Strain path)



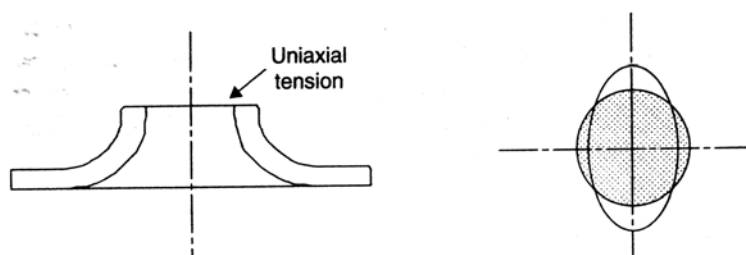
ภาพประกอบ 13 แผนภาพความเครียดที่แสดงถึงความแตกต่างของสัดส่วนความเครียดที่สอดคล้องกับการขึ้นรูป



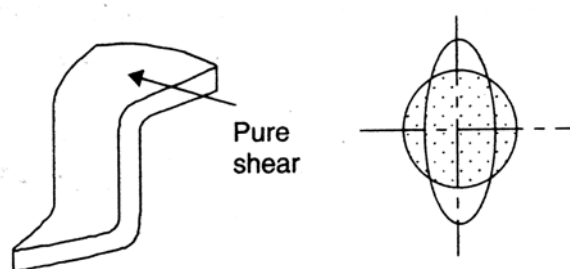
ภาพประกอบ 14 ลักษณะการดึงยืดแนวแกนคู่ (Equal biaxial stretching) เกิดจากการขึ้นรูปโดม



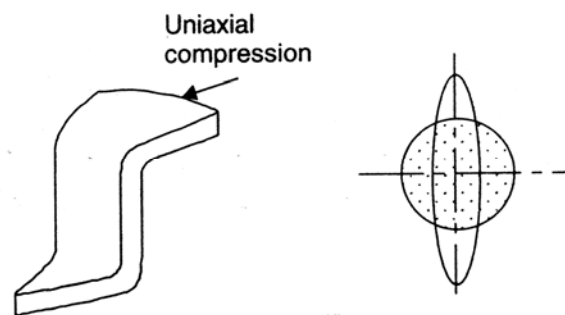
ภาพประกอบ 15 ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเครียด (Plane strain) เกิดขึ้นด้านข้างของชิ้นส่วนที่มีการขึ้นรูปแนวยาว



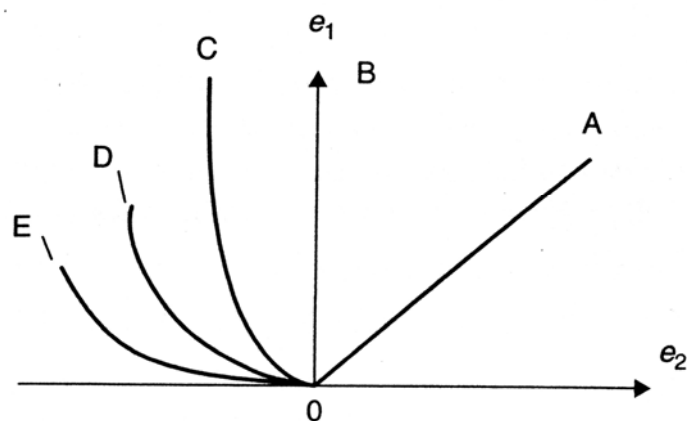
ภาพประกอบ 16 ลักษณะการขึ้นรูปแบบการดึงแนวแกนเดียว (Uniaxial tension) ของขอบชิ้นงานแบบ Extrude hole



ภาพประกอบ 17 ลักษณะของกริดวงกลมแสดงถึงความเค้นเฉือน (Pure shear) ที่ปีกขอบถ้วยที่เกิดจากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก



ภาพประกอบ 18 ลักษณะของกริดวงกลมบนขอบปีกถ้วย เกิดความเค้นอัดในแนวแกนเดียว (Uniaxial compression)



ภาพประกอบ 19 แผนภาพความเครียดแสดงถึงความแตกต่างของลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอัตราส่วนความเครียด (Strain ratio)

ตั้งที่ $\beta = 1$ ตามสภาวะความเครียด ในทิศทางที่เกิดการดึงและเกิดความเค้นดึงแรงจะเกิดขึ้นทุกทิศทางหรือ $\sigma_1 \geq 0$ สำหรับกรณีเกิดขึ้นที่ปลายสุดที่ $\sigma_1 = 0$ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.14 ดังนั้น $\alpha = -\infty$ และ $\beta = -2$ เพราะฉะนั้น ความเป็นไปได้ของเส้นแนวความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่างเส้น OA และ OE และช่วงสัดส่วนความเครียดจะอยู่ในช่วง $-2 \leq \beta \leq 1$

การดึงยืดแนวแกนคู่เท่ากัน (Equal biaxial stretching), $\beta = 1$

แนวทาสัน $OA=0$ ชี้ให้เห็นถึงการดึงสองแนวแกนเท่ากัน ลักษณะการเปลี่ยนรูปจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของส่วนบนรูปโดม แสดงดังภาพประกอบ 17 การเกิดความเครียดจะเท่ากันทุกทิศทางและขนาดของกริดวงกลมจะขยายตัวเท่ากันแต่วงกลมที่เหลืตามที $\beta = 1$ ความเครียดหนา (Thicker strain) คือ $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$ ดังนั้นความหนาลดลงและ ε_1 น้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปอื่นๆ ผลของความเครียดที่เกิดขึ้นคือ $\varepsilon = 2\varepsilon_1$ และการที่ทำให้โลหะแผ่นแข็งตัวเร็วขึ้นอยู่กับ ε_1

ระนาบความเครียด (Plan strain), $\beta = 0$

ในกระบวนการนี้แสดงดังตัวอย่างโดยสัน OB ในภาพประกอบ 13 การยืดของโลหะแผ่นเกิดขึ้นทิศทางเดียวและวงกลมกลายเป็นวงรีในแนวแกนรอง (Minor strain) ไม่เกิดการยืดในชั้นส่วนที่แรงแนวยาวจะสังเกตสภาวะ ระนาบความเครียด (Plane strain) ที่ด้านข้างของชั้นส่วนรูปแนวยาว

การดึงแกนเดียว (Uniaxial tension), $\beta = 1/2$

ตามทีจุด c ในภาพประกอบ 13 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในการทดสอบการดึงและเกิดขึ้นในโลหะแผ่นเมื่อค่าความเค้นรอง (Minor stress) เป็นศูนย์เมื่อ $\sigma_2 = 0$ การยืดของโลหะแผ่นเกิดขึ้นหนึ่งทิศทางและทิศทางอื่นเกิดการย่น ลักษณะกระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อไรก็ตามขอบด้านนอกเกิดการยืดตัวอย่างอิสระแสดงให้เห็นดังกระบวนการ Hole extrusion ในภาพประกอบ 16

ความหนาคงที่ (Constant thickness or drawing), $\beta = -1$

ในกระบวนการนี้ แสดงทีจุด D ในแต่ละทิศทาง การเกิดความเค้นและความเครียดขึ้นเท่ากันแต่ตรงข้ามกัน และการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นทีความหนาทั้งนอก ลักษณะนี้เรียกว่า การดรอว์อิง (Drawing) ทีสังเกตได้ เมื่อการดรอว์โลหะแผ่นบริเวณขอบด้านนอกเข้ามาอยู่ในแนวเดียวกันลักษณะเดียวกันเรียกว่า Pure shear และเกิดขึ้นบริเวณปีกของถ้วยเกิดจากการขึ้นรูปถ้วย แสดงภาพประกอบ 18 จากสมการ 3.3 (b) ความเครียดมีค่าเท่ากับศูนย์ ผลของความเครียด $\varepsilon = 2/3 \varepsilon_1 = 1.55 \varepsilon_1$

การกดแกนเดียว (Uniaxial compression), $\beta = -2$

กระบวนการนี้ชี้ให้เห็นจุด E เกิดขึ้นจุดสุดท้ายและเกิดขึ้นเมื่อความเค้นหลัก σ_1 เท่ากับศูนย์ ในตำแหน่งของด้านขอบด้านนอกการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (Deep draw) แสดงภาพประกอบ 18 ค่าความเค้นรอง คือ การกด $\sigma_2 = \sigma_f$ และมีผลทำให้ความเครียด (strain) คือ $\varepsilon = -\varepsilon_2$ และความเค้น (stress) คือ $\sigma = -\sigma_2$ ในกระบวนการลักษณะเช่นนี้มีความเป็นไปได้ทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้นและเกิดการย่น

ความบางและความหนา (Thinning and Thickening)

การพล็อตค่าความเครียดในไดอะแกรมประเภทนี้ ภาพประกอบ 13 มีประโยชน์เป็นอย่างมากใช้ประเมินการขึ้นรูปของโลหะแผ่นตำแหน่งของจุดต่างๆในแผนภาพจะชี้ให้เห็น

ความหนาเปลี่ยนไปอย่างไร ถ้าจุดทางด้านขวาของเส้นดรอว์อิง์ไลท์ (Drawing line) ที่ $\beta < -1$ โลหะแผ่นเปลี่ยนรูปมีความหนาเพิ่มขึ้น

แผนภาพความเครียดวิศวกรรม (Engineering strain diagram)

ในอุตสาหกรรมโลหะแผ่นเป็นที่รู้กันว่าการลงจุดค่าในแผนภาพจะลงจุดในเทอมของความเครียดวิศวกรรม (Engineering strain) ในภาพประกอบ 19 เส้นแนวความเครียด (Strain paths) ได้จากการลงจุดค่าความเครียดวิศวกรรม (Engineering strain) จะเห็นได้หลายเส้นที่พล็อตตามสัดส่วนแล้วไม่เป็นเส้นตรง

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เดช พุทธเจริญทอง (การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) กล่าวไว้ว่า ในการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน ซึ่งนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากสะดวกและรวดเร็วในการหาผลเฉลยของปัญหาดังกล่าววิธีนี้จะใช้วิธีการแบ่งรูปทรงชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อยๆ ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป กรรมวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์หาค่าของสมการ ที่ละเอลิเมนต์ แล้วนำมารวมกันเป็นโครงสร้างของระบบทั้งหมด แล้วจึงหาผลเฉลยของทั้งระบบต่อไป

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ แบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อยๆ เลือกฟังก์ชันการกระจัดมาแทนรูปร่างของเอลิเมนต์ กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความเค้นต่อความเครียด , รวมสมการทั้งระบบ , กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและคำนวณหาค่าต่าง ๆ จากสมการรวมของทั้งระบบ

ชนิดของเอลิเมนต์และการแบ่งเอลิเมนต์

ชนิดของเอลิเมนต์

ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อย ๆ จะพิจารณาจากรูปทรงของชิ้นงานเป็นหลักเอลิเมนต์ที่แบ่งควรจะเหมาะสมกับรูปทรงในแต่ละบริเวณซึ่งอาจแตกต่างกันออกไป เช่น ส่วนเว้า , ส่วนโค้ง , ส่วนที่มีรูเจาะ เป็นต้นชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทตามมิติของปัญหา คือ เอลิเมนต์มิติเดียว , เอลิเมนต์สองมิติ และเอลิเมนต์สามมิติ ดังนี้

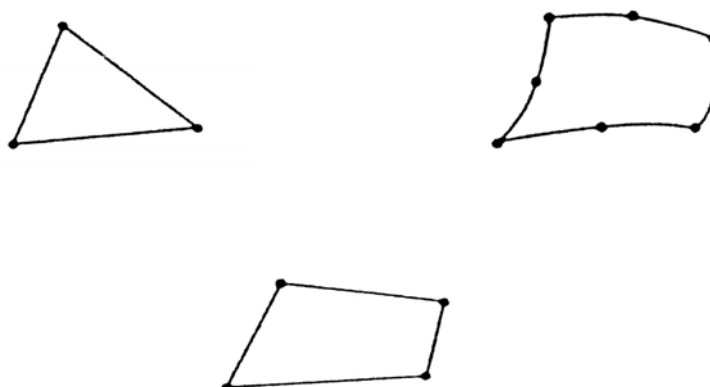
1. เอลิเมนต์มิติเดียวเอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้ในปัญหามิติเดียว ภาพประกอบ 20 เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิดหรือการโก่งของคาน เป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อภายนอกหรืออาจมีจุดต่อภายในร่วมก็ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลมีผลแม่นยำมากขึ้น



ภาพประกอบ 20 เอลิเมนต์มิติเดียว

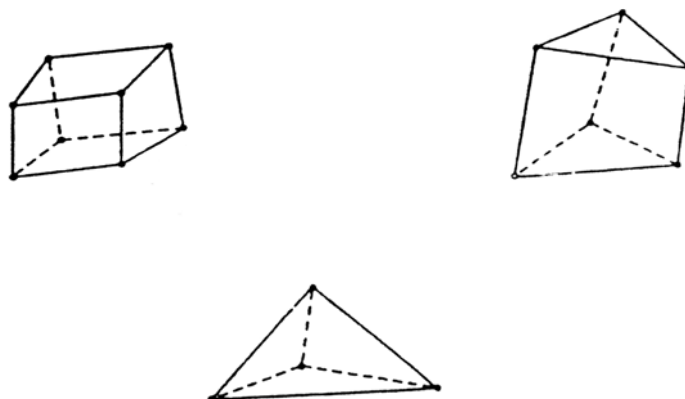
2. เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับปัญหาในระบบสองมิติ และนิยมใช้สำหรับปัญหาความเค้นระนาบหรือความเครียดระนาบ เอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงและประกอบด้วยจุดต่อภายในหรืออาจมีจุดต่อภายนอกอีกด้วย ภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 เอลิเมนต์สองมิติ

3. เอลิเมนต์สามมิติ เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับปัญหาสามมิติทั่วไปที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแนวแกน ซึ่งรูปทรงของเอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม รูปกรวยสามเหลี่ยม หรือปริซึม ภาพประกอบ 22 เป็นต้น



ภาพประกอบ 22 เอลิเมนต์สามมิติ

การแบ่งเอลิเมนต์

การแบ่งเอลิเมนต์ซึ่งประกอบด้วยเอลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อหากแบ่งเอลิเมนต์ให้เหมาะสมแล้วจะประหยัดเวลาในการประมวลผลเพื่อหาผลเฉลยได้อย่างมาก โดยทั่วไปจะมีหลักในการแบ่งเอลิเมนต์ดังนี้

1. ไม่ควรใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างไม่สมมาตรหรือรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมุมป้านมากหรือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวมาก ๆ เป็นต้น
2. เลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวเข้าใกล้ 1 มากที่สุด
3. ใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กที่บริเวณจุดวิกฤตหรือจุดที่มีการเปลี่ยนรูปทรงมาก และใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ในบริเวณที่ไม่ใช่จุดวิกฤตหรือจุดที่ไกลออกไป

ฟังก์ชันการกระจัด

การทำนายการเปลี่ยนแปลง หรือการประมาณของแต่ละจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบรวมจะใช้ฟังก์ชันการกระจัดซึ่งเป็นฟังก์ชันที่สมมุติขึ้นมาแทนการกระจัดเหล่านั้น การกำหนดฟังก์ชันการกระจัดที่เหมาะสมจะทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำ โดยทั่วไปฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้คือฟังก์ชันพอลิโนเมียล ความแตกต่างกันในเทอมสัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียลของฟังก์ชันขึ้นอยู่กับรูปร่างและมิติของปัญหา สำหรับปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียล คือ

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n+1}x^n \quad (31)$$

เมื่อ $a_1 - a_{n+1}$ คือ สัมประสิทธิ์พอลิโนเมียล
 u คือ การกระจัดในทิศทาง x

สำหรับปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันพอลิโนเมียลคือ

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \dots + a_ny^n \\ v(x, y) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}x^2 + a_{m+5}xy + a_{m+6}y^2 \dots + a_{2m}y^n \end{aligned} \quad (32)$$

เมื่อ u และ v คือ การกระจัดในทิศทาง x และ y

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i$$

สำหรับปัญหาสามมิติ ฟังก์ชันพอลิโนเมียล คือ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xz + \dots + a_mz^n \\ v(x, y, z) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\ w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \end{aligned} \quad (33)$$

เมื่อ u, v และ w คือ การกระจัดในทิศทาง x, y และ z

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i)$$

ฟังก์ชันรูปร่าง

เนื่องจากประเด็นปัญหาของงานแม่พิมพ์สแตมปิ้งเป็นปัญหาความเค้นระนาบ แผ่นชิ้นงาน (Blank) จะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมแบบไอโซพาราเมตริกซ์ (Isoparametric Element) ประกอบไปด้วยสี่จุดต่อซึ่งเป็นชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้

เมื่อพิจารณาจุดต่อที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยนับทวนเข็มนาฬิกา จุดต่อหรือโหนดต่าง ๆ จะเคลื่อนที่ตามแนวแกนทั้งสามคือแกน x, y และ z ถ้ากำหนดให้ เมทริกซ์ $\{\phi\}$ เป็นเมทริกซ์การกระจัดที่จุดต่อในเทอมฟังก์ชันรวม $\{u, v, w\}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\{\phi\} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (34)$$

ฟังก์ชันการกระจายสำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไอโซพารามेटริกซ์สามารถเลือกแบบการกระจายเชิงเส้นที่มี 12 ระดับความเสรี ในระนาบ u, v และ z ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v(x, y, z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w(x, y, z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \end{aligned} \quad (35)$$

เมื่อ u, v และ z คือ การกระจายในทิศทาง x, y และ z ของพิกัดรวม
 $a_1 - a_{12}$ คือ สัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียล

เมื่อเอลิเมนต์ได้รับแรงกระทำจนเกิดการกระจายเกิดขึ้นภายในเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) โดยฟังก์ชันรูปร่างจะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของเอลิเมนต์เพื่อที่จะหาฟังก์ชันรูปร่างจะใช้ระนาบพิกัดธรรมชาติเป็นตัวกำหนดพิกัดหรือจุดต่อ ดังนั้นพิกัดจุดต่อที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีการกระจายในแนวแกน x, y และ z ซึ่งสามารถแปลงสู่พิกัดธรรมชาติ ξ_1, ξ_2 และ ξ_3 และสามารถเขียนในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4} [(1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)x_1 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)x_2 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)x_3 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)x_4] \\ v &= \frac{1}{4} [(1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)y_1 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)y_2 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)y_3 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)y_4] \\ w &= \frac{1}{4} [(1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)z_1 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)z_2 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)z_3 + (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3)z_4] \end{aligned} \quad (36)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดให้ ξ_3 มีค่าเท่ากับ 1 และกำหนดให้

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4} (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3) \\ N_2 &= \frac{1}{4} (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3) \\ N_3 &= \frac{1}{4} (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3) \\ N_4 &= \frac{1}{4} (1 - \xi_1)(1 - \xi_2)(\xi_3) \end{aligned} \quad (37)$$

สมการที่ N_1, N_2, N_3 และ N_4 คือ ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์ และสามารถแทนสมการ (37) ลงในสมการที่ (36) เพื่อจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \\ v(x, y, z) &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \\ w(x, y, z) &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 + N_4 z_4 \end{aligned} \quad (38)$$

ซึ่งสามารถนำมาเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{Bmatrix} \quad (39)$$

จากสมการที่ (39) สามารถเขียนการกระจัดรวมในรูปเมทริกซ์อย่างย่อได้ดังนี้

$$\{\phi\} = [N]\{d\} \quad (40)$$

เมื่อ $\{\phi\}$ คือ ฟังก์ชันการกระจัดในเทอมพิกัดรวม
 $[N]$ คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่าง
 $\{d\}$ คือ เมทริกซ์การกระจัดของจุดต่อในเทอมพิกัดรวม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด

การวิเคราะห์ปัญหาที่อยู่ใต้สภาวะแรงกระทำในสามมิตินั้น จากการกระทำดังกล่าวทำให้เกิดความเครียดเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดสามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างย่อได้ดังนี้

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (41)$$

เมื่อ $[B]$ คือ เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัดที่จุดต่อ
 $\{\varepsilon\}$ คือ เมทริกซ์ที่แสดงความเครียดที่เกิดขึ้น

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (42)$$

ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดในปัญหา 3 มิติ ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (43)$$

กำหนดให้ u, v และ w เป็นการกระจัดในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ดังนั้นสมการ
 จัดรูปได้ใหม่ ดังนี้

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial y} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & & & \\ \frac{\partial x}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & & & \\ \frac{\partial x}{\partial z} & & \frac{\partial}{\partial x} & & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (44)$$

จากสมการ (44) จำเป็นต้องหาเมทริกซ์ $[B]$ ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดที่จุดต่อ ในการหาเมทริกซ์ $[B]$ ในเทอมฟังก์ชันไอโซพารามิเตอร์ของพิกัดธรรมชาติ (ξ_1, ξ_2, ξ_3) แต่ความเครียด $\{\varepsilon\}$ หาได้จากอนุพันธ์ของการกระจัดเทียบกับพิกัด (x, y, z) ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนสมการความเครียดให้อยู่ในเทอมของพิกัดธรรมชาติด้วยการใช้กฎลูกโซ่ในการหาอนุพันธ์ดังนี้ $f = f[x(\xi_1, \xi_2, \xi_3), y(\xi_1, \xi_2, \xi_3), z(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \xi_1} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi_1} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi_1} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_2} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi_2} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi_2} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_3} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi_3} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi_3} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi_3} \end{aligned} \quad (45)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (46)$$

เมื่อ J คือ จาโคเบียนเมทริกซ์

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi_1} & \frac{\partial y}{\partial \xi_1} & \frac{\partial z}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi_2} & \frac{\partial y}{\partial \xi_2} & \frac{\partial z}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi_3} & \frac{\partial y}{\partial \xi_3} & \frac{\partial z}{\partial \xi_3} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (47)$$

กำหนดให้

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (48)$$

เพื่อลดรูปสมการที่ (46) ด้วยเมทริกซ์ผกผันของ J ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (49)$$

เนื่องจาก u, v และ w เป็นการกระจัดในทิศทาง x, y และ z ดังนั้นเมื่อ $f \equiv u$ พิจารณาการกระจัดในทิศทาง x สามารถจัดรูปสมการ (49) ใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (50)$$

ในทำนองเดียวกับการกระจัดในทิศทาง y และ z เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (51)$$

และ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (52)$$

เมื่อนำสมการที่ (50), (51) และ (52) คูณกับ J^{-1} สามารถเขียนเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ในรูปอนุพันธ์การกระจัดในเทอมพิกัดรวมเทียบกับพิกัดธรรมชาติต่อความเครียดได้ดังนี้

$$[A] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{21} & J_{22} & J_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{31} & J_{32} & J_{33} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{11} & J_{12} & J_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & 0 & 0 & 0 & J_{11} & J_{12} & J_{13} \end{bmatrix} \quad (53)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการ (37) โดยแทนลงในสมการ (47) จะได้

$$\begin{aligned}
 [N_1] &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(\xi_3 - \xi_2 \xi_3) \\ -(\xi_3 - \xi_1 \xi_3) \\ (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) \end{bmatrix} \\
 [N_2] &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (\xi_3 + \xi_2 \xi_3) \\ (\xi_3 + \xi_1 \xi_3) \\ (1 + \xi_1)(1 - \xi_2) \end{bmatrix} \\
 [N_3] &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (\xi_3 + \xi_2 \xi_3) \\ (\xi_3 + \xi_1 \xi_3) \\ (1 + \xi_1)(1 - \xi_2) \end{bmatrix} \\
 [N_4] &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(\xi_3 + \xi_2 \xi_3) \\ (\xi_3 - \xi_1 \xi_3) \\ (1 - \xi_1)(1 + \xi_2) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{54}$$

สามารถหาอนุพันธ์ของ u, v, w เทียบกับ ξ_1, ξ_2, ξ_3 คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_3} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_3} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{d\} = [G]\{d\} \tag{55}$$

สมการความเครียดในเทอมพิกัดธรรมชาติ ξ_1, ξ_2, ξ_3 และการกระจุกที่จุดต่อคือ

$$\{\varepsilon\} = [A][G]\{d\} \quad (56)$$

เมื่อกำหนดให้

$$[B] = [A][G] \quad (57)$$

เนื่องจาก $[A]$ เป็นเมทริกซ์ขนาด 6×9 , $[G]$ เป็นเมทริกซ์ขนาด 9×12 และเมื่อถูกคูณด้วย $\{d\}$ ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด 12×1 แล้ว ดังนั้น เมทริกซ์ของความเครียดจะมีขนาดเท่ากับ 6×1 นั่นคือ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ และ γ_{zx}

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

เมื่อเนื้อวัสดุได้รับแรงภายนอกมากระทำเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเกิดความเค้นและความเค้นเฉือนเกิดขึ้น $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ และความเครียดและความเครียดเฉือนเกิดขึ้น $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ เมื่อนำมาเขียนสมการสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (58)$$

หรือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (59)$$

เมื่อ $[D]$ คือเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = 2G \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{Bmatrix} \quad (60)$$

การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ความเค้นและความเครียดจึงอยู่ในรูปของความเค้นและความเครียดเบี่ยงเบน ดังนั้นสมการที่สามารถที่จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$d\varepsilon'_{ij} = d\varepsilon'^e_{ij} + d\varepsilon'^p_{ij} \quad (61)$$

เมื่อแทนค่า $d\varepsilon'^e_{ij}$ และ $d\varepsilon'^p_{ij}$ จะได้

$$d\varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2G} d\sigma'_{ij} + \sigma'_{ij} d\lambda \quad (62)$$

ในการหาส่วนประกอบความเครียดประสิทธิผลส่วนย่อยในช่วงของพลาสติกในรูปความเค้นประสิทธิผลและสัดส่วนของความเครียดกับความเค้น สามารถที่จะเขียนได้ดังนี้

$$d\varepsilon'^p = \frac{2}{3} \bar{\sigma} d\lambda \quad (63)$$

และสามารถเขียนสมการพลาสติกส่วนย่อยในรูปของเทนเซอร์ได้คือ

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (64)$$

หรือ

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3\sigma'_{kl} d\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} \quad (65)$$

เมื่อ σ'_{kl} เป็นความเค้นเบี่ยงเบนจากการแปลงพิกัดเฉพาะเป็นพิกัดรวม โดยที่ kl เป็น Free Suffixes และ ij เป็น Dummy Suffixes ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากและความเครียดพลาสติกในรูปของสมการส่วนย่อยคือ

$$Y' = \frac{dY}{d\varepsilon^p} \quad (66)$$

เมื่อ Y' เป็น อัตราการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก

เมื่อแทนค่าสมการที่ (63) และ (65) ลงในสมการที่ (66) จะได้

$$Y' \left(\frac{3}{2} \bar{\sigma} d\lambda \right) = \frac{3\sigma'_{kl} d\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} \quad (67)$$

$$\frac{4}{9} \bar{\sigma}^2 Y' d\lambda = \sigma'_{kl} d\sigma'_{kl}$$

จากสมการที่ (62) ความเค้นส่วนย่อยเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับ

$$d\sigma'_{kl} = 2G(d\varepsilon'_{kl} - \sigma'_{kl} d\lambda) \quad (68)$$

แทนค่าสมการ (68) ลงในสมการที่ (67) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{9}{4}\sigma^{-2}Y'd\lambda &= \sigma'_{kl}2G(d\varepsilon'_{kl}d\lambda) \\ &= 2G\left(\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}-\frac{2}{3}\sigma^{-2}d\lambda\right)\end{aligned}\quad (69)$$

หรือ

$$\left(\frac{2}{9}\sigma^{-2}Y'+\frac{2}{3}G\sigma^{-2}\right)d\lambda = G\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}\quad (70)$$

หรือ

$$d\lambda = \frac{\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}}{\frac{2}{3}\sigma^{-2}\left(1-\frac{Y'}{3G}\right)}\quad (71)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดให้

$$S = \frac{2}{3}\sigma^{-2}\left(1-\frac{Y'}{3G}\right)\quad (72)$$

นำสมการที่ (69) แทนในสมการที่ (62) จะได้

$$d\sigma'_{ij} = 2G\left(d\varepsilon'_{ij}-\frac{\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}}{S}\right)\quad (73)$$

ค่าความเค้นเบี่ยงเบน คือ

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \quad (74)$$

และค่าความเครียดเบี่ยงเบน คือ

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \quad (75)$$

แทนค่าสมการ (74) และ (75) ลงในสมการที่ (73) จะได้

$$d\sigma'_{ij} - \delta_{ij} d\sigma_m = 2G \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{\delta_{ij} \varepsilon_{kk}}{3} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (76)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$d\bar{\sigma}_{ij} - \delta_{ij} \left(\frac{E}{3(1-2\nu)} \right) d\varepsilon_{mm} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{\delta_{ij} \varepsilon_{kk}}{3} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (77)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจึงอยู่ในรูปสมการ

$$d\sigma_{ij} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) d\varepsilon_{mm} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (78)$$

เมื่อ $\sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl} = \sigma'_{kl} d\varepsilon_{kl}$ ดังนั้นสมการ (78) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[D^p] = \frac{2G}{3} \begin{bmatrix} \sigma'_{11}\sigma'_{11} & \sigma'_{11}\sigma'_{22} & \sigma'_{11}\sigma'_{33} & \sigma'_{11}\sigma'_{12} & \sigma'_{11}\sigma'_{23} & \sigma'_{11}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{22}\sigma'_{11} & \sigma'_{22}\sigma'_{22} & \sigma'_{22}\sigma'_{33} & \sigma'_{22}\sigma'_{12} & \sigma'_{22}\sigma'_{23} & \sigma'_{22}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{33}\sigma'_{11} & \sigma'_{33}\sigma'_{22} & \sigma'_{33}\sigma'_{33} & \sigma'_{33}\sigma'_{12} & \sigma'_{33}\sigma'_{23} & \sigma'_{33}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{12}\sigma'_{11} & \sigma'_{12}\sigma'_{22} & \sigma'_{12}\sigma'_{33} & \sigma'_{12}\sigma'_{12} & \sigma'_{12}\sigma'_{23} & \sigma'_{12}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{23}\sigma'_{11} & \sigma'_{23}\sigma'_{22} & \sigma'_{23}\sigma'_{33} & \sigma'_{23}\sigma'_{12} & \sigma'_{23}\sigma'_{23} & \sigma'_{23}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{13}\sigma'_{11} & \sigma'_{13}\sigma'_{22} & \sigma'_{13}\sigma'_{33} & \sigma'_{13}\sigma'_{12} & \sigma'_{13}\sigma'_{23} & \sigma'_{13}\sigma'_{13} \end{bmatrix} \quad (79)$$

ดังนั้น

$$[D] = [D^e] - [D^e] \quad (80)$$

เป็นเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสร้างได้หลายวิธีดังที่กล่าวมาแล้ว เช่นวิธีแปรผันวิธีโดยตรงและวิธีอื่น ๆ เป็นต้น ในปัญหาความเค้นระนาบของโลหะแผ่นบางจะใช้หลักของงานสมมุติสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะต้องสร้างฟังก์ชันขึ้นแล้วทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันและสทิงเฟนเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ สมการที่แทนแบบจำลองของวัสดุแบบแข็งเกร็งพลาสติกอธิบายว่าเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำที่พื้นผิว (S) และกำหนดให้แรงกระทำที่พื้นผิววัสดุเป็น F_i ดังนั้น แรงที่กระทำภายนอกบนพื้นผิววัสดุสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$F_i = \sigma_{ij} n_j \quad (81)$$

เมื่อ F_i คือ แรงภายนอก

σ_{ij} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น

n_j คือ ทิศทางที่แรงมากระทำกับวัสดุ

งานที่เกิดจากแรงภายนอก จะเริ่มเมื่อมีแรงมากระทำที่พื้นผิวของวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นหรือมีการกระจัดเกิดขึ้น ถ้าวัสดุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงภายนอกจะต้องเท่ากับแรงภายในซึ่งแรงต่อหน่วยเวลาที่กระทำบนพื้นผิวคือ

$$\int_S F_i w_j dS \quad (82)$$

เมื่อ w_j คือ ความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ

เมื่อนำสมการที่ (82) แทนลงในสมการที่ (81) จะได้

$$\int_s \sigma_{ij} n_j w_j dS \quad (83)$$

และเมื่อแปลงสมการเชิงพื้นผิว (dS) ให้เป็นสมการเชิงปริมาตร (dV) ทำให้สมการที่ (36) มีค่าเท่ากับ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV \quad (84)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำภายนอกย่อมเท่ากับพลังงานความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปภายในวัสดุ

$$U = W \quad (85)$$

เมื่อ U คือ พลังงานความเครียดภายใน

W คือ พลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก

เมื่อรวมพลังงานความเครียดภายในและพลังงานศักย์จากแรงภายนอกจากสมการที่ (84) ดังนั้น พลังงานศักย์รวม (Total Potential Energy) คือ

$$\pi = U + W \quad (86)$$

และเมื่อนำสมการที่ (82) และ (84) ไปแทนสมการที่ (86) จะได้พลังงานศักย์รวม คือ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (87)$$

เนื่องจาก $\frac{\partial w_j}{\partial x_j}$ เป็นความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุต่อแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการ
อัตรางานสมมุติในวิธีไฟในเอลิเมนต์ใหม่ คือ

$$\int_v \sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (88)$$

เมื่อแยกเทอมของความเค้นออกเป็นความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นไฮโดรสแตติกและ
ความเค้นเบี่ยงเบนดังสมการที่ (89)

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad (89)$$

ซึ่งสามารถเขียนขึ้นใหม่ได้ดังนี้

$$\int_v (\sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \dot{\varepsilon}_{ij} dV - \int_s F_i \dot{w}_j dS = 0 \quad (90)$$

เมื่อจัดรูปสมการเพื่อพิจารณาความเค้นเฉลี่ยและความเค้นเบี่ยงเบนจะได้

$$\int_v \sigma'_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_v \sigma_m \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV - \int_s F_i \delta \dot{w}_j dS = 0 \quad (91)$$

เมื่อกำหนดให้ความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับความเค้นประสิทธิผลซึ่งเป็นพฤติกรรม
ในช่วงพลาสติก $\sigma'_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \dot{\varepsilon}$ ดังนั้นสมการที่ (91) จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_v \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV + \int_v \sigma_m \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_s F_i \delta \dot{w}_j dS = 0 \quad (92)$$

เมื่อนำส่วนของการยืดหยุ่นออกจากสมการ โดยกำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain Rate) เท่ากับศูนย์ ($\dot{\epsilon}_v = 0$) ดังนั้น

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (93)$$

จากสมการที่ (93) ซึ่งจะเป็นสมการพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดให้ความเค้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับตัวคูณลาگرانเจียน λ (Lagrangian Multiplier) ทำให้สมการที่ (93) สามารถจัดรูปได้ใหม่ คือ

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (94)$$

สมการที่ (94) ซึ่งจะเป็นสมการพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อีกรูปหนึ่ง

สทไฟเนสเมทริกซ์

ในระบบโครงสร้างทั้งหมดของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยหลาย ๆ จุดต่อที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการกระจัดเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงมากระทำ ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งระบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องหาสทไฟเนสเมทริกซ์ของทั้งระบบทั้งหมดก่อน Kobayashi, S. และคณะ [11] ได้เสนอสมการพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ซึ่งจะเริ่มจากสมการของระบบอยู่ในรูป

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (95)$$

เมื่อ $\{f\}$ คือ เมทริกซ์แรงกระทำที่จุดต่อ

$[k]$ คือ สทไฟเนสเมทริกซ์

$\{d\}$ คือ เมทริกซ์ของการกระจัดที่จุดต่อ

ในการหาสทไฟเนสเมทริกซ์ของแบบจำลองวัสดุแข็งเกร็ง-พลาสติก เพื่อหาสทไฟเนสเมทริกซ์จึงกำหนดให้เทอมแรกของสมการที่ (94) มีค่าเท่ากับ

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV = \int_V \left(\frac{\bar{\sigma}_0}{\dot{\epsilon}} \right) \dot{\epsilon} \delta \dot{\epsilon} dV \quad (96)$$

กำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร $\dot{\epsilon}_V$ มีค่าเท่ากับ

$$\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z \quad (97)$$

หรือ

$$\dot{\epsilon}_V = C^T W \quad (98)$$

เมื่อ $C^T = \{1, 1, 1, 0\} \bar{B}$

W คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันการกระจัดต่อหน่วยเวลา

$\bar{B}$ คือ เมทริกซ์อัตราความเครียด

จากสมการความเครียดประสิทธิผล $\dot{\epsilon}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราความเครียดได้ ดังนี้

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \}^{\frac{1}{2}} \quad (99)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\left(\dot{\epsilon} \right)^2 = \dot{\epsilon}^T D \dot{\epsilon} \quad (100)$$

และเมื่อนำสมการอัตราความเครียด $(\dot{\epsilon}) = \bar{B} W$ แทนลงในสมการที่จะได้

$$\left(\dot{\epsilon} \right)^2 = W^T B^T D B W = W^T k W \quad (101)$$

เมื่อ $k = B^T D B$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (96),(98) และ (101) ลงในสมการที่ (94) จะได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

$$\frac{\partial \pi}{\partial W} = \int_V \frac{\sigma}{\epsilon} kW dV + \int_V \lambda C^T dV - \int_S NF dS = 0 \quad (102)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กำพล ไพโรจน์กิริติกุล¹ ได้ศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรในการขึ้นรูป คือ รัศมีตาย แรงกดแผ่นขึ้นงาน และใช้น้ำมันมะพร้าวหล่อลื่น ทำให้ลดแรงในการขึ้นรูปขึ้นงาน 8.85% ขึ้นงานที่เสียหาย บริเวณผนังถ้วย และบริเวณก้นถ้วย มีความหนาเพิ่มขึ้นไม่พบรอยย่นที่ปีกขึ้นงาน การเปลี่ยนแปลงรัศมีตายและลดแรงกดทำให้ลดความเสียหาย ในงานขึ้นรูปได้ และใช้วัสดุศึกษา A1100-0 ผ่านการ อบอ่อนความหนา 1.0 mm.

ณรงค์ พจน์จำเนียร³ ได้ศึกษาและทดลองการลากขึ้นรูป ถ้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 ในการทดลองโดยการให้อุณหภูมิกับขึ้นงานโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ตายและแผ่นกดขึ้นงานแล้วศึกษาถึงผลกระทบต่ออัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป,แรงที่ใช้ลากขึ้นรูป,ความหนาของผนังถ้วย และการเปรียบเทียบความสามารถในการลากขึ้นรูปที่ความหนา 0.5 mm. และ 1.0 mm. จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลดลง อุณหภูมิไม่มีผลต่อความหนา และการเปรียบเทียบที่ความหนาต่างกันไม่สามารถบอกได้ว่ามีผลต่ออัตราส่วนขีดจำกัดในการขึ้นรูปอย่างไร เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุแตกต่างกัน

พรชัย คงวัฒนาชัย⁹ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลองขึ้นรูปขึ้นงานจริง ลักษณะขึ้นงานเป็นแบบ Cover Fuel Filler วัสดุเป็นโลหะแผ่น SPCC หนา 0.8 mm. จากการศึกษาพบว่าผลการขึ้นรูปขึ้นงานจริงและผลการจำลองการวิเคราะห์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีผลใกล้เคียงกันสามารถยอมรับได้และใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการขึ้นรูปขึ้นงานจริงเพื่อลดเวลาและต้นทุนอื่นๆ

พนา แซ่มสวัสดิ์⁶ ได้ศึกษาการแก้ปัญหาการย่นในงานขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุโลหะแผ่น SUS 304 หนา 1.0 mm. รูปถ้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 80 mm. โดยวิธีการทดลอง ในการศึกษาทำให้ทราบว่าการกดขึ้นงาน (BHF) ต้องมีขนาดที่เหมาะสมไม่มากเกินไปและไม่น้อยเกินไปจึงจะทำให้ลดปัญหาการย่นที่เกิดขึ้นได้

วัชรพงษ์ ป้อมประภา⁷ ได้ศึกษาถึงมุมเอียงของผิวหน้าชุดกดขึ้นงานเพื่อที่ลดรอยย่นที่เกิดขึ้นขอบขึ้นงานในการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกในการศึกษาใช้วิธีการจำลองการขึ้นรูป ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ คุณสมบัติของวัสดุ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หนา 1.0 mm. ขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 80 mm. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์

เอลิเมนต์จะเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ พนา แซ่มสวัสดิ์ ทำให้ทราบว่าความเหมาะสมของมุมเอียงของแผ่นกดยึดชิ้นงาน ช่วยลดปัญหารอยร้าวที่เกิดขึ้นคือมุม $39^{\circ} 31.93'$

สามารถ แซ่มคำ⁸ ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการจำลองวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ในการขึ้นรูปภาดอลูมิเนียม AL1100 หนา 1.0 mm. โดยใช้โปรแกรมอ็อปทริสจากผลการทดลองทั้งสองแนวทาง ได้ผลใกล้เคียงกันมากมีความเห็นให้การจำลองผลแทนการทดลองขึ้นรูปจริง จึงทำให้เกิดผลดีทางธุรกิจและลดต้นทุนการผลิต

D.Banabic, E.Dannmann.¹⁴ ได้ศึกษาถึงตัวแปรเสริม(a)เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์การประเมินความเค้นหนึ่งแนวแกน(σ_u)ต่อเกณฑ์การประเมินความเค้นสองแนวแกน(σ_b)ใช้สร้างกราฟด้านขวาของ FLD แบบใหม่ โดยใช้หลักทฤษฎีการวิเคราะห์ Swift และ Maciniak-Kuczynski จากการศึกษพบว่าผลกระทบของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป FLC ด้านขวามีตำแหน่งสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปรเสริม(a) และจากทฤษฎีของ Swift และ ทฤษฎีของ Marciniak-Kuczynski จะได้เส้นขีดจำกัดความเครียดแตกต่างกัน

Fahrettin Ozturk Daeyong Lee¹¹ ได้ศึกษาเกณฑ์การประเมินความเสียหายของโลหะแผ่นบางเพื่อใช้ประเมินหาขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD) การหาขีดจำกัดความเครียด Aluminum killed drawing quality electrogalvanized steel (AKDQ) สำหรับ FLD หาได้จาก การแทนค่าความเค้นความเครียดในการจำลองการทดสอบเกณฑ์ความเสียหายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าการประเมินความเสียหายด้านซ้ายของ FLD มีความสอดคล้องแต่การประเมินความเสียหายด้านขวาของ FLD ไม่สอดคล้องกันจึงมีการปรับปรุงทดลองใหม่อีกครั้งโดยการจำลอง การทดสอบหาขีดจำกัดความเครียด ของ FLD โดยเปลี่ยนแปลงความหนา 20% ,25%,30%,40% และ 45% ของความหนาเดิมและนำผลของ FLC มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองอีกครั้งพบว่าทางซ้ายของ FLD สามารถนำไปใช้งานได้ แต่ด้านขวาของ FLD ไม่สามารถนำไปประมาณขึ้นรูปได้

Hao-bin Tian and Dachang Kang¹⁶ ได้ศึกษาถึงวิธีการทดสอบหาค่า strain hardening (n) และการหาค่า anisotropy (r) วิธีการแบบใหม่จากชิ้นทดสอบ (Specimen) มีลักษณะเป็นแบบลดขนาดความกว้างทีละช่วง (Multi step specimen) และชิ้นทดสอบที่ขนาดความกว้างลงเป็นแบบอัตราเรียว (Tapered specimen) ก่อนนำชิ้นทดสอบไปทดสอบแรงดึง (Tensile test) จะสร้างกริดวงกลม (Grid circle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 mm. และ 3.0 mm. บนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ก่อนทดสอบแรงดึงจนชิ้นทดสอบเสียหาย นำชิ้นทดสอบไปวัดหาขนาดการเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลมเปลี่ยนเป็นวงรี ซึ่งเกิดความเครียดเพื่อนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่า n และค่า r ผลที่ได้จากชิ้นทดสอบทั้งสองแบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในการทดสอบจริงจะใช้ชิ้นทดสอบที่เป็นแบบอัตราเรียว (tapered) เนื่องจากสะดวกในการเตรียมชิ้นทดสอบ

S.Tiratheararat¹⁵ ได้ศึกษาการสร้าง FLD สำหรับใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คุณสมบัติที่จำลองการขึ้นรูปเป็นโลหะแผ่น SPCC หนา 1.0 mm. และการสร้างเส้น FLC นั้น ใช้วิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยรูปโดมมีรัศมีโค้งตัดขอบต่างกันค่าความเครียดแตกต่างกันตามรัศมีโค้ง และศึกษาผลแรงทบของความเสียหาย ที่มีต่อความเครียดเพราะว่าการจำลองให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายน้อย ทำให้การกระจายความเครียดมากกว่าชิ้นงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมาก

S.Natarajan, et al.¹⁴ ได้ศึกษาหาความสำคัญของการใช้โลหะแผ่นขึ้นรูปความเข้าใจในกระบวนการขึ้นรูปและความหลากหลายของวัสดุ จะเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันที่ไม่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งในงานวิจัยจะศึกษาวิธีการลากขึ้นรูปด้วย (Deep drawing) ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยใช้การแสดงแบบตัวเลขในสถานะที่แตกต่างกัน จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการจำลองการขึ้นรูป โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์ส่วนต่าง ๆ ของโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Rigid plastic การหาการคืบตัวด้วยวิธีการลากขึ้นรูป จะมีผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่น (Blank Diameter) พื้นที่ผิวที่เกิดความเครียดจากในแนวรัศมี (Circumferential) แสดงผลการวัดจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีผลทำให้ความหนาของปีกขอบด้วย (flange) เปลี่ยนไป

Tung-Sheng Yang and Tze-Chi Hsu¹⁹ ได้ศึกษาถึงการวิเคราะห์ทดลองขึ้นรูปด้วยการ stretching และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นถึงปัญหาความไม่เชิงเส้นอธิบายได้โดยวิธีการเปลี่ยนรูปทรง, คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขตรงแต่ละช่วงเวลา การหาขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยทฤษฎีของ S.S. Hecker จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเครียดแข็ง Strain hardening Exponent (n) มีค่ามาก ค่า Anisotropy (r) มีค่าน้อยและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำจะเป็นผลทำให้รูปแบบการกระจายความเครียด มีค่าลดลงได้ ทำให้รูปโดมได้สูงขึ้น

สรุป การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องภายในประเทศ ทราบวิธีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น SUS 304, SUS 430, SPCC และ AL1100 เพื่อศึกษาถึงแรงดึงสูงสุดในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ช่วยลดความเสียหาย แรงที่ใช้เอาชนะความเสียหายที่แผ่นชิ้นงานและแม่พิมพ์ และมุมเอียงของแผ่นกดขึ้นงานขณะขึ้นรูป การศึกษางานวิจัยต่างประเทศ ศึกษาถึงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ตามทฤษฎีและเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้นำวัสดุโลหะแผ่น Spcc, Austenitic Stainless steel (sus304) และ Aluminum (AL1100) ผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในทิศทางเดียวกัน จากการศึกษาวิจัยในประเทศและต่างประเทศจึงเป็นแนวทางการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งจะศึกษาถึงผลกระทบขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา โดยการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหการขึ้นรูปอย่างล้าชวณะ และเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยหาขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมครั้งนี้ได้ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เพื่อเป็นข้อมูลให้กับโปรแกรมการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆได้ดำเนินการวิจัยดังนี้

1. เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย
2. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

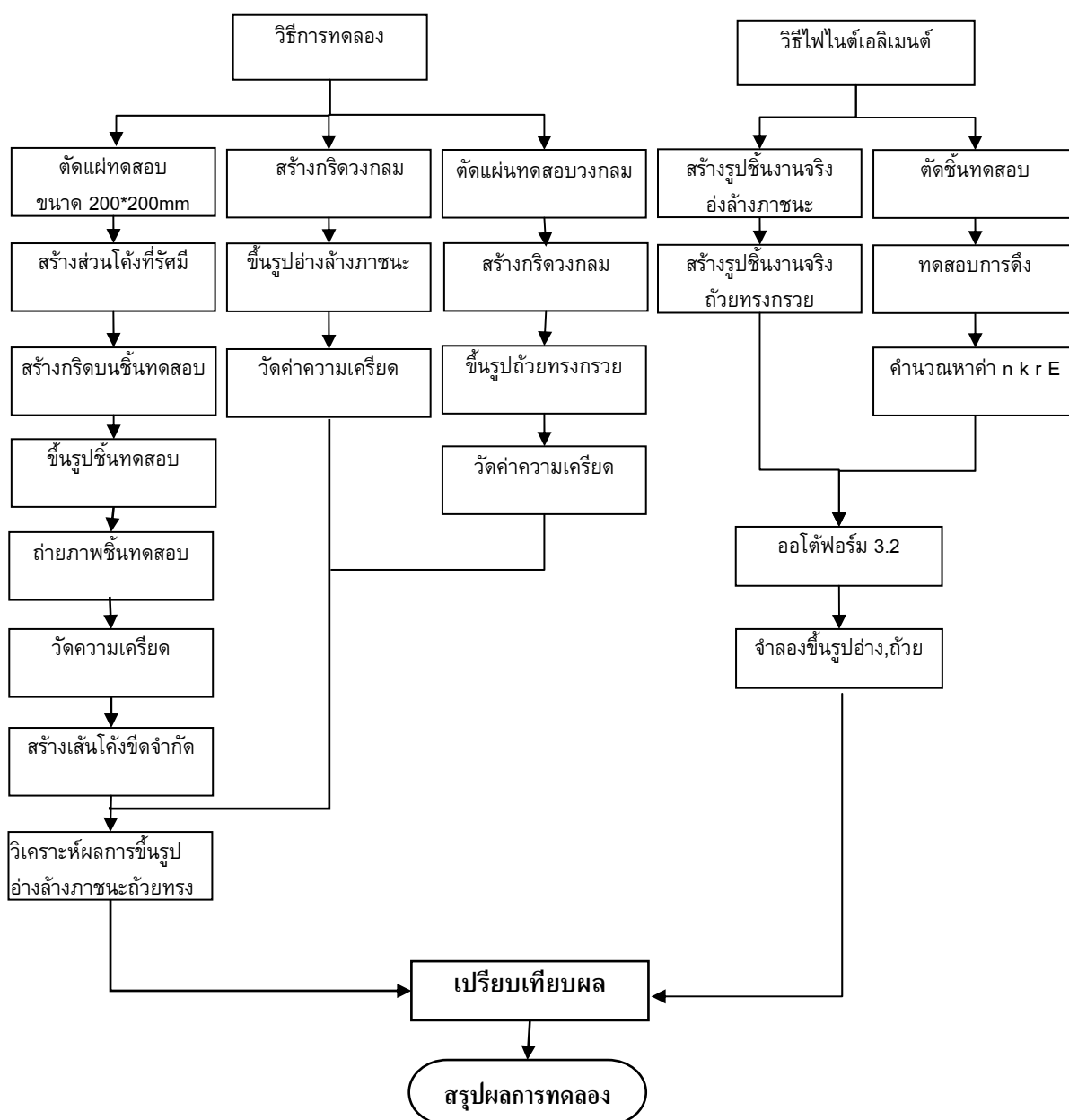
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย

- | | |
|--|-----------|
| 1. เครื่องเพรสขึ้นรูปขนาด 80 ตัน | 1 เครื่อง |
| 2. แม่พิมพ์ขึ้นรูปโดม,ขึ้นรูปถ้วย(Conical cup) | 1 ชุด |
| 3. แม่พิมพ์ตัดชิ้นทดสอบ | 1 ชุด |
| 4. เครื่องทดสอบแรงดึง(Universal testing machine, Dynamic type) | 1 ชุด |
| 5. เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบ(Extensometer) | 1 ชุด |
| 6. อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด | 1 ชุด |
| 6.1 อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Lectroetch power unit) | 1 เครื่อง |
| 6.2 ลูกกลิ้งรีด (Lectroetch roller marker) | 1 อัน |
| 6.3 น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ สูตร LNC-2 Electrolyte | 1 ขวด |
| 6.4 น้ำยาล้างทำความสะอาดชิ้นงานสูตร 1 | 1 ขวด |
| 6.5 ผ้าสักหลาดชุบน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ | 1 แผ่น |
| 6.6 แผ่นกริดวงกลม (Stencils) | 1 แผ่น |
| 7. อุปกรณ์วัดแรงกดขณะขึ้นรูปถ้วย(Load cell) | 1 ชุด |
| 8. อุปกรณ์ส่งแรงดัน(voltage) และรับสัญญาณ(Dater rocker) | 1 ชุด |
| 9. คอมพิวเตอร์และปริ้นเตอร์ | 1 ชุด |
| 10. โปรแกรมวิเคราะห์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ Atoform V.3.26 | 1 โปรแกรม |
| 11. โปรแกรมช่วยในการออกแบบ UG NX.3 | 1 โปรแกรม |
| 12. เครื่องกัดสามแนวแกน สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบ | 1 เครื่อง |
| 13. โปรแกรมวัดขนาดกริดจากชิ้นทดสอบ(Dcal) | 1 โปรแกรม |
| 14. กล้องถ่ายภาพไมโครสโคป | 1 ชุด |
| 15. สารหล่อลื่น น้ำมัน Renoform MZA 30T, Polyetelenc | 1 ชุด |
| 16. พลาสติกเสตรนเกจล์ (Plastic Strain gage) วัดความเครียด | 1 ชุด |

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกดำเนินการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะถ้วยทรงกรวย ส่วนที่สองเป็นจำลองการขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลทั้งสองส่วนนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งมีแนวทางการดำเนินการดังนี้

การดำเนินการวิจัย



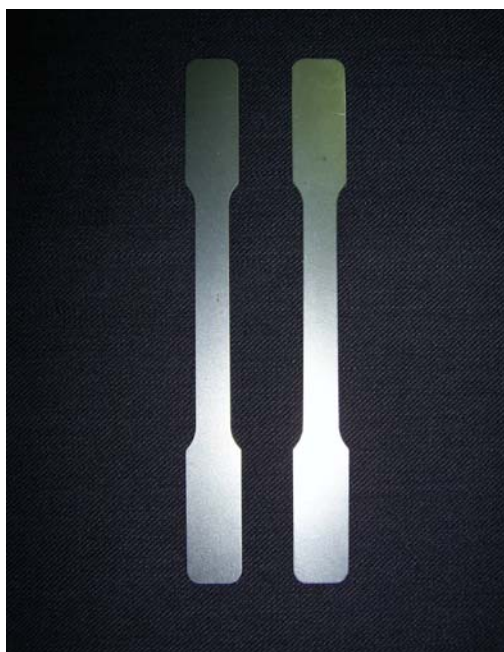
ภาพประกอบ 23 แผนภาพการดำเนินการวิจัยขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา

จากแผนภาพการดำเนินการวิจัยทั้งสองส่วนสามารถแสดงรายละเอียดดังมีขั้นตอนดังนี้

1.ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร, r (Anisotropy) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์เกรด SUS 304 TNX S 189 ตามวิธีการของ ASTM E517 vol.01.03.(1993)

1.1 นำเหล็กกล้าไร้สนิม ความหนา 0.4 mm. 0.58 mm. 0.78 mm.มาทำการทดสอบ หาค่า r (Anisotropy) ตัดชิ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling direction) จากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

1.2 วัดความกว้าง (W_o) และความหนา (T_o) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีด บันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage length)



ภาพประกอบ 24 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

1.3 นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนาเสร็จแล้วมาทดสอบการดึงตามแนวแกน

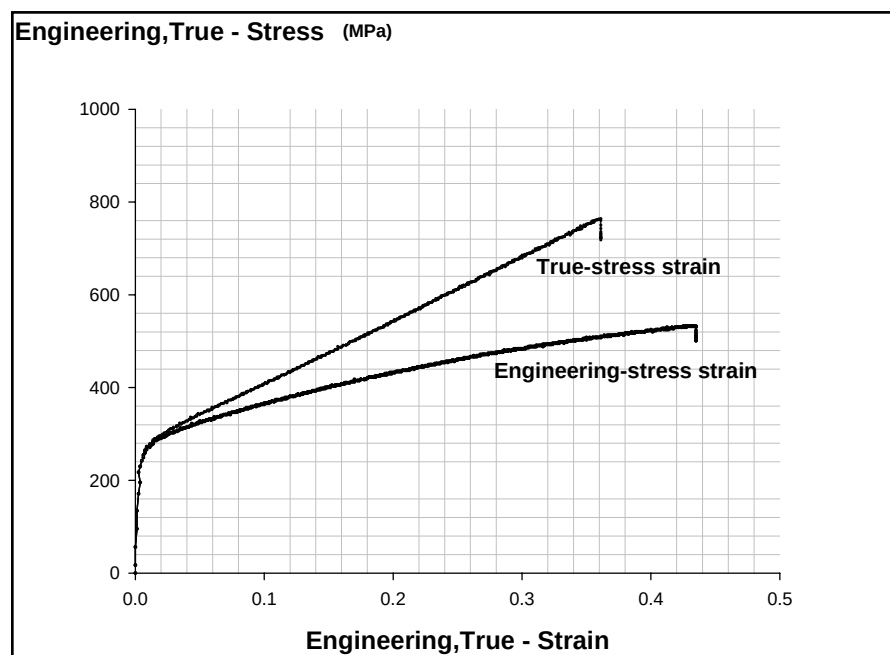
1.4 วัดความกว้าง (W_x) และความหนา (T_x) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้ว อุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

2.4 คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering strain, ε) เท่ากับระยะที่เปลี่ยนแปลงต่อความยืด

2.5 คำนวณหาความเค้นจริง (True stress) = $S \times (1 + \varepsilon)$

2.6 คำนวณหาความเครียดจริง (True strain) = $\ln(1 + \varepsilon)$

2.7 คำนวณหา y หรือ Log true stress



ภาพประกอบ 27 แผนภาพการลงจุดความเค้นจริงความเครียดจริง ความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดทางวิศวกรรม

2.8 คำนวณหา x หรือ Log true strain

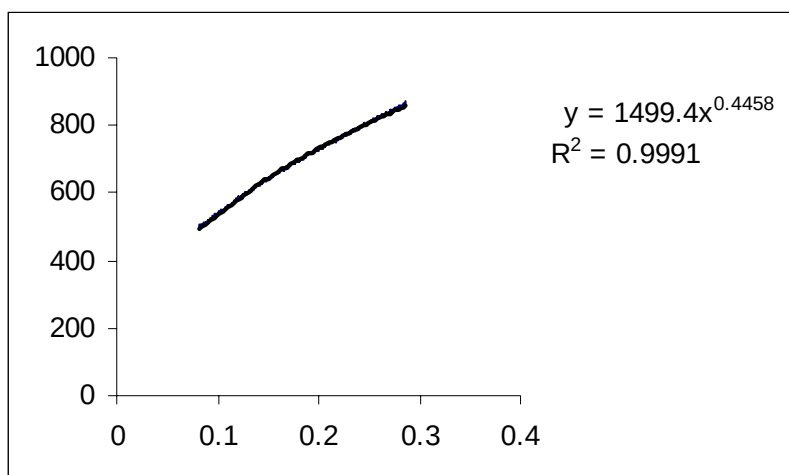
2.9 คำนวณหา y^2

2.10 คำนวณหา x^2

2.11 คำนวณหา xy

2.12 คำนวณหาค่าจากการบันทึก 2.2-2.11 ทุกเปลี่ยนแปลงระยะยืดในช่วง gage length ให้จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยืดเป็น N หาผลรวมทั้งหมด

$$\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$$

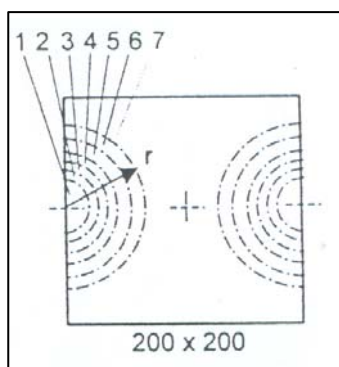


ภาพประกอบ 28 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด
ใช้แบบสมการกำลัง (Power function)

3. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความหนา 0.4mm. 0.58 mm.
และ 0.78 mm. ตามวิธี ASTM E 2218-02 (2002)

3.1 เตรียมชั้นทดสอบของวัสดุแต่ละชนิดและแต่ละความหนา ให้มีขนาด 200x200
mm. จำนวน 270 ชั้นทดสอบ

3.2 นำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาตัดขอบโดยวัดรัศมีจากด้านข้างเริ่มจาก $r=40\text{mm.}$,
 $r=50\text{mm.}$, $r=57.5\text{mm.}$, $r=65\text{mm.}$, $r=72.5\text{mm.}$ และ $r=80\text{mm.}$ ใช้ชั้นทดลองจำนวน 13 ชั้น ต่อ
รัศมี (r) รวมเตรียมชั้นทดสอบทั้งหมด จำนวนกว่า 270 ชั้นทดสอบ



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

ภาพประกอบ 29 ลักษณะการตัดส่วนโค้งด้านข้าง

3.3 นำชิ้นทดสอบสร้างกริดโดยวิธี Electrochemical Etching

3.4 นำชิ้นทดสอบมาขึ้นรูปเครื่องทรงกลมโดยวิธีการชเทิร์ตซ์ชิ้นทดสอบ



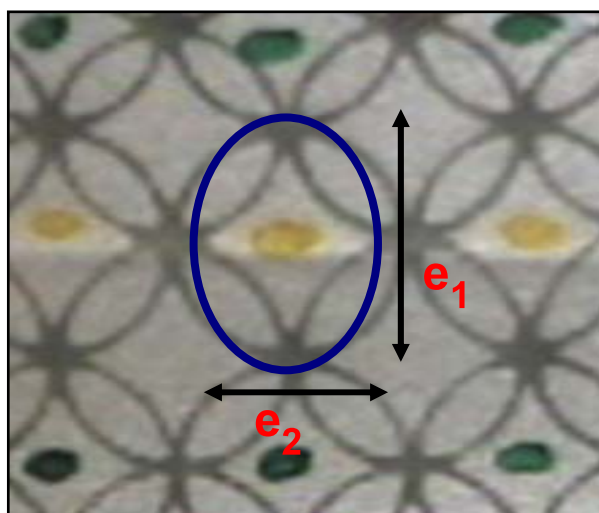
ภาพประกอบที่ 30 แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.4.1 ชิ้นทดสอบต้องไม่เกิดความเสีย (Fracture) ตลอดเส้นรอบวง

3.4.2 ความเร็วการกดของ Punch มีความเร็วคงที่

3.4.3 การวัดค่าความเครียดจากชิ้นทดสอบต้องเป็นชิ้นทดสอบที่เกิดการคอด (Necking) และเกิดความเสียหาย

3.4.4 การเกิดการคอด (Necking) ของชิ้นทดสอบโดยทดลองปรับระยะกดโดยปรับลิมิตสวิตช์ที่เครื่องเพรส

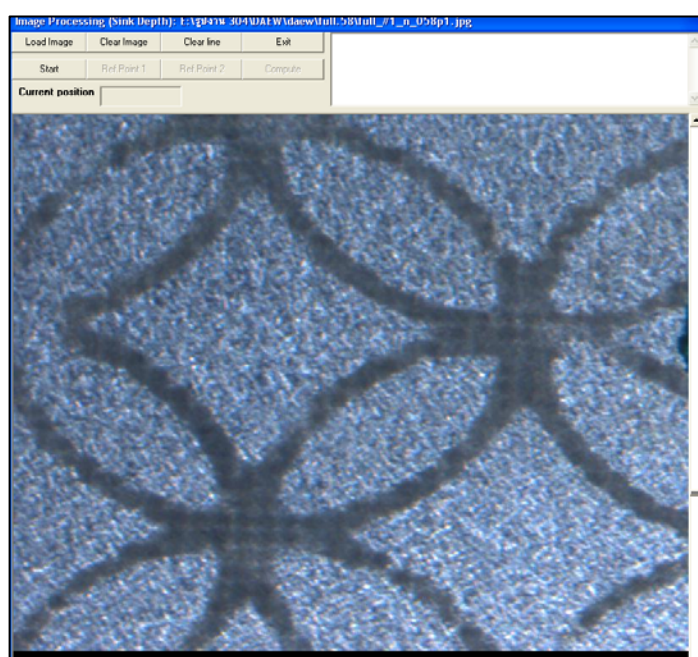


ภาพประกอบ 31 การวัดความเครียดหลัก e_1 ความเครียดตรง e_2

3.5 นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการชเทิร์ทซ์ (Stretching) วัดค่าความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) มาลงจุดตามพิกัด ($e_1 = y$, $e_2 = x$) ซึ่งคำนวณตามสูตร

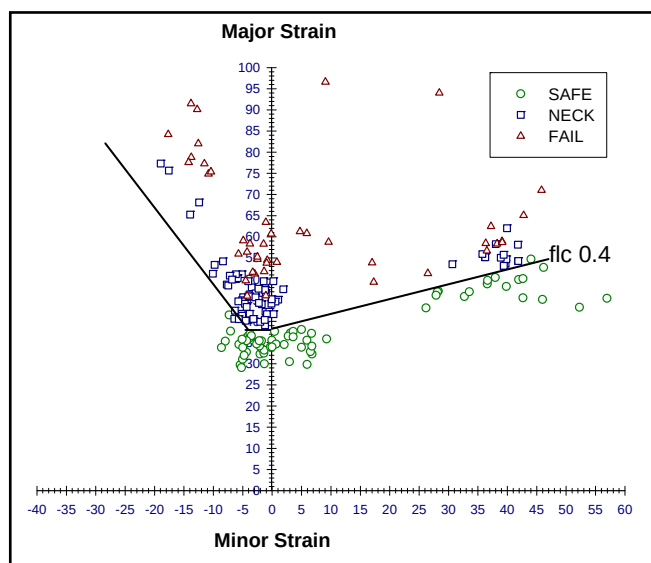
$$Majorstrain = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 = e_1(\%), 0\% \text{ ถึง } 200\%$$

$$Minorstrain = \frac{W_f - W_o}{W_o} \times 100 = e_2(\%), -40\% \text{ ถึง } 60\%$$



ภาพประกอบ 32 ลักษณะการวัดความเครียดหลักความเครียดรองโดยโปรแกรม (Program dcal)

3.6 ลากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit curve) โดยให้เส้นโค้งอยู่ระหว่างจุดความเครียดที่ปลอดภัยและจุดความเครียดที่เกิดการคอด



ภาพประกอบ 33 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304

4. การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304
ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

4.1 ขึ้นรูปชิ้นงานจริงอ่างล้างภาชนะหนา 0.40 mm. วัดค่าความเครียดมาลงจุดเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปหนา 0.40 mm.

4.1.1 นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดความหนา 0.4mm. มาสร้างกริด
(Electrochemical etching)



ภาพประกอบ 34 การสร้างกริดวงกลมบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ

4.1.2 ขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ขนาดความหนา 0.4 mm.เป็นรูปทรงอ่างล้างภาชนะด้วยแรงแบลงก์ไฮดรอลิกความดัน 150 kg/cm² ซึ่งงานไม่เกิดความเสียหาย

4.1.3 ขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ขนาดความหนา 0.4 mm.เป็นรูปทรงอ่างล้างภาชนะด้วยแรงแบลงก์ไฮดรอลิกความดัน 180 kg/cm² ซึ่งงานเกิดความเสียหาย

4.1.4 วัดค่าความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปอ่างภาชนะจำนวน 15 จุดทั้งสองชั้น

4.1.5 เปรียบเทียบตำแหน่งที่วัดความเครียดจากอ่างล้างภาชนะตามสภาพจริงกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้น



ภาพประกอบ 35 อ่างล้างภาชนะที่เสียหายจากการขึ้นรูป

4.2 ขึ้นรูปถ้วยทรงกรวย (Conical cup) และจำลองการขึ้นรูปถ้วยด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้น

4.2.1 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ขนาดความหนา 0.4 mm., 0.58 mm.และ 0.78 mm. ให้เป็นวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 mm.

4.2.2 นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมวงกลมทั้งสองขนาดมาสร้างกริดวงกลม

4.2.3 ขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยใช้แม่ชุดเดียวกันโดยเปลี่ยนหัว 펀ช์ (Punch) และการลีดคูลตัว (Draw bead)

4.2.4 วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนถ้วยทรงกรวยเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพประกอบ 36 ลักษณะถ้วยทรงกรวย (Conical cup)

5. จำลองการขึ้นรูปร่างอ่างล้างจานและถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 - 5.1 เรียกข้อมูลภาพเป็นไฟล์ไอเจสไฟล์เข้าสู่โปรแกรมอโต้ฟอร์ม(Auto form3.2)
 - 5.2 สร้างอุปกรณ์เครื่องมือ(Tooling) จากภาพขึ้นงานด้วยวิธีการ Offset
 - 5.3 กำหนดเงื่อนไขกระบวนการขึ้นรูปเป็นแบบต่อเนื่องและกำหนดแผนแบงค์
 - 5.4 กำหนดค่าสมบัติของวัสดุให้กับโปรแกรม
 - 5.5 จำลองผลการขึ้นรูปและปรับปรุง
 - 5.6 สรุปผลการจำลองการขึ้นรูป
6. ศึกษาและเปรียบเทียบผล FLD จากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
7. สรุปผลการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปความมาตรฐาน ASTM E 2218-02 ตลอดจนประยุกต์ใช้วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและเปรียบเทียบผลการจำลองขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับบทนี้ผู้วิจัยขอเสนอผลการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304
2. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนาต่างกัน
3. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริง
4. ผลการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
5. ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304

ตาราง 1 สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304

ความหนาเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	ความเค้นจุดคราก (σ_y ; MPa)	เลขชี้กำลังการทำให้อยู่ในสภาพความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก SUS 304 (r)		
				r_0°	r_{45°	r_{90°
0.40 mm.	215.81	0.4597	1508.4	1.022	1.3	0.954
0.58 mm.	210.71	0.4232	1582.0	0.976	1.487	0.839
0.78 mm.	210.78	0.4664	1575.3	1.012	1.297	0.843

จากตาราง 1 พบว่าสมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm. ,0.58 mm. และ 0.78 mm. มีความแตกต่างกันทั้งหมด โดยเฉพาะอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) ในแต่ละทิศทางการรีด ($r_0^\circ, r_{45^\circ}, r_{90^\circ}$) มีความแตกต่างกัน แสดงถึงสมบัติวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ที่ทิศทางการรีด 45 องศา (r_{45°) มีอัตราส่วนความเครียดพลาสติกสูงสุด และเลขชี้กำลังการทำให้อยู่ในสภาพความเครียด (n) มีความแตกต่างกัน มีค่าสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา โดยที่ความหนา 0.58 mm. มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.4232

ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนาต่างกัน

ผลการวิจัย การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนาต่างกัน ผู้วิจัยขอแนะนำดังหัวข้อต่อไปนี้

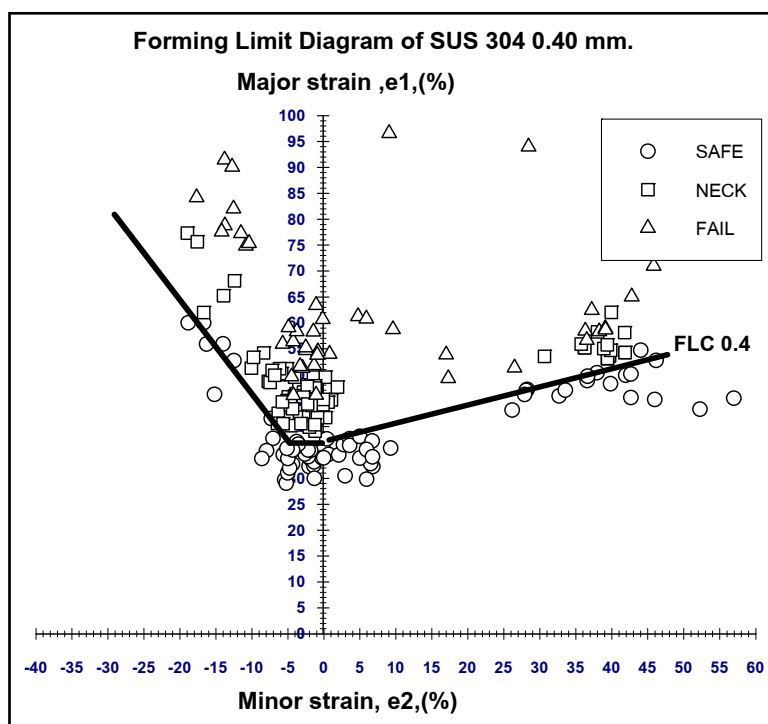
1. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.40 mm.

2. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.58 mm.

3. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.78 mm.

4. ผลการเปรียบเทียบการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.40, 0.58 และ 0.78 mm.

1. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 มีความหนา 0.40 mm.



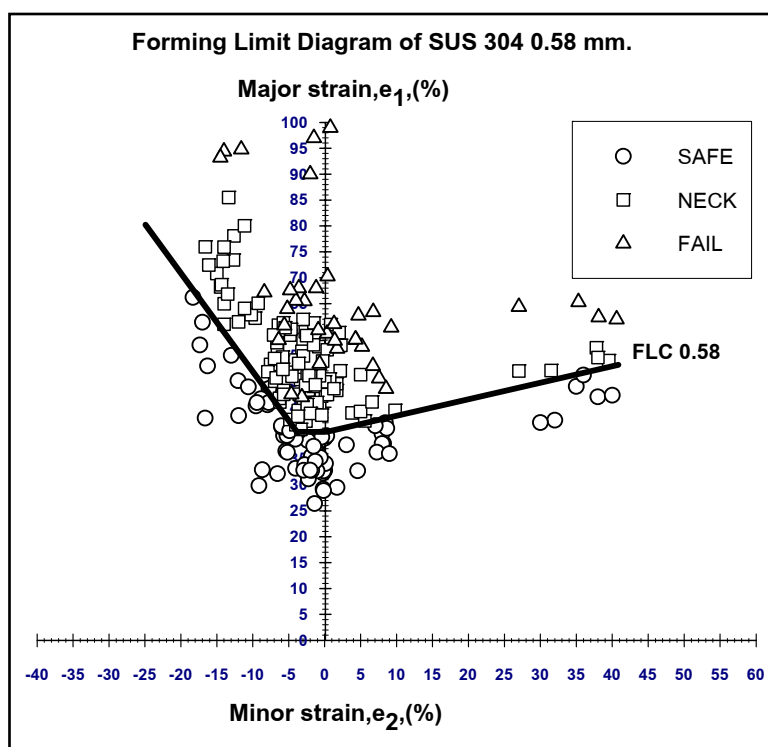
ภาพประกอบ 37 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง

จากภาพประกอบ 37 สำหรับแผ่นแบลงก์ R เท่ากับ 0 พบว่าด้านขวาสุดของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการลดแรงเสียดทานด้วยแผ่นยางและโพลีเอทที่ลื่นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 25 ถึง 60 %

สำหรับแผ่นแบลงก์ R เท่ากับ 40 mm. พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์มมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 %

สำหรับแผ่นแบลงก์ R เท่ากับ 50 ถึง 80 mm. พบว่าด้านซ้ายของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์มมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 0 ถึง -20%

2. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.58 mm.



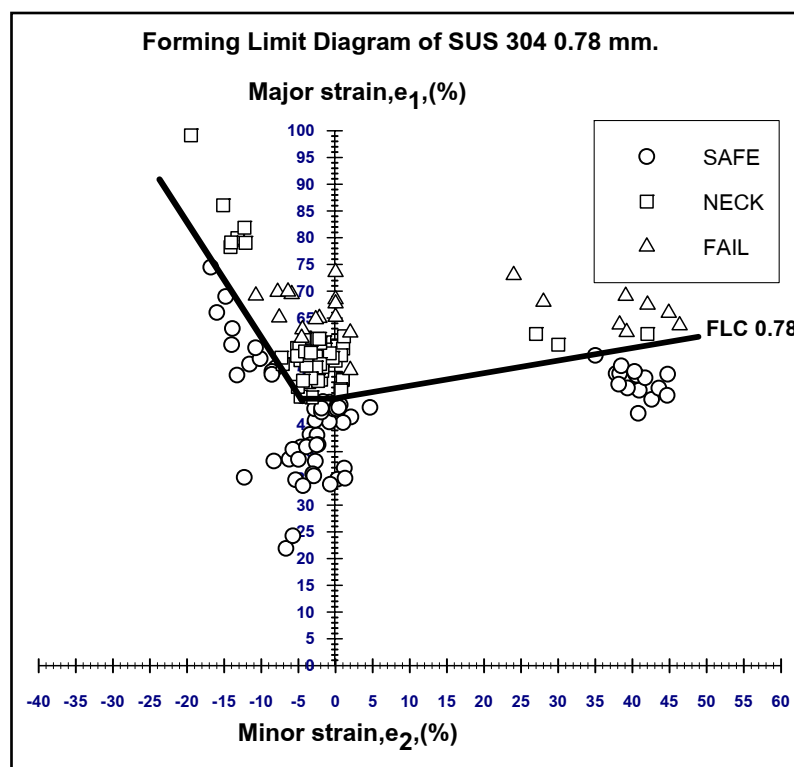
ภาพประกอบ 38 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.58 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง

จากภาพประกอบ 38 สำหรับแผ่นแบลงก์ R เท่ากับ 0 พบว่าด้านขวาสุดของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการลดแรงเสียดทานด้วยแผ่นยางและโพลีเอทที่ลื่นมีความเครียดตรงอยู่ระหว่าง 25 ถึง 45 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R เท่ากับ 40 mm. พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ โดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์มมีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R เท่ากับ 50 ถึง 80 mm. พบว่าด้านซ้ายของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์มมีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 ถึง -25%

3. ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หน้า 0.78 mm.



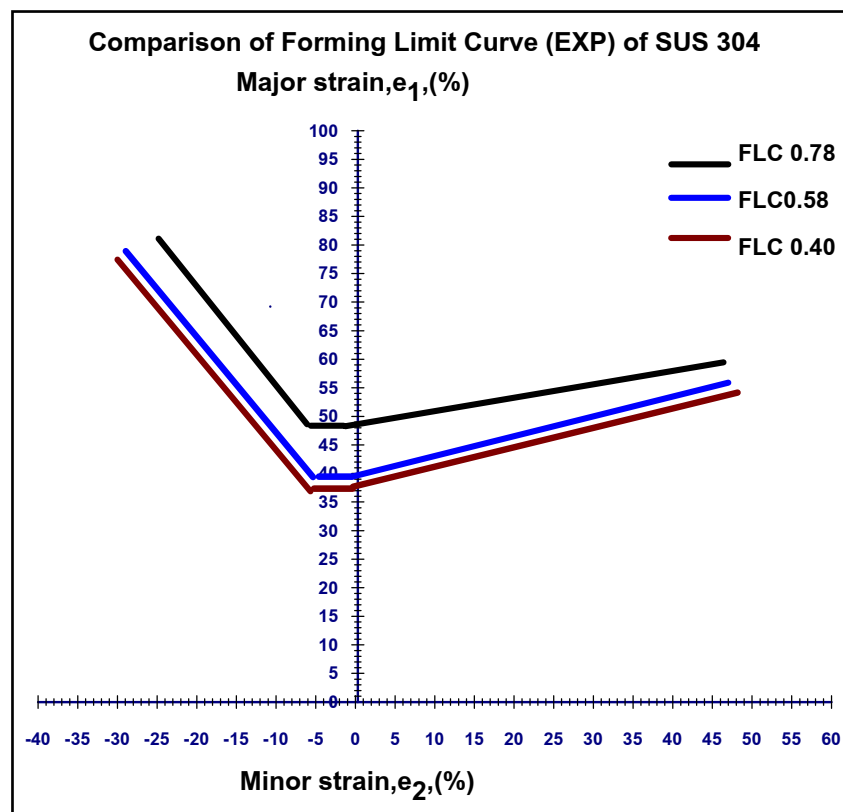
ภาพประกอบ 39 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หน้า 0.78 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง

จากภาพประกอบ 39 สำหรับแผ่นแบล็ก R เท่ากับ 0 พบว่าด้านขวาสุดของเส้นโค้ง ขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการลดแรงเสียดทานด้วยแผ่นยางและโพลีเอทิลีนมีความเครียดอยู่ระหว่าง 25 ถึง 50 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R เท่ากับ 40 mm. พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ โดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์มมีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 %

สำหรับแผ่นแบล็ก R เท่ากับ 50 ถึง 80 mm. พบว่าด้านซ้ายของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยการหล่อลื่นด้วยการใช้น้ำมันขึ้นรูปปริโนฟอร์มมีความเครียดอยู่ระหว่าง 0 ถึง -25%

4. ผลการเปรียบเทียบการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm.



ภาพประกอบ 40 ผลเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่มีความหนา 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง

จากภาพประกอบ 40 พบว่าขึ้นทดสอบหนา 0.40 mm. และ 0.58 mm. เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีลักษณะเหมือนกัน จุดต่ำสุดของเส้นโค้งตามแกนความเครียดหลักเท่ากับ 38 % และ 40 % ตามลำดับ ส่วนขึ้นทดสอบหนา 0.78 mm. เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีลักษณะต่างจากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของขึ้นทดสอบหนา 0.40 mm. และ 0.58 mm. โดยด้านขวาเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีมุมกระทำกับแนวระนาบน้อยกว่า และจุดต่ำสุดของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของขึ้นทดสอบหนา 0.78 mm. ตามแกนความเครียดหลักเท่ากับ 48 % ความหนาของวัสดุขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นทำให้สามารถรับความเครียดมากขึ้นเนื่องจาก มีอัตราการยุบตัวแนวความหนาได้น้อยลงเมื่อเทียบกับการยืดตัวในแนวแกน จึงทำให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองสูงขึ้น

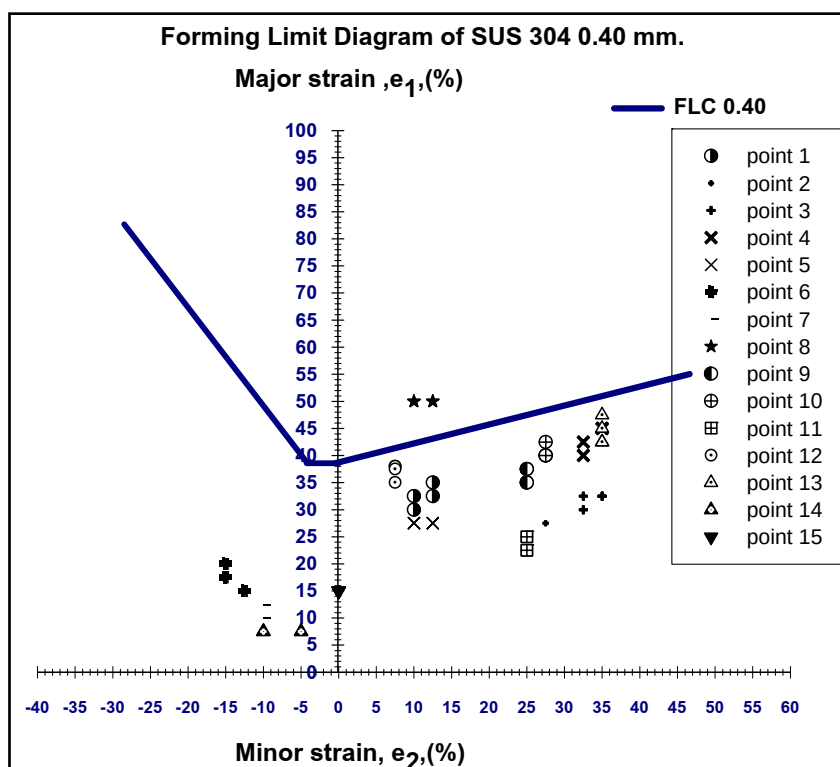
ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงาน

ผลการวิจัยการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงาน ผู้วิจัยขอเสนอข้อสังเกตต่อไปนี้

1. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.40 mm. ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานอ่างล้างภาชนะ

2. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm. ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวย

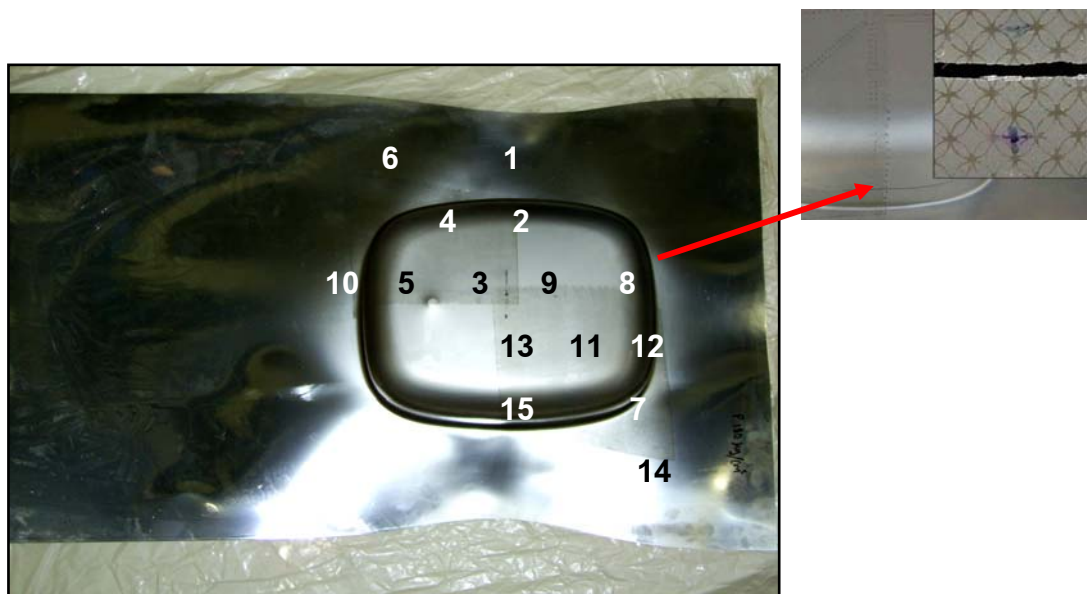
1. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.40 mm. ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานอ่างล้างภาชนะ



ภาพประกอบ 41 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปวิเคราะห์การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ โดยใช้ขนาดแผ่นแบล็ก 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันและโพลิเอทที่ลีน ใช้แบล็กไฮดรอลิคความดัน 180 kg/cm²

จากภาพประกอบ 41 พบว่าการขึ้นรูปชิ้นงานอ่างล้างภาชนะด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.4 mm. เมื่อนำความเครียดมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดจุดที่เสียหายจะอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบหน้า 0.40 mm. ที่

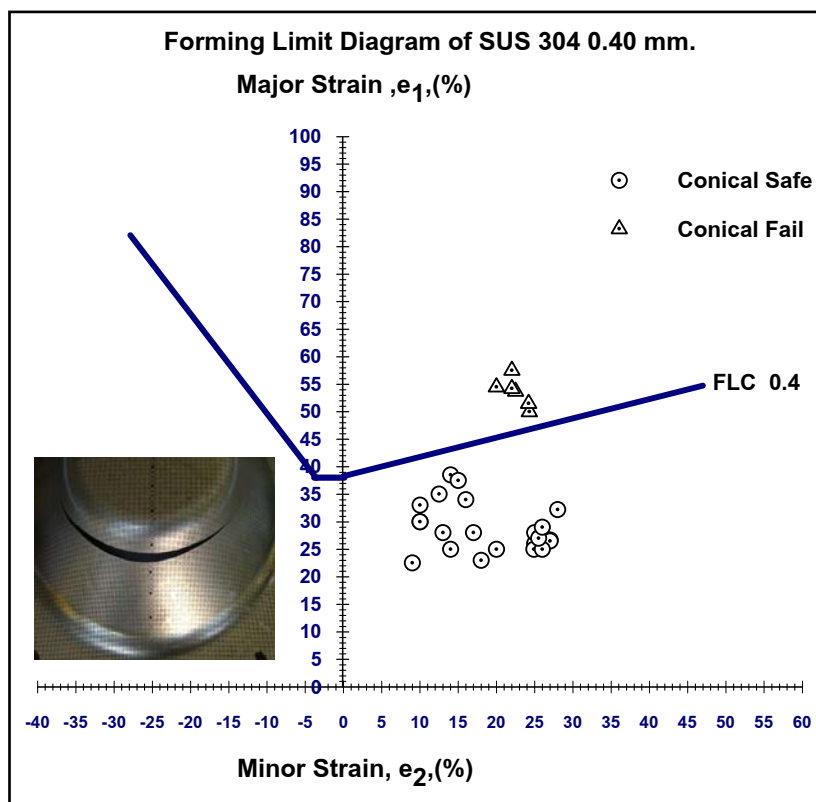
สร้างขึ้นจากการทดลอง ส่วนความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป การกระจายความเครียดส่วนแรกเกิดขึ้นทางด้านซ้ายของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงขึ้นรูป (Deep drawing) และทำให้เกิดรอยย่น (wrinkle) ส่วนที่สองการกระจายความเครียดอยู่ในแนวแกนความเครียดหลัก มีค่าความเครียดตรงเท่ากับ 0 แสดงถึงการขึ้นรูป เป็นระนาบความเครียด (Plane strain) ส่วนที่สามการกระจายความเครียดอยู่ทางด้านขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยึดขึ้นรูป (Biaxial tension)



ภาพประกอบ 42 แสดงจุดการวัดความเครียด 1 ถึง 15 บริเวณที่ตีกริดของอ่างล้างภาชนะโดยใช้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันและโพลีเอททิลีน ใช้แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm²

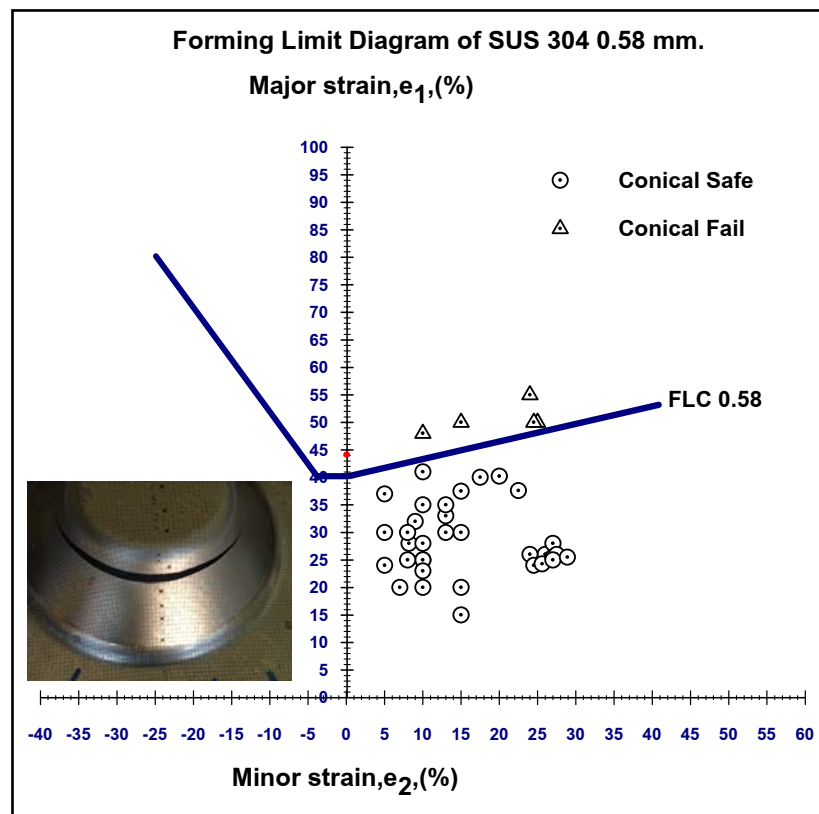
จากภาพประกอบ 42 พบว่าการขึ้นรูปขึ้นงานอ่างล้างภาชนะด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.4 mm. การไหลตัวของแผ่นแบลงก์เกิดขึ้นด้านบนและด้านล่างของหลุมอ่าง ด้านข้างทางซ้ายและด้านขวาของหลุมอ่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่แผ่นแบลงก์มีการไหลตัวน้อย ความเสียหายเกิดที่บริเวณหมายเลข 8

2. ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 SUS 304 หนา 0.40mm., 0.58mm. และ 0.78 mm. ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวย



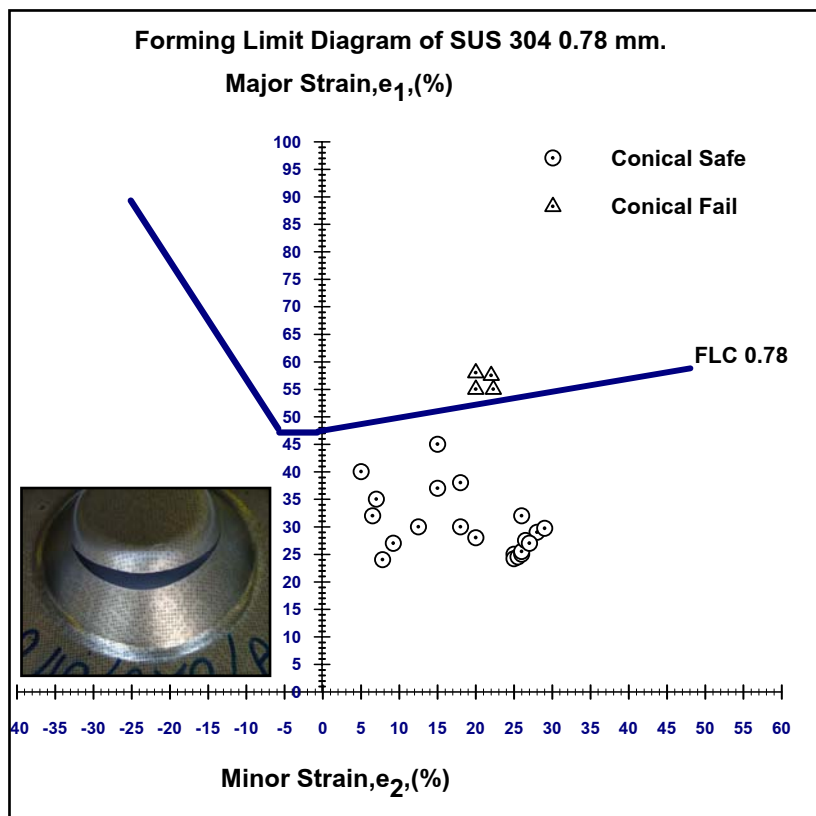
ภาพประกอบ 43 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยหนา 0.40 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม

จากภาพประกอบ 43 พบว่าการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวยด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.4 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 40 mm. เมื่อนำความเครียดบนชิ้นงานมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดจุดเสียหาย อยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบหนา 0.40 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป การกระจายความเครียดอยู่ด้านขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยืดขึ้นรูป (Biaxial tension)



ภาพประกอบ 44 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยหนา 0.58 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม

จากภาพประกอบ 44 พบว่าการขึ้นรูปขึ้นงานถ้วยทรงกรวยด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.58 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 42 mm. เมื่อนำความเครียดบนชิ้นงานมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดจุดเสียหาย อยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบหนา 0.58 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป การกระจายความเครียด อยู่ด้านขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยืดขึ้นรูป (Biaxial tension)



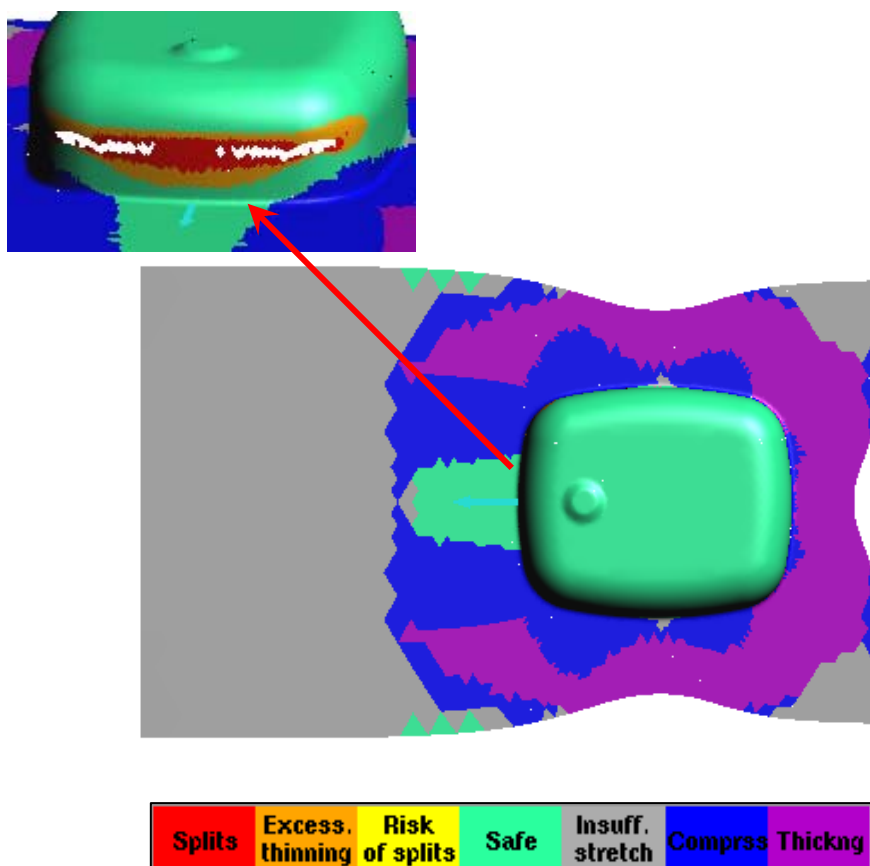
ภาพประกอบ 45 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยหนา 0.78 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันรีโนฟอร์ม

จากภาพประกอบ 45 พบว่าการขึ้นรูปขึ้นงานถ้วยทรงกรวยด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.78 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 44 mm. เมื่อนำความเครียดบนชิ้นงานมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียดจุดเสียหายอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบ หนา 0.78 mm. ที่สร้างขึ้นจากการทดลอง ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป การกระจายความเครียด อยู่ด้านขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยืดขึ้นรูป (Biaxial tension)

ผลการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

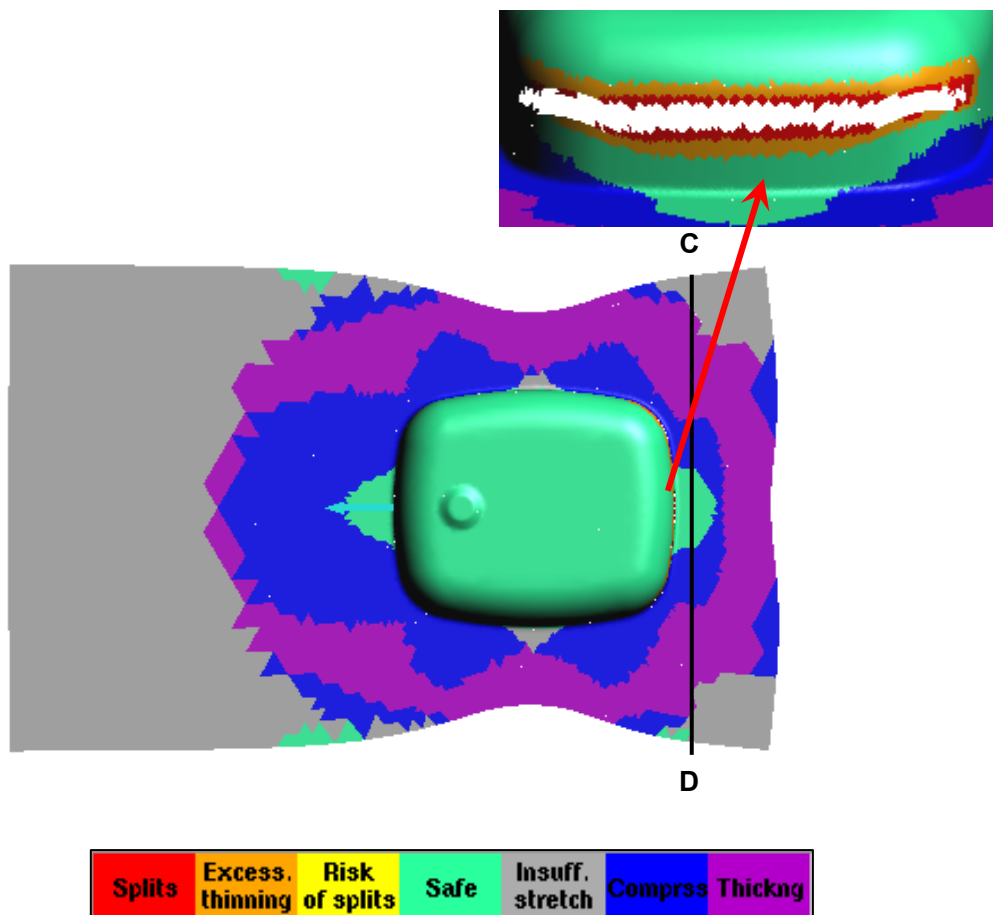
ผลการวิจัยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยขอนำเสนอตั้งหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 2. ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
1. ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



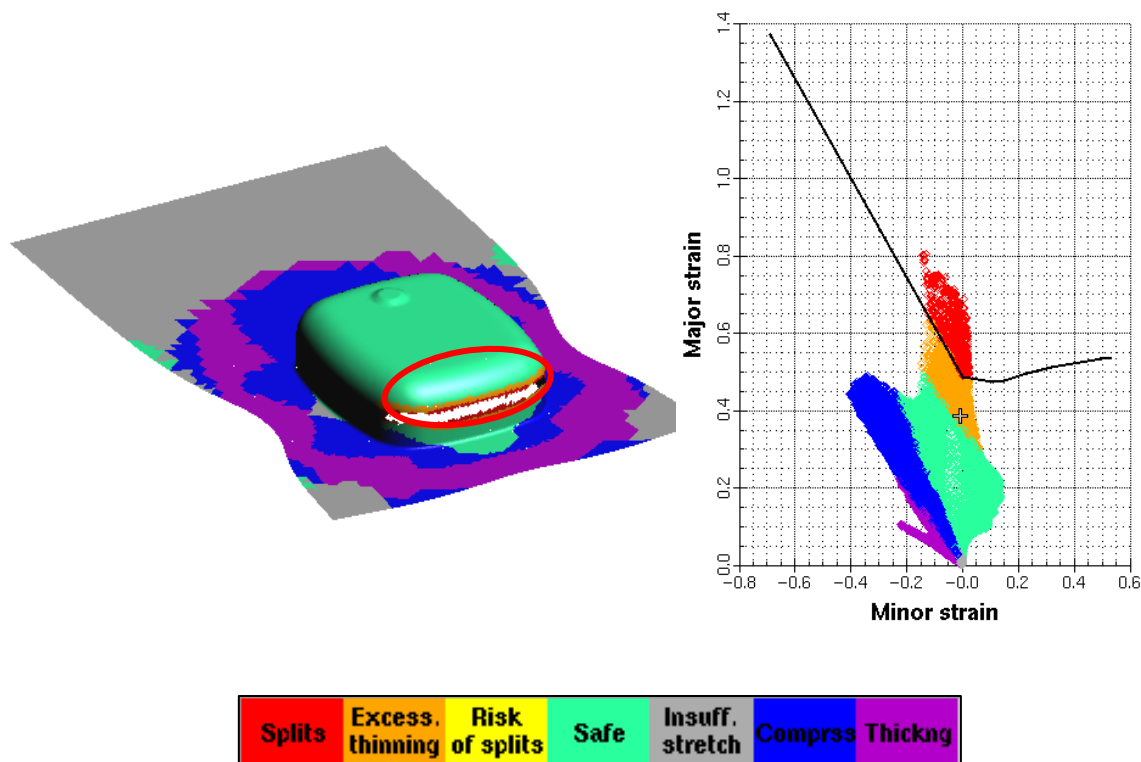
ภาพประกอบ 46 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ หนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบลงก์ไฮลเดอร์ความดัน 180 kg/cm². ไม่มีตรอร์บีต (Draw bead) สภาวะความเครียดแสดงผลเป็นแถบสี แถบสีแดงแสดงบริเวณชิ้นงานเกิดความเสียหาย (Cracks) แถบสีส้มแสดงบริเวณชิ้นงานบางเกินไป (Excess thinning) แถบสีเหลืองแสดงบริเวณชิ้นงานมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหาย (Risk of split) แถบสีเขียวแสดงบริเวณชิ้นงานมีความปลอดภัย (safe) แถบสีเทาแสดงบริเวณชิ้นงานเกิดการดึงยืด (Insuff. stretching) แถบสีน้ำเงินแสดงบริเวณชิ้นงานเกิดการกุด มีแนวโน้มทำให้เกิดการย่น (wrinkling tendency) แถบสีม่วงแสดงบริเวณชิ้นงานเกิดรอยย่น (wrinkles)

จากภาพประกอบ 46 พบว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นที่หลุมอ่างด้านซ้ายของหลุมอ่าง เป็นบริเวณที่แผ่นแบลงก์ มีการไหลตัวน้อย ส่วนบริเวณด้านขวาของหลุมอ่าง แผ่นแบลงก์มีการไหลตัวจึงไม่เกิดความเสียหาย



ภาพประกอบ 47 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ หน้า 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบลงก์ 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบลงก์ไฮลเดอร์ ความดัน 180 kg/cm² แบบมีตรอร์บีต

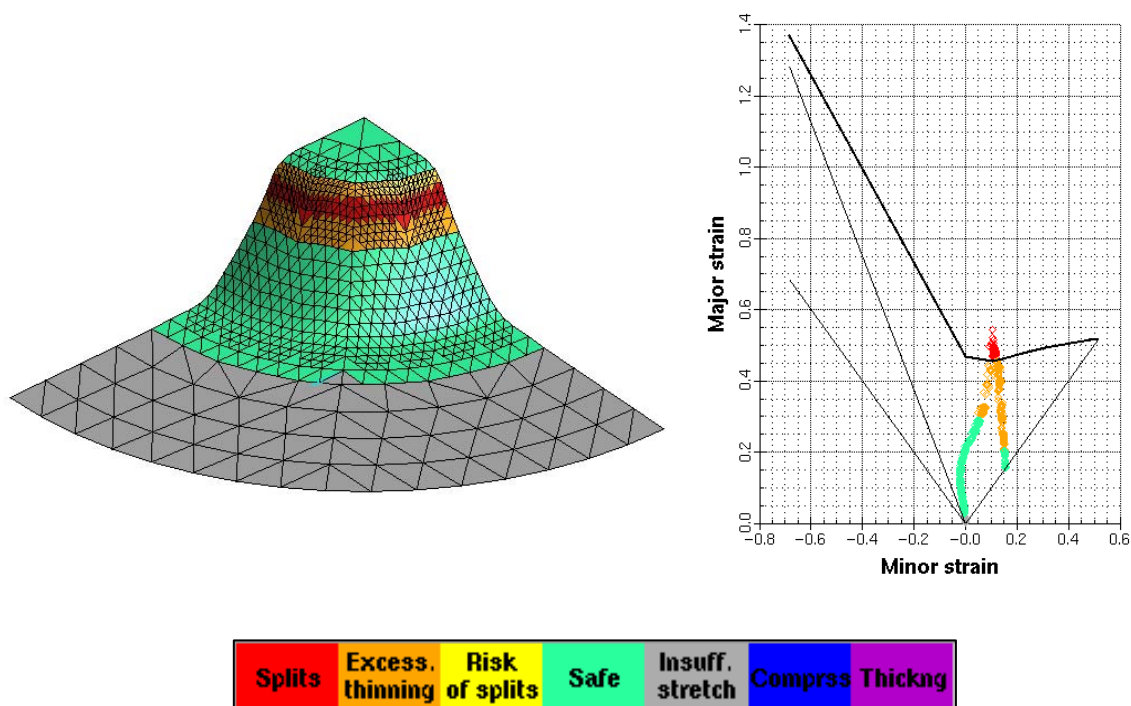
จากภาพประกอบ 47 พบว่าจากการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แผ่นแบลงก์มีการไหลตัวตรงขอบบนและขอบล่าง เกิดตามแนว จากการใส่ตรอร์บีตการลีดการไหลตัวด้านข้างขวาตามแนวเส้น C-D ทำให้แผ่นแบลงก์การไหลตัวน้อยลง จึงทำให้เกิดความเสียหายบริเวณด้านขวาของหลุมอ่าง



ภาพประกอบ 48 ผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะหนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ขนาดแผ่นแบล็ก 762 x 1222 mm. สารหล่อลื่นแบบมาตรฐาน แบล็กไฮลเดอร์ ความดัน 180 kg/cm² แบบมีดอร์บีต เทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปหนา 0.40 mm.

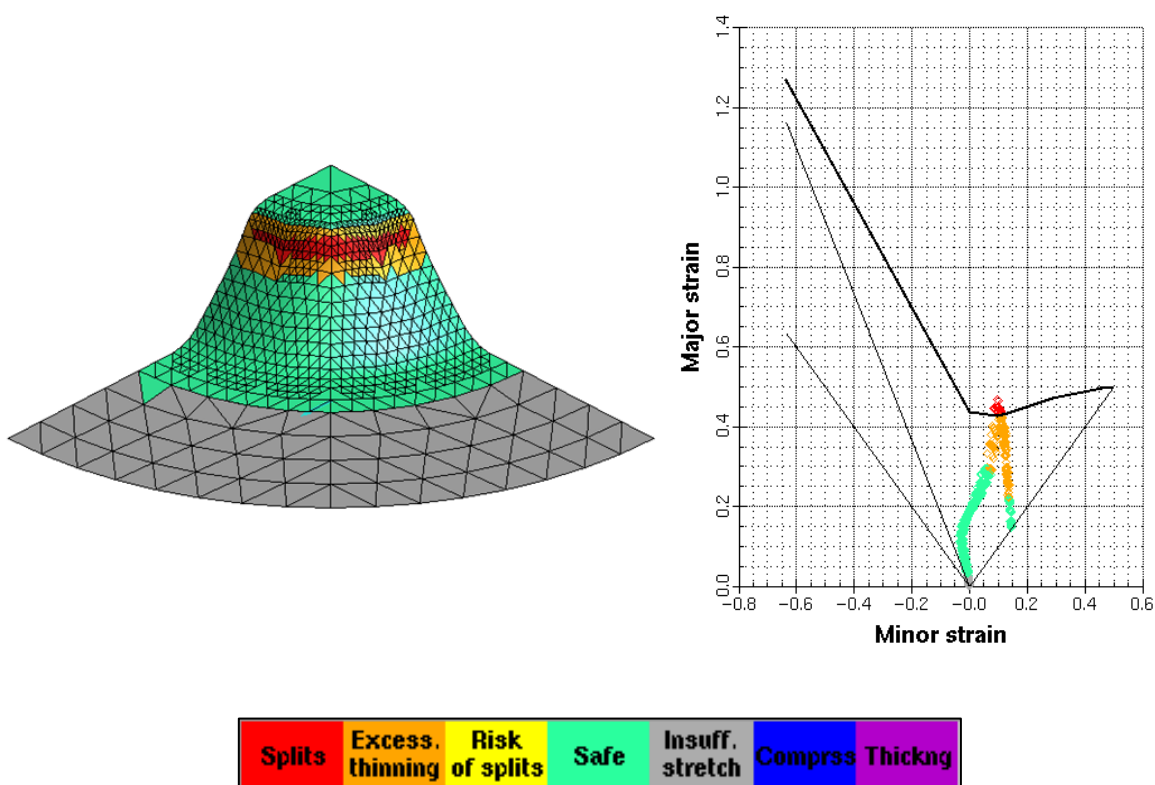
ภาพประกอบ 48 พบว่าผลการจำลองการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็กกล้าไร้สนิมหนาสแตน SUS 304 หนา 0.40 mm. พิจารณาการกระจายความเครียดจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเสียหายเกิดจากการดึงขึ้นรูป (Deep drawing) บริเวณด้านข้าง หลุมอ่างเป็นสีแดง สีส้ม ความปลอดภัยเกิดจากการดึงขึ้นรูปและการดึงยืดขึ้นรูป บริเวณหลุมอ่างเป็นสีเขียว การอัดตัวรอบหลุมอ่าง (Uniaxial tension) เป็นสีน้ำเงิน เกิดรอยย่น (Uniaxial compression) ต่อจากการอัดตัวเป็นสีม่วง

2. ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



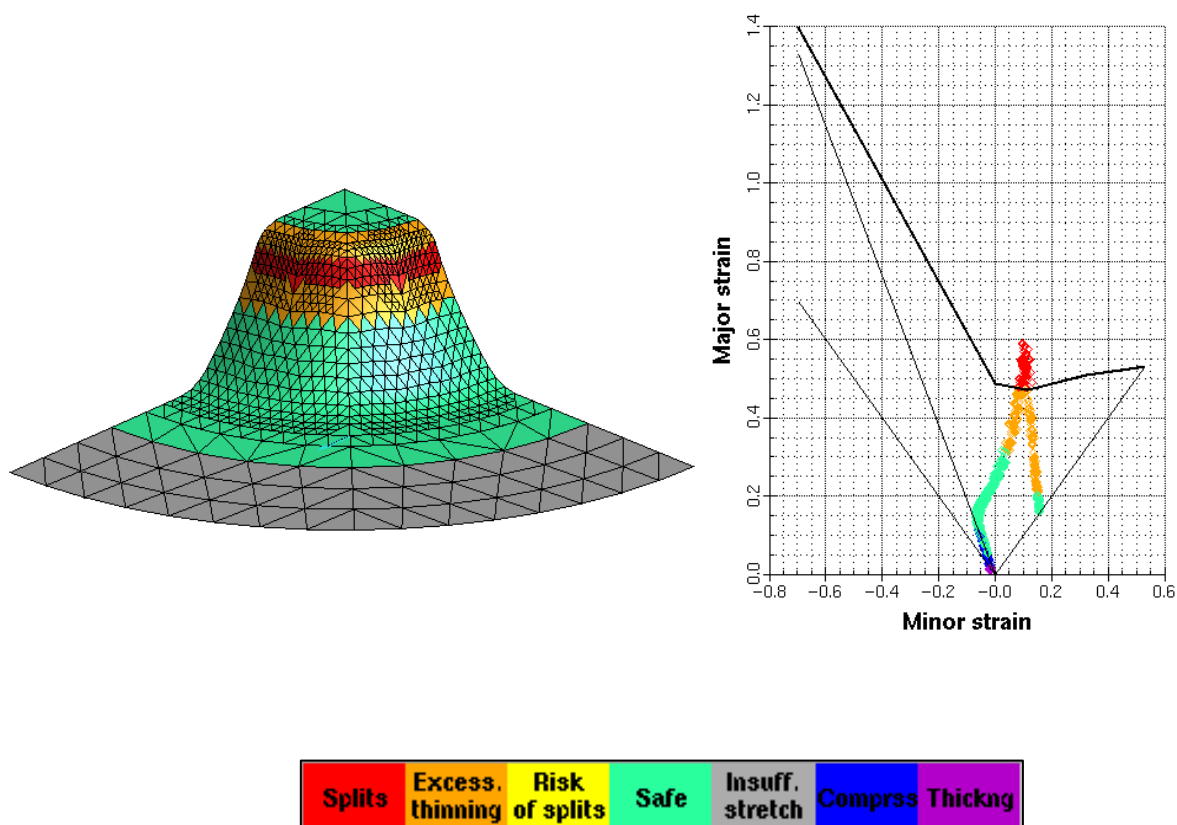
ภาพประกอบ 49 ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.40 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน

จากภาพประกอบ 49 พบว่าการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความหนา 0.40 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 40 mm. การวิเคราะห์ 1/4 ของชิ้นงาน พิจารณาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเสียหายขึ้นที่ขอบกันถ้วยเป็นสีแดงและอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ต่อจากรอยเสียหายบริเวณชิ้นงานยึดตัวบางลงเป็นสีเหลือง สีเขียวเป็นบริเวณที่ปลอดภัย ขอบปีกถ้วยเป็นส่วนถูกดึงยืดแสดงเป็นสีเทา การกระจายความเค้นอยู่ทางขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยืดขึ้นรูป (Biaxial tension)



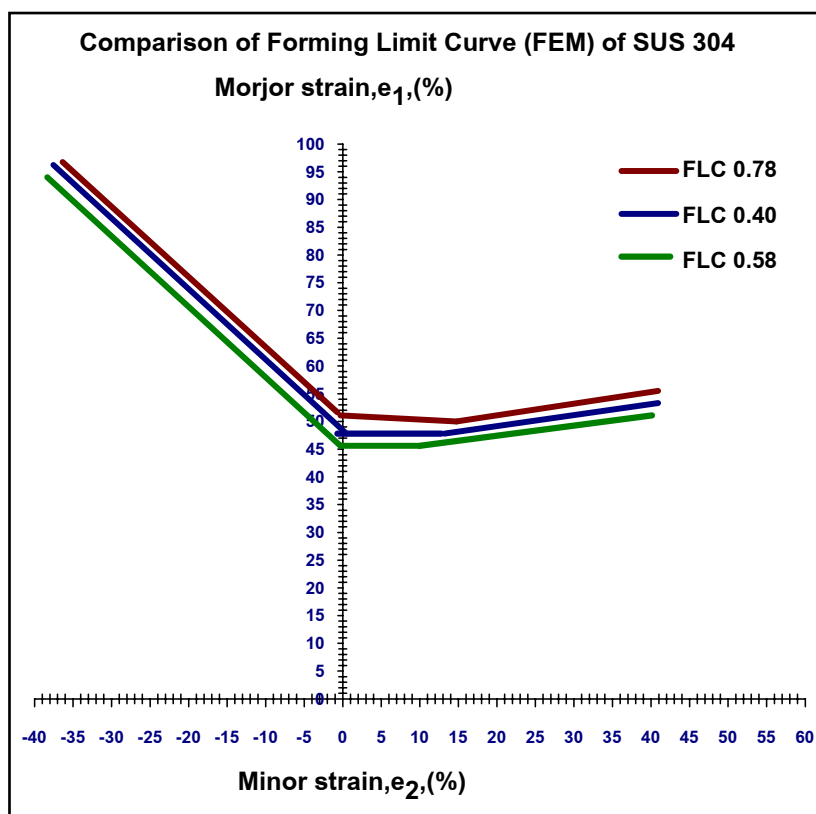
ภาพประกอบ 50 ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.58 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน

จากภาพประกอบ 50 พบว่าการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความหนา 0.58 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 42 mm. การวิเคราะห์ 1/4 ของชิ้นงาน พิจารณาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเสียหายขึ้นที่ขอบกันถ้วยเป็นสีแดงและอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ต่อจากรอยเสียหายบริเวณชิ้นงานยึดตัวบางลงเป็นสีเหลือง สีเขียวเป็นบริเวณที่ปลอดภัย ขอบปีกถ้วยเป็นส่วนถูกดึงยืดแสดงเป็นสีเทา การกระจายความเค้นอยู่ทางขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยืดขึ้นรูป (Biaxial tension)



ภาพประกอบ 51 ผลการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 0.78 mm. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเบลงก์ 280 mm. สารหล่อลื่นเป็นแบบมาตรฐาน

จากภาพประกอบ 51 พบว่าการจำลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความหนา 0.78 mm. ขึ้นรูปจนถึงจุดเสียหาย ลึก 44 mm. การวิเคราะห์ 1/4 ของชิ้นงาน พิจารณาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเสียหายขึ้นที่ขอบกันถ้วยเป็นสีแดงและอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ต่อจากรอยเสียหายบริเวณชิ้นงานยึดตัวบางลงเป็นสีเหลือง สีเขียวเป็นบริเวณที่ปลอดภัยขอบปีกถ้วยเป็นส่วนถูกดึงยึดแสดงเป็นสีเทา การกระจายความเค้นอยู่ทางขวาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป แสดงถึงเป็นการดึงยึดขึ้นรูป (Biaxial tension)



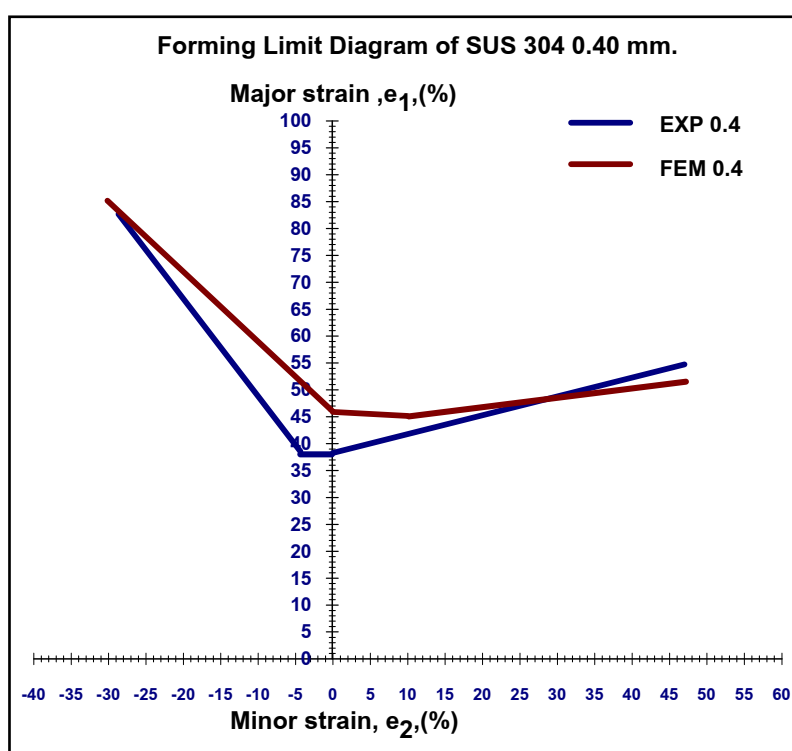
ภาพประกอบ 52 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm.

จากภาพประกอบ 52 พบว่าการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีลักษณะเหมือนกัน ขีดจำกัดต่ำสุดของเส้นโค้งตามแนวแกนความเครียดหลักเท่ากับ 44% หนา 0.58 mm. เส้นโค้งขีดจำกัดรองต่ำสุดเท่ากับ 47% หนา 0.40 mm. เส้นขีดโค้งจำกัดสูงสุดเท่ากับ 49% หนา 0.78 mm. สูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา การกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบวิธีของยูซินอร์

ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

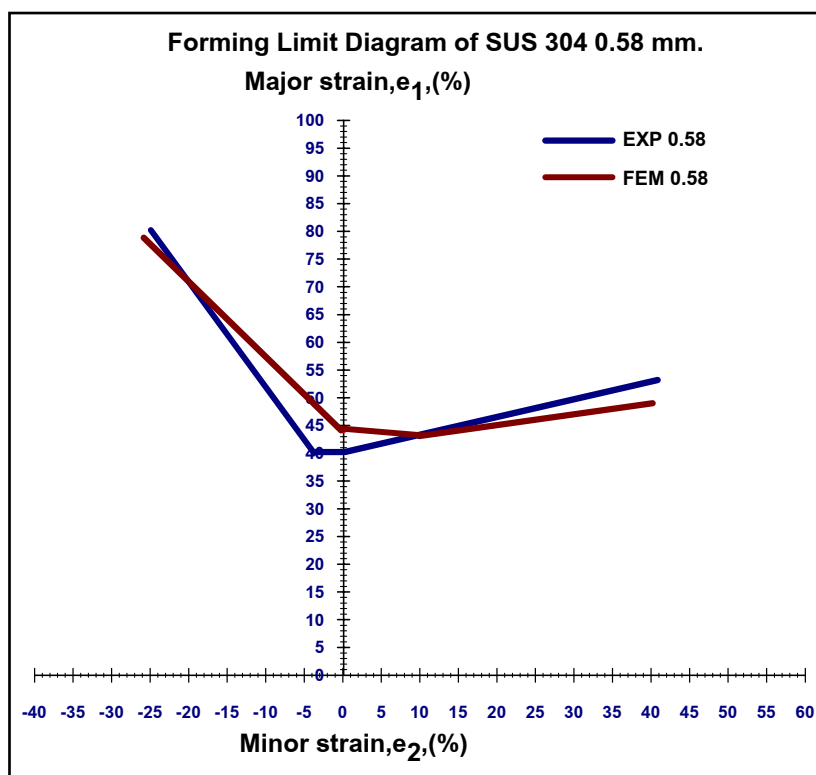
ผลการเปรียบเทียบการแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยขอนำเสนอตั้งหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 2. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานอ่างล้างภาชนะกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 3. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวยกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
1. ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



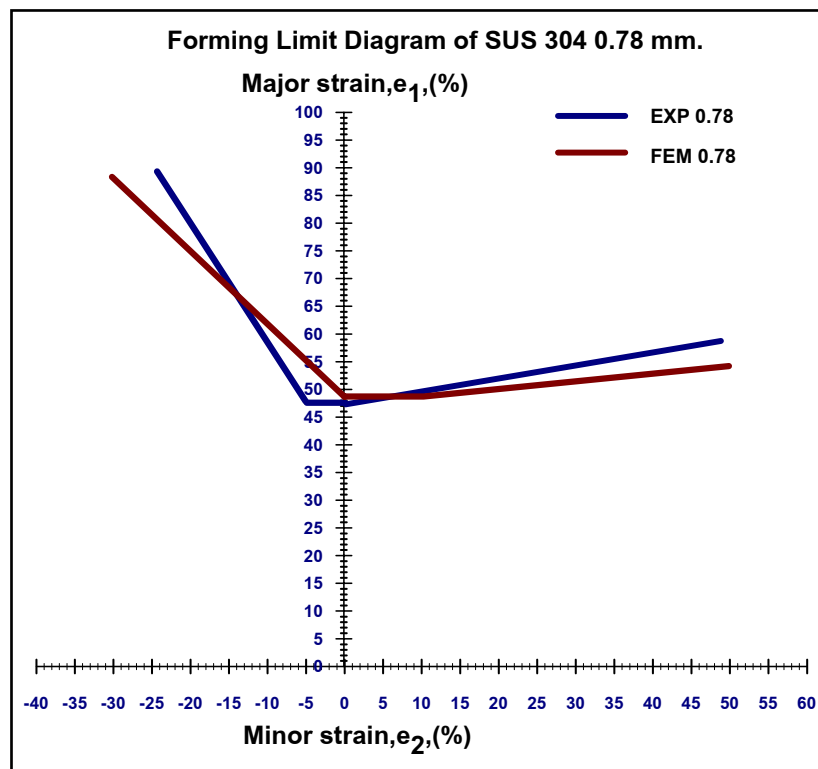
ภาพประกอบ 53 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีการทดลอง (EXP0.40) กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.40) หนา 0.40 mm.

จากภาพประกอบ 53 พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการทดลองต่ำกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 9 % ความเครียดหลักที่จุดต่ำสุดจากการทดลอง 38 % จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 47 %



ภาพประกอบ 54 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีการทดลอง (EXP0.58) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.58) หนา 0.58 mm.

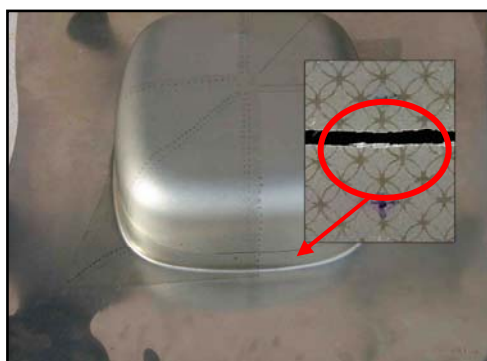
จากภาพประกอบ 54 พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 จากการทดลองต่ำกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 4 % ความเครียดหลักที่จุดต่ำสุดจากการทดลอง 40 % จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 44 %



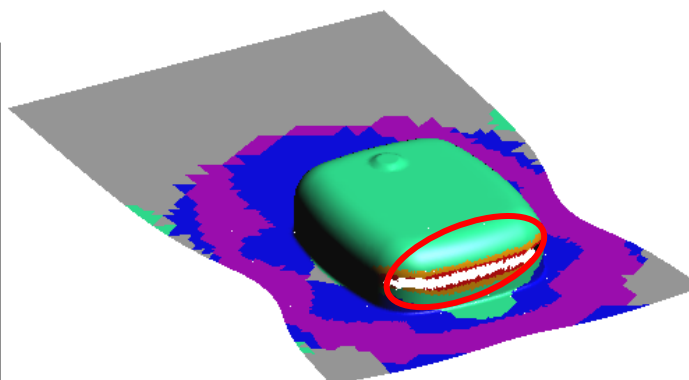
ภาพประกอบ 55 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลอง (EXP0.58) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM0.58) หนา 0.78 mm.

จากภาพประกอบ 55 พบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการทดลองต่ำกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 % ความเครียดหลักที่จุดต่ำสุดจากการทดลอง 48 % จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 49 %

2. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



(ก) การขึ้นรูปชิ้นงานจริง

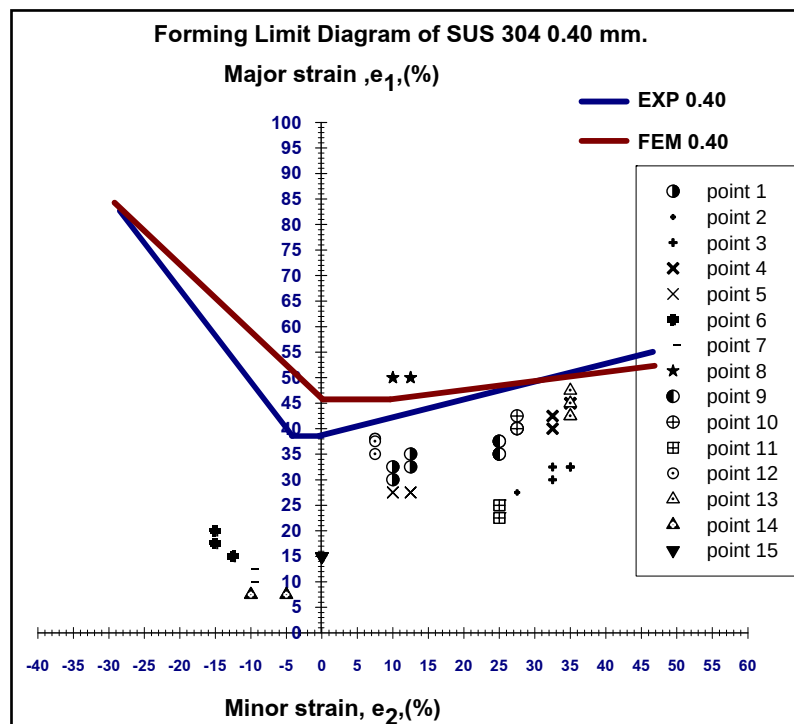


(ข) การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Splits	Excess. thinning	Risk of splits	Safe	Insuff. stretch	Compress	Thickng
--------	------------------	----------------	------	-----------------	----------	---------

ภาพประกอบ 56 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอ่างล้างภาชนะและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm.

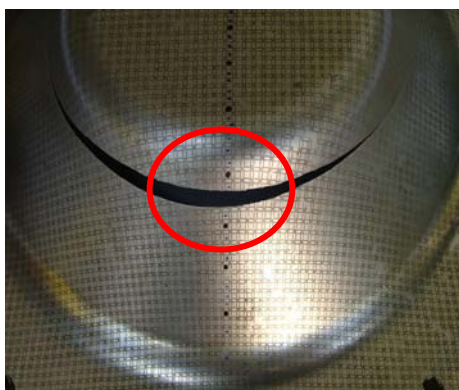
จากภาพประกอบ 56 พบว่าบริเวณที่เกิดความเสียหาย ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกันกับกระบวนการขึ้นรูปจริง



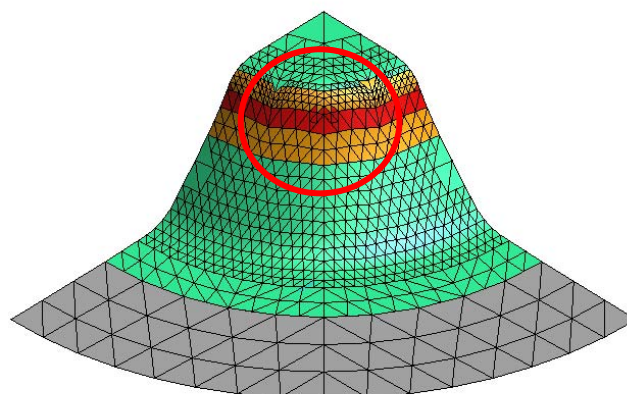
ภาพประกอบ 57 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณจุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของอ่างล้างภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm.

จากภาพประกอบ 57 พบว่าบริเวณจุดความเครียดจุดที่เสียหาย อยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองวิธี

3. ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกรวยกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



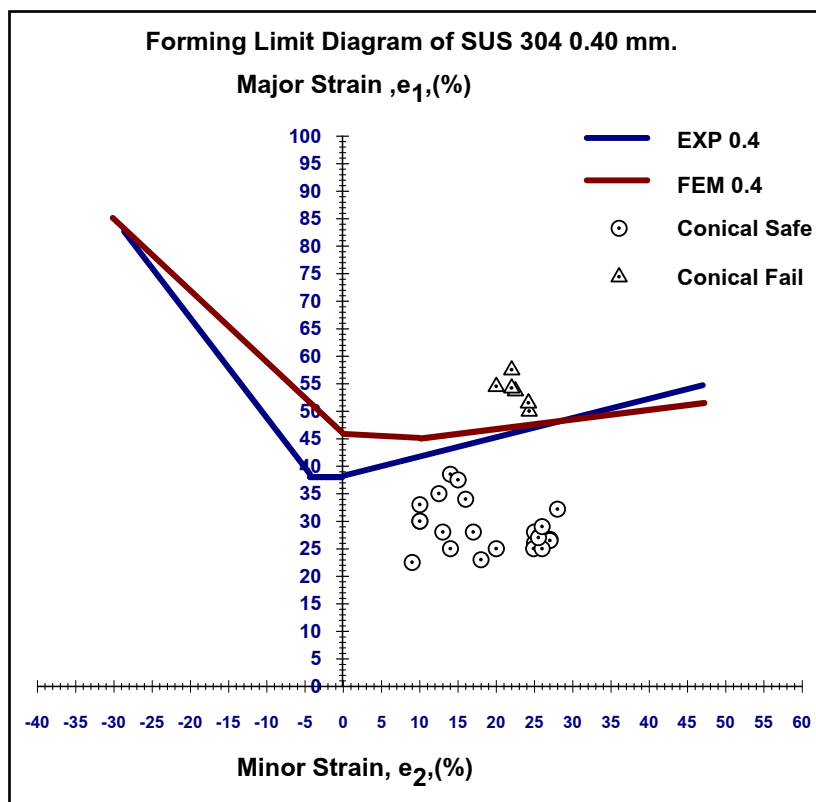
(ก) การขึ้นรูปชิ้นงานจริง



(ข) การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 58 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงถ้วยทรงกรวยกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm.

จากภาพประกอบ 58 พบว่าบริเวณที่เกิดความเสียหาย ระหว่างการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นจุดเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

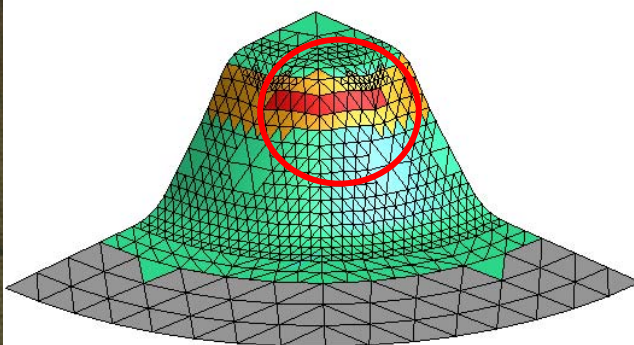


ภาพประกอบ 59 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณจุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm.

จากภาพประกอบ 59 พบว่าบริเวณจุดความเครียดจุดที่เสียหายอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองวิธี



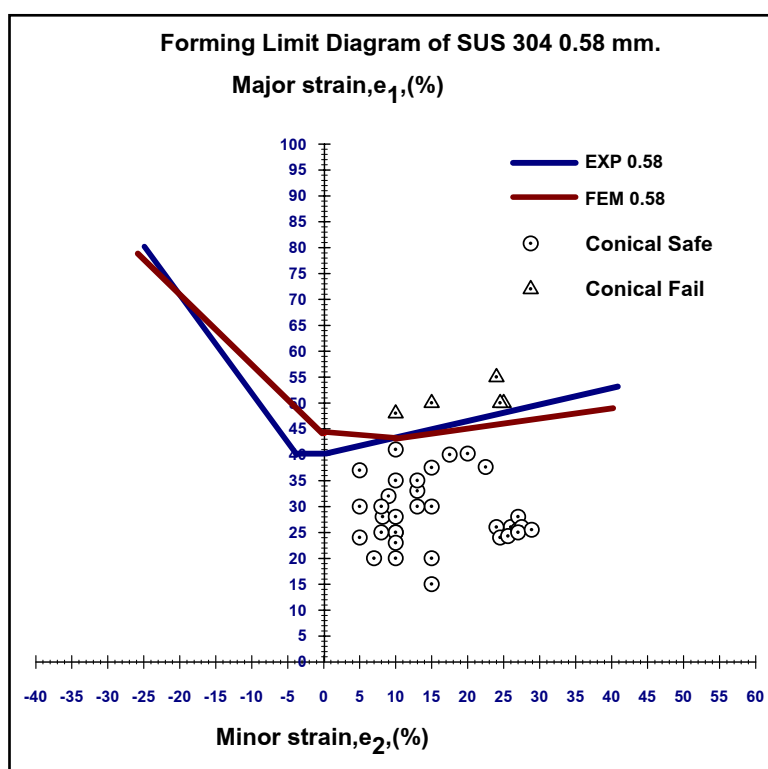
(ก) การขึ้นรูปชิ้นงานจริง



(ข) การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 60 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยทรงกรวยกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.58 mm..

จากภาพประกอบ 60 พบว่าบริเวณที่เกิดความเสียหาย ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นจุดเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

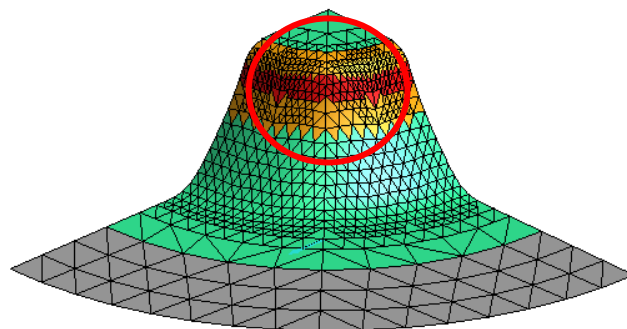


ภาพประกอบ 61 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณจุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.58 mm.

จากภาพประกอบ 61 พบว่าบริเวณจุดความเครียดจุดที่เสียหาย อยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



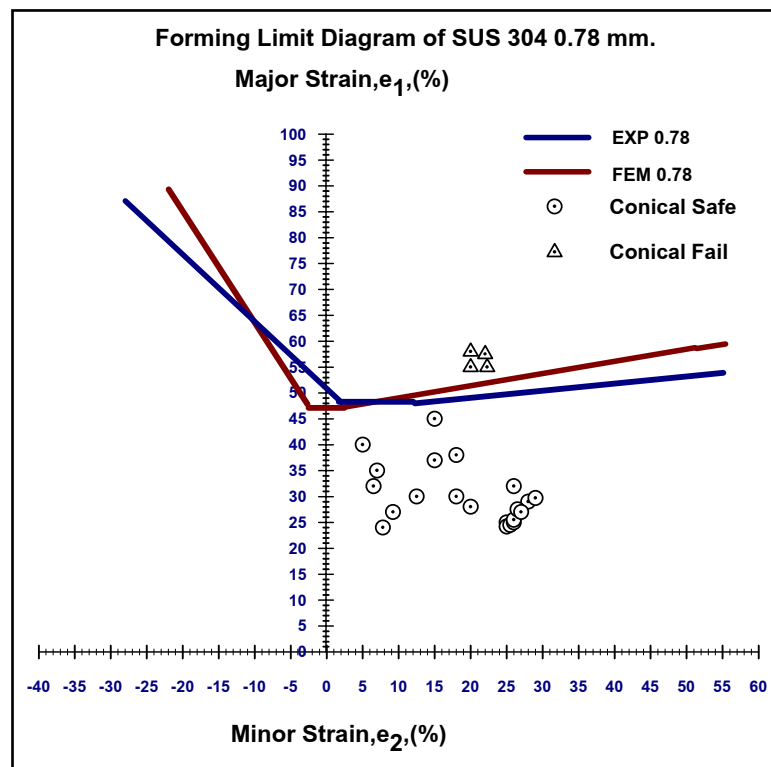
(ก) การขึ้นรูปชิ้นงานจริง



(ข) การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 62 ผลการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยทรงกรวยกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.78 mm.

จากภาพประกอบ 62 พบว่าบริเวณที่เกิดความเสียหาย ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นจุดเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน



ภาพประกอบ 63 การเปรียบเทียบเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยความเครียดบริเวณจุดเสียหาย และบริเวณจุดปลอดภัย ของถ้วยทรงกรวยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.78 mm.

จากภาพประกอบ 63 พบว่าบริเวณจุดความเครียดจุดที่เสียหาย อยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเครียดจุดที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งจากการทดลองและจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 5

สรุปผลอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปขึ้นงานจริง อ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวย และเปรียบเทียบผลกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยความหนา 0.4 mm., 0.58 mm. และ 0.78 mm. โดยนำวัสดุขึ้นทดสอบมาสร้างกริดวงกลม ขึ้นรูปด้วย 펀ช์ครึ่งทรงกลม (Hemispherical dome punch) วัดค่าความเครียดบริเวณจุดปลอดภัย บริเวณจุดเกิดการคอด บริเวณจุดเสียหาย มาลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2) สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จากนั้นนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไปใช้วิเคราะห์ การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ และถ้วยทรงกรวยโดยการ สร้างกริดวงกลมบนแผ่นแบลงก์ ขึ้นรูปแผ่นแบลงก์ วัดค่าความเครียดบนชิ้นงานและนำมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ผลจากการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปใช้วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปขึ้นงานจริง เปรียบเทียบกับผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม AUTOFORM 3.26 นั้น มีผลการวิจัยดังนี้

สรุปผล

1. สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02

ผลการวิจัยพบว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สร้างได้ตาม ASTM E 2218-02 และความหนาขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เกินไปตามสัดส่วนความหนา แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีความหนาเดียวกัน

2. ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวย

ผลการวิจัยพบว่า สามารถประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ การขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวยได้

3. เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง และการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัยพบว่า การเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงให้ผลสอดคล้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อภิปรายผล

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสร้างจากวัสดุขึ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ที่มีความหนาต่างกันจะได้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปต่างกัน การนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้วิเคราะห์ผลขึ้นงานจริง ควรเป็นแผนภาพที่มีความหนาเดียวกันกับขึ้นงาน

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้านขวาที่ได้จากการทดลอง มีความเหมาะสมใช้วิเคราะห์ขึ้นงานจริงมากกว่า เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจากโปรแกรมอโต้ฟอร์ม(วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) เนื่องจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสร้างจากวัสดุขึ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ และไปใช้ในการขึ้นรูป

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) ในแต่ละทิศทางการรีด ($r_{0^\circ}, r_{45^\circ}, r_{90^\circ}$) มีความแตกต่างกัน แสดงถึงสมบัติวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ที่ทิศทางการรีด 45 องศา (r_{45°) มีอัตราส่วนความเครียดพลาสติกสูงสุดและวัสดุที่ความเหมาะสมนำมาใช้ขึ้นรูปควรเป็นวัสดุที่มีความเค้นครากต่ำ ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดสูง ทำให้ใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำ ความสามารถการขึ้นรูปลึกได้ดี

เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 หนา 0.40 mm, 0.58 mm และ 0.78 mm. จากการทดลองและการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม AUTOFORM 3.26 พิจารณาจุดต่ำสุดแนวความเครียดหลักความหนา 0.78 mm ต่างกัน 1 % ความหนา 0.58 mm. ต่างกัน 4 % ความหนา 0.40 mm. ต่างกัน 9 % แสดงถึงเมื่อความหนาขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นจุดต่ำสุดแนวความเครียดหลักมีแนวโน้มที่ทำให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเท่ากัน

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 จากแหล่งผลิตต่างกันเมื่อนำมาใช้งานขึ้นรูป โดยขึ้นงานผ่านกระบวนการจำลองตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการผลิตนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทดสอบหาสมบัติเชิงกล

การกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของแบบวิธียูซินอร์ (Usinor model) จากโปรแกรมอโต้ฟอร์ม ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดเป็นสิ่งกำหนดความสูงของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

การไหลตัวแผ่นแบลงก์ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลมาจาก พื้นที่รับแบลงก์โฮลเดอร์ของแผ่นแบลงก์ และการปรับขนาดความดันแบลงก์โฮลเดอร์ บริเวณพื้นที่รับแบลงก์โฮลเดอร์น้อยแผ่นแบลงก์ เกิดการไหลตัวได้มาก บริเวณพื้นที่รับแบลงก์โฮลเดอร์มากแผ่นแบลงก์เกิดการไหลตัวได้น้อย

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะทั่วไป

1. เครื่องที่ใช้ทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบควรเป็นเครื่องที่สามารถปรับตั้งระยะการกดได้แม่นยำและแสดงผลค่าแบลงก์โฮลเดอร์ได้ชัดเจน

2. ในการจำลองการขึ้นรูปโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผู้ใช้ควรมีประสบการณ์ในการทำงานจริงและมีความเข้าใจสมบัติวัสดุที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปเป็นอย่างดี จึงสามารถใช้โปรแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. การสร้างกริดบนชิ้นงานควรมีการหลีกเลี่ยง บริเวณที่ชิ้นงานสัมผัสกับพื้นที่ที่กดทับของแม่พิมพ์ เนื่องจากกริดมีความเสียดทานและมีผลกระทบต่อการไหลตัวของโลหะแผ่น

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

1. ควรศึกษาถึงขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 เนื่องจากเปลี่ยนสารหล่อลื่น

2. ลักษณะการสร้างกริดบนแผ่นแบลงก์ที่มีผลกระทบต่อการไหลตัวของวัสดุน้อยสุด

3. ศึกษาผลกระทบของธาตุเจือของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ที่ส่งผลสมบัติทางกลที่มีความเหมาะสมนำมาใช้ในการขึ้นรูป

4. แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสร้างวัสดุโลหะแผ่นที่มีค่า เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่าสูง มีผลถูกต้องในการทำนายผลของแผนภาพทางซ้ายและทางขวาอย่างไร

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กำพล ไพโรจน์กิริติกุล.(2546).ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม สะท้อนแสงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ).กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร
- ชาญ ถนัดงาน (2538). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ.กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณรงค์ พจน์จำเริญ. (2545). การศึกษาเพื่อเพิ่มขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 โดยการอุ่นชิ้นงานระหว่างการลากขึ้นรูป.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ).กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.ถ่ายเอกสาร
- เดช พุทธเจริญทอง.(2541) การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ.ศูนย์สื่อเสริม กรุงเทพฯ.
- ธานนท์ สุขตาอยู่และคณะ. (2547). แม่พิมพ์ปั๊มโลหะแผ่น. กรุงเทพฯ.อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย.
- พนา แซ่มสวัสดิ์. (2542). การแก้ปัญหาการรอยย่นในงานขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร
- วัชรพงษ์ ป้อมประภา. (2545). การวิเคราะห์มุมเอียงผิวหน้ากดยึดชิ้นงานในการขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร
- สามารถ แซ่มดำ. (2546). การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปภาดอลูมิเนียมโดยการใช้วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร
- พรชัย คงวัฒนาชัย.(2546).การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(เทคโนโลยีการขึ้นรูป).กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร

- Donald F. Eary & Edward A. Reed. (1974). *Techniques of Press Working Sheet Metal*. New Jersey : Prentice – Hall
- Faherttin Ozturk, Daeyong Lee.(2004).*Analysis of Forming Limits Using Ductile Fracture Criteria*. Department of Mechanical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY12180, USA.
- John A. Schey. (1998). *Introduction to Manufacturing Processis*. Zrd. Boston : Mcgrawhill.
- Natarajan, S. Venkataswamy and P. Bagavathiperumal.(2002). *A Note on Deep Drawing Process: Numerical Simulation and Experimental Validation*. Department of Mechanical Engineering, Anna University, India.
- S.Tiratheararat, T. Tntarkumthopomchai & W.Limtrakarn. (2004). *Finite Flement Simutation study of hemisphericaI Dome Forming Construction of LimitDiagram(FLD) for Sheet Metall Forming Processwps*. Thailand. Nationul Metal And Meterials Technology Centere.
- William F.Hosford and Robert M.Caddel.(1993). *Metal Forming mechanics and Metallurgy* 2nd ed. Lodon : Prentice-Hall International, Inc,
- Z. marciniak, J.L.Duncan,SJ.HU. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Znd .London: Butterworth-Heinemann.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304

สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304

ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) หมายถึง เหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมอย่างน้อย 10.5% ทำให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนโดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ที่บางและแน่นที่ผิวเหล็กกล้าซึ่งจะปกป้องเหล็กกล้าจากบรรยากาศภายนอก

กลุ่มต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)
2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (Austenitic grade)
3. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade)
4. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade)
5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation – hardening grade)

โลหะวิทยา

ที่เรียกว่า “ออสเทนไนต์” เนื่องจากสแตนเลสชนิดนี้มีโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กแบบ face centered cubic (fcc) ณ อุณหภูมิปกติ

โครงสร้างของสแตนเลสชนิดออสเทนไนต์มีเสถียรภาพสูง (มีปริมาณนิเกิลสูง) สามารถคงสภาพอยู่ในอุณหภูมิเย็นจัดจนกระทั่งร้อนจัดถึง 925°C เช่นเดียวกับเฟอร์ริติกออสเทนนิคไม่สามารถชุบแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำเย็นที่อุณหภูมิห้อง เว้นแต่จะใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็น

เกรดออสเทนนิคที่มีเสถียรภาพต่ำ (ซึ่งมีปริมาณนิเกิลต่ำ) ก็ยังจะแปรรูปบางส่วนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ด้วยการขึ้นรูปเย็น

การให้อุณหภูมิ 425°C ถึง 800°C เป็นเวลานาน จะเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนที่ขอบเกรนในเกรดที่มีคาร์บอนสูง

ออสเทนไนต์มักจะใช้ในสถานะที่ผ่านสมบูรณ์แล้ว ซึ่งจะช่วยให้อยู่ในสภาพไม่ติดแม่เหล็ก อย่างไรก็ตาม หลังการขึ้นรูปเย็น (Cold work) เกรดออสเทนไนต์ อาจมีสภาพติดแม่เหล็กอย่างอ่อนได้

ผลกระทบของธาตุ โลหะผสมต่างๆ ต่อเสถียรภาพของโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความสามารถในการขึ้นรูป การเชื่อม และความต้านทานการกัดกร่อน ได้นำไปสู่การพัฒนาเกรดออสเทนไนต์ชนิดต่างๆ ดังที่แสดงในแผนภูมิ

ตาราง 2 สมบัติและการใช้งานตามเกรด บริษัท ไทยน็อกซ์ สตีล จำกัด

	เกรดของ ไทยน็อกซ์	รายละเอียด	การใช้งาน
เฟอริติก	TNX SC17	เกรดพื้นฐานที่ผสมโครเมียม	เตาแก๊ส, อ่างล้างจาน, เครื่องใช้ในครัว, ตกแต่งภายใน
ออสเทนนิติก	TNX S189	เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด ทนการกัดกร่อน สามารถขึ้นรูป เย็นและเชื่อมได้ดี	เครื่องใช้ในครัวเรือน, อ่างล้าง จาน, เครื่องล้างจาน, แทงค์น้ำ, อุปกรณ์จัดเลี้ยง, งานตกแต่ง
	TNX D189	เกรด 304 แต่มีนิเกิลอย่างน้อย ที่สุด 8.5% ซึ่งทำให้ขึ้นรูปได้ดี	เครื่องใช้ในครัวเรือน, อ่างล้างจาน , อุปกรณ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร, ส่วนประกอบเครื่องยนต์
	TNX DDQ189	เกรด 304 แต่มีสมบัติขึ้นรูป ได้ดีที่สุดเนื่องจากมีนิเกิลอย่าง น้อยสุด 9%	อ่างล้างจาน, บานประตู, เครื่อง ล้างจาน, ส่วนประกอบแต่งที่ขึ้น รูปลึก

ตาราง 3 เปรียบเทียบมาตรฐาน และส่วนประกอบทางเคมี

เรดของไทเทเนียม	ค่าเปรียบเทียบเท่ากับ			ส่วนประกอบทางเคมี				
	TISI มาตรฐาน ไทย	JIS มาตรฐาน ญี่ปุ่น	ASTM มาตรฐาน อเมริกัน	คาร์บอน C	โครเมียม Cr	นิกเกิล Ni	ซิลิเนียม Si Max.	แมงกานีส Mn Max.
TNX SC17	SST 430	SUS 430	430	≤0.12	16.0- 18.0	-	0.75	1.0
TNX S189	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0- 20.0	8.0-9.0	0.75	2.0
TNX SC17	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0- 20.0	8.0-9.0	0.75	2.0
TNX SC17	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0- 20.0	8.0-9.0	0.75	2.0

ตาราง 4 ผิวสำเร็จชนิดต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิดของผิว (Surface finish)	ลักษณะ
No.	ผิวผ่านการรีดร้อน อบอ่อน ขจัดสนิมและกัดกรวด (Descaling & Pickling) ผิวมีสีเทา ค่อนข้างหยาบเนื่องจากผ่านการกัดกรวดที่รุนแรง
2D	ผิวผ่านการรีดเย็น อบอ่อนและกัดกรวด
2B	ผิวผ่านการรีดเย็น อบอ่อน กัดกรวดและรีดปรับความเรียบผิว (skin pass rolling)
BA	ผิวผ่านการรีดเย็นและอบอ่อนในสภาพบรรยากาศควบคุมทำให้ผิวมีลักษณะมันเงา
No.3	ผิวที่ผ่านการขัดด้วยวัสดุสำหรับขัดเบอร์ 100 - 120
No.4	ผิวที่ผ่านการขัดด้วยวัสดุสำหรับขัดเบอร์ 150 - 180
#240	ผิวที่ผ่านการขัดด้วยวัสดุสำหรับขัดเบอร์ 240
#320	ผิวที่ผ่านการขัดด้วยวัสดุสำหรับขัดเบอร์ 320
#400	ผิวที่ผ่านการขัดด้วยวัสดุสำหรับขัดเบอร์ 400
HL	ผิวผ่านการขัดละเอียดโดยมีรอยขีดเป็นเส้นต่อเนื่องคล้ายเส้นผม (Hair line)

ภาคผนวก ข

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไต SUS 304

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่า K, r, n เพื่อเป็นข้อมูลให้กับโปรแกรมการจำลองการขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (AUTOFORM 3.26)



ภาพประกอบ 64 ขนาดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน



ภาพประกอบ 65 เครื่องทดสอบการดึง (Universal Testing machine, Dynamic type)

การทดสอบการดึงขึ้นทดสอบมีความจำเป็นต่องานที่ก้อัทรการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดขึ้นทดสอบที่เป็นจริงตลอดช่วงการทดสอบ เพื่อนำมาคำนวณหาความเค้นจริง ความเครียดจริง จากนั้นจึงมาลงจุดเป็น



ภาพประกอบ 66 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืด (Extensometer)



ภาพประกอบ 67 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดด้านขวาง (Extensometer)

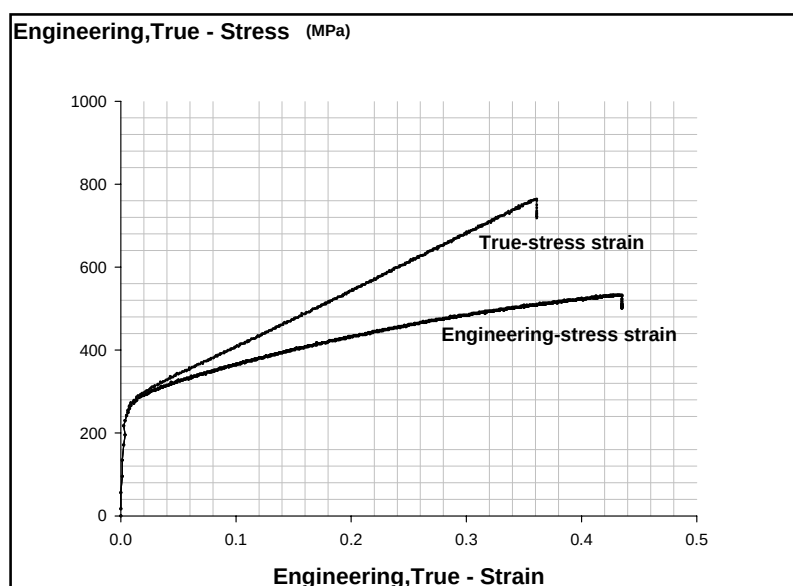
การทดสอบหาสมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.4 mm.

1. นำค่าจากการทดสอบการดึง (Tensile test) มาลงจุดสร้างแผนภาพความเค้นจริง (True stress) ความเครียดจริง (True strain)

Speed	5 mm/min								
Length	50 mm								
Width	12.5 mm								
Thickness	0.58 mm								
			Zero_Set (Axial)		Zero_Set (Transverse		Engineering Strain-Stress		
extenso_L Tensile_MC	extenso_T(mm)		extenso_L Tensile_MC(kN)		extenso_T Tensile_MC(kN)		extenso_L Tensile_MC(MPa)		
-0.20287	0.026621	-0.00251	0	0	0	0	0	0	
-0.20287	0.026621	-0.00087	0	0	0.001634	0	0	0	

ภาพประกอบ 68 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test)

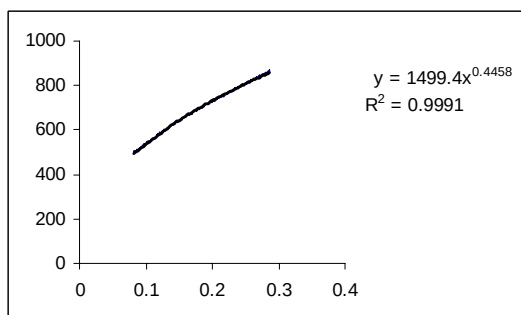
การบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (gauge length) 50 mm. เครื่องบันทึกข้อมูลจะสามารถบันทึกได้ประมาณ 30,500 ค่า และคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel) จะได้ค่าความเค้นความเครียดวิศวกรรม



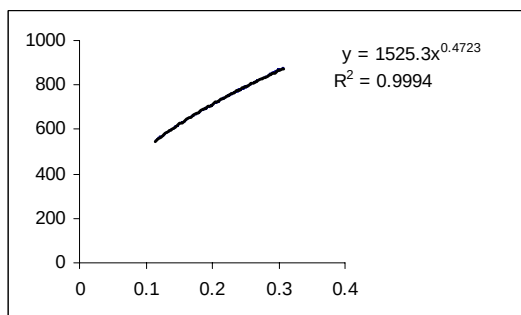
ภาพประกอบ 69 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.40 mm.

2. จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกที่ดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ

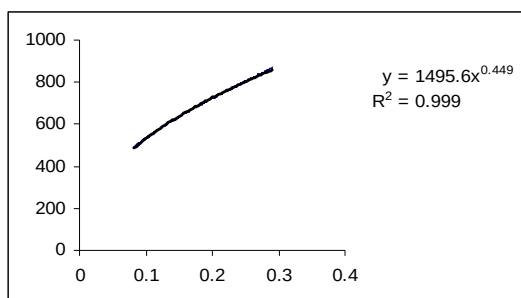
จากแผนภาพชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1499$ และ ค่า $n = 0.4458$



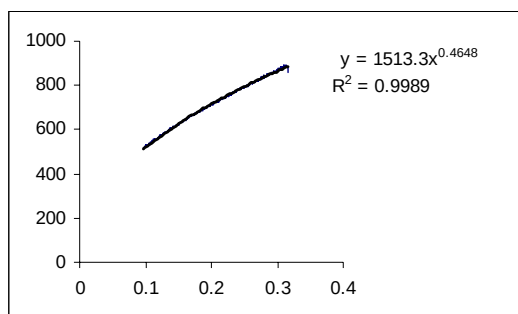
จากแผนภาพชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1525$ และ ค่า $n = 0.4723$



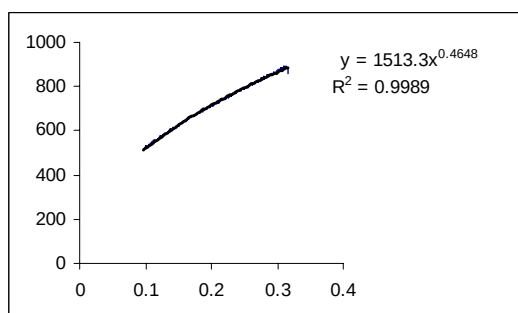
จากแผนภาพชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1495.6$ และ ค่า $n = 0.449$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1513.3$ และ ค่า $n = 0.4648$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1515.5$ และ ค่า $n = 0.4648$

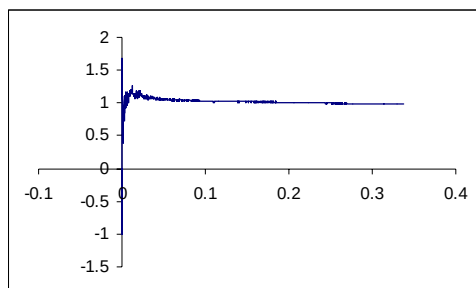


คำนวณหาค่าเฉลี่ย K รวม $(1499+1525+1495.6+1513.3+1513.5)/5 = 1509.28$

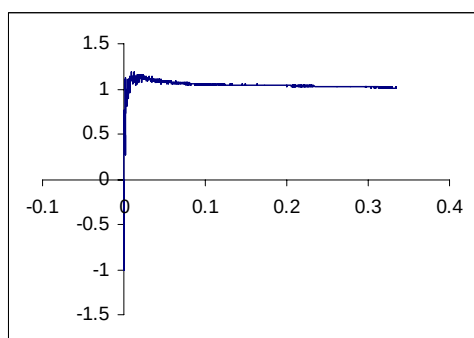
คำนวณหาค่าเฉลี่ย n รวม $(0.4458+0.4723+0.449+0.4648+0.4448)/5 = 0.36238$

3. หาค่าแอนไอโซทรอปีคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling direction) หนา 0.4 mm. ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด

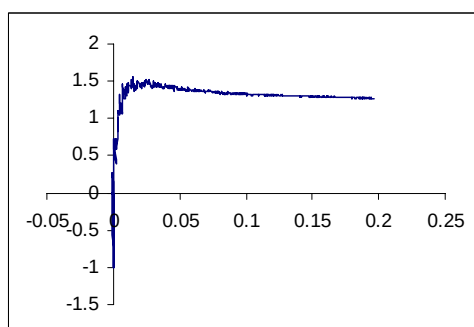
ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 0 องศา $r_{0^\circ} = 1.022$



ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 45 องศา $r_{45^\circ} = 1.3$

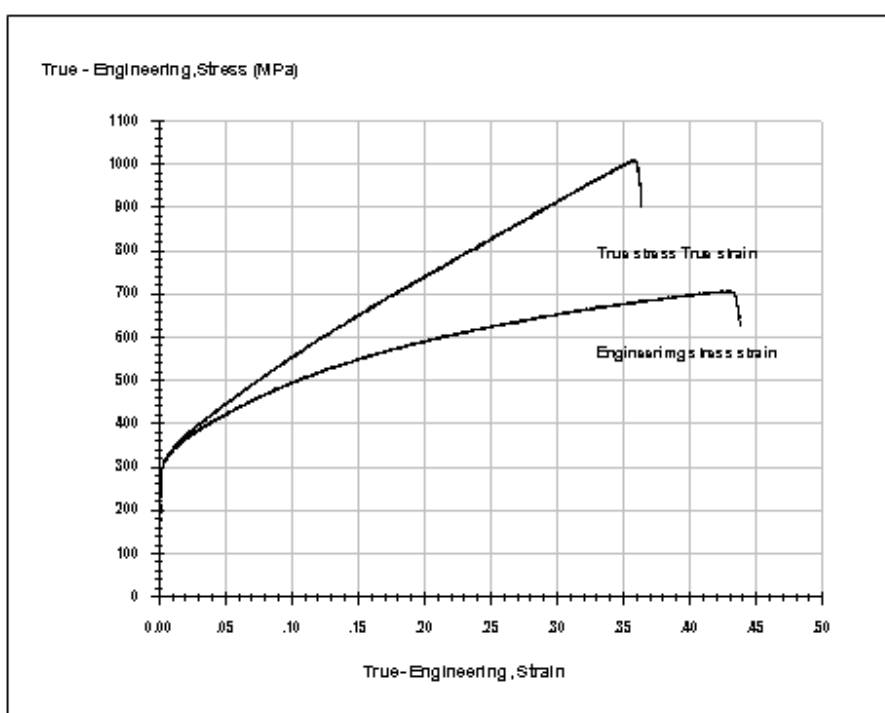


ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 90 องศา $r_{90^\circ} = 0.954$



2. การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.58 mm.

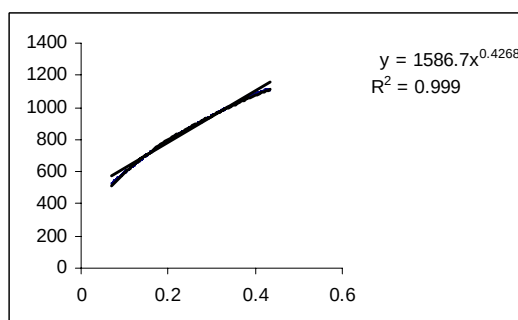
1. การบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (Gage length) 50 mm. เครื่องบันทึกข้อมูลจะสามารถบันทึกได้ประมาณ 30500 ค่า และคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel) จะได้ค่าความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม



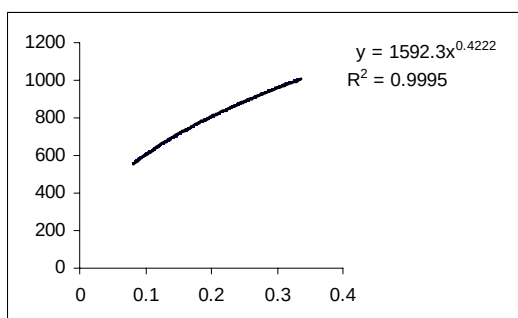
ภาพประกอบ 70 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หน้า 0.58 mm.

2. จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง ทำการหาค่า K , n จากแผนภาพช่วงพลาสติกที่ดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบกำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ

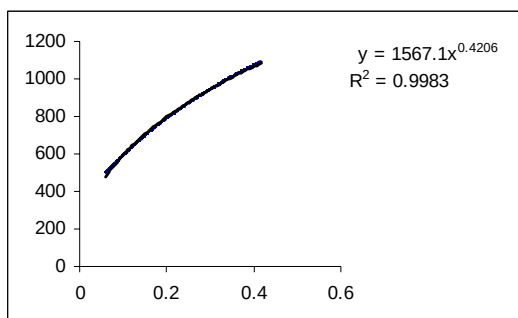
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1586.7$ และ ค่า $n = 0.4268$



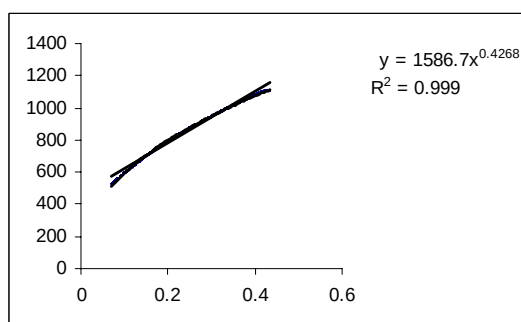
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1592.3$ และ ค่า $n = 0.4222$



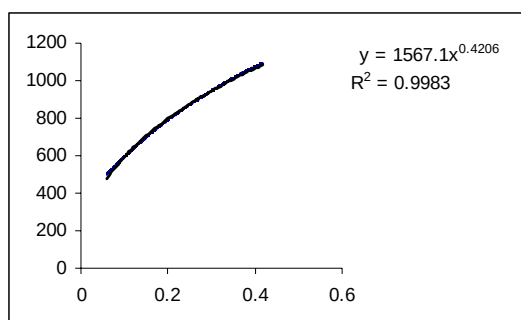
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1567.1$ และ ค่า $n = 0.4206$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1586.7$ และ ค่า $n = 0.4268$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1567.1$ และ ค่า $n = 0.4206$

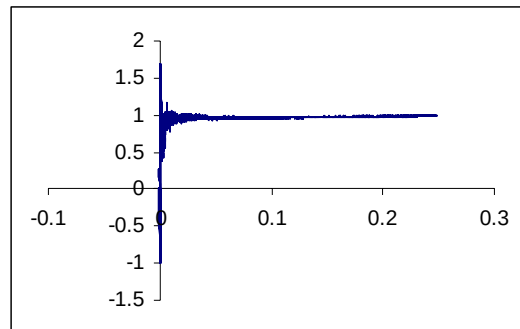


หาค่าเฉลี่ย K รวม $(1586.7+1592.3+1567.1+1586.7+1567.1)/5 = 1582$

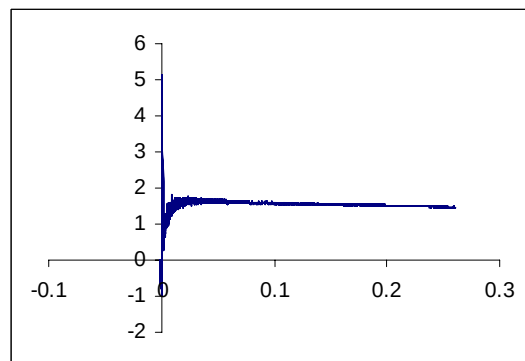
หาค่าเฉลี่ย n รวม $(0.4268+0.4222+0.4206+0.4268+0.4206)/5 = 0.4232$

3. หาค่าแอนไอโซทรอปีคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling direction) หนา 0.58 mm. ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด

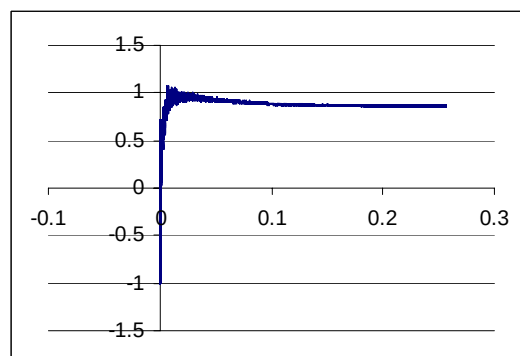
ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 0 องศา $r_{0^\circ} = 0.976$



ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 45 องศา $r_{45^\circ} = 1.487$

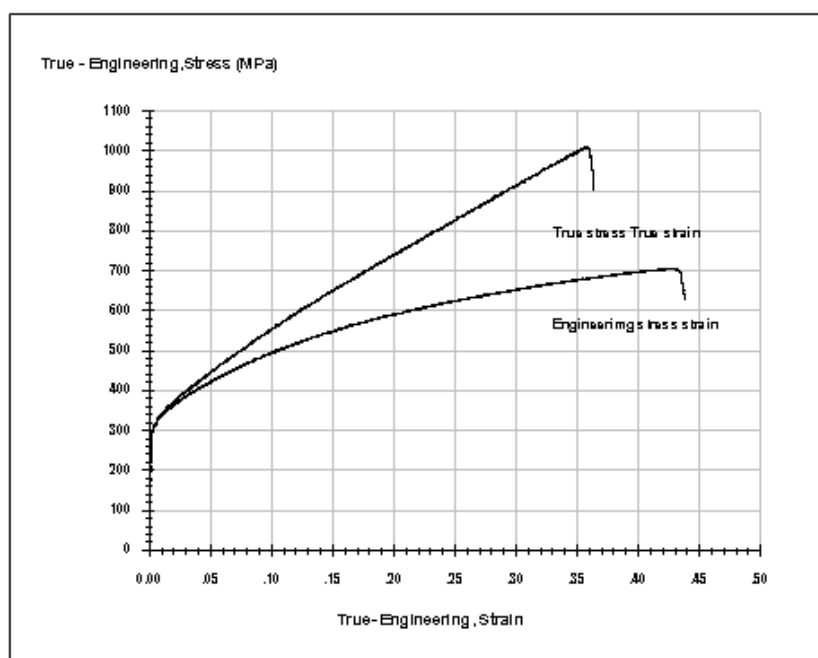


ขั้นตอนทดสอบกระทำกับแนวทิศทางการรีด 90 องศา $r_{90^\circ} = 0.839$



3. การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.78 mm.

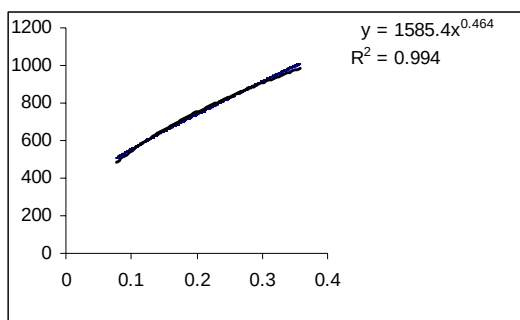
1. การบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (Gage length) 50 mm. เครื่องบันทึกข้อมูลจะสามารถบันทึกได้ประมาณ 30,500 ค่า และคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel) จะได้ค่าความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม



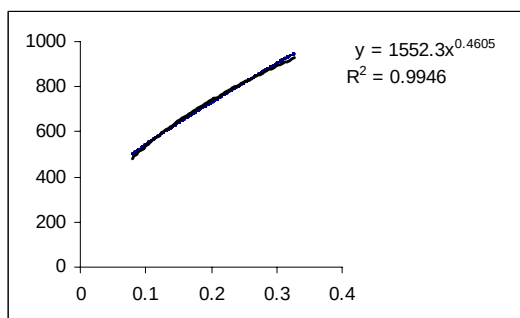
ภาพประกอบ 71 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจริง และความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 หนา 0.78 mm.

2. จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง ทำการหาค่า K, n จากแผนภาพช่วงพลาสติกซิตี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ

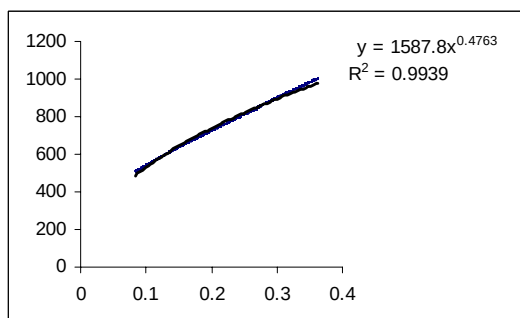
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1585.4$ และ ค่า $n = 0.464$



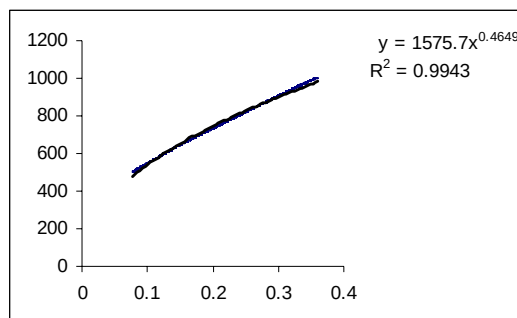
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1552.3$ และ ค่า $n = 0.4605$



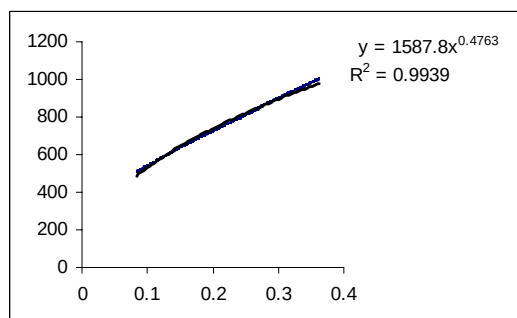
จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 3 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1587.8$ และ ค่า $n = 0.4763$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1575.7$ และ ค่า $n = 0.4649$



จากแผนภาพขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 1587.8$ และ ค่า $n = 0.4763$

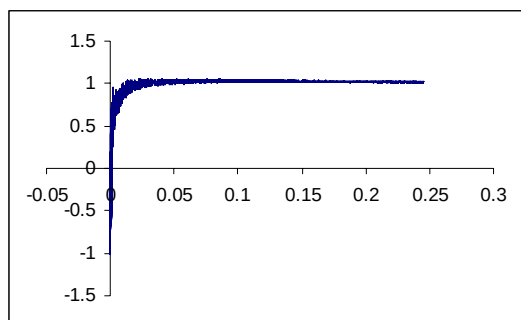


หาค่าเฉลี่ย K รวม $(1585.4+1552.3+1587.8+1575.7+1513.5)/5 = 1575.3$

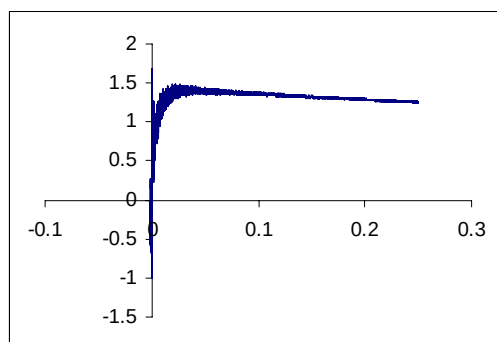
หาค่าเฉลี่ย n รวม $(0.464+0.4605+0.4763+0.4649+0.4763)/5 = 0.466425$

. หาค่าแอนไอโซทรอปีคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling direction) หนา 0.78 mm. ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด

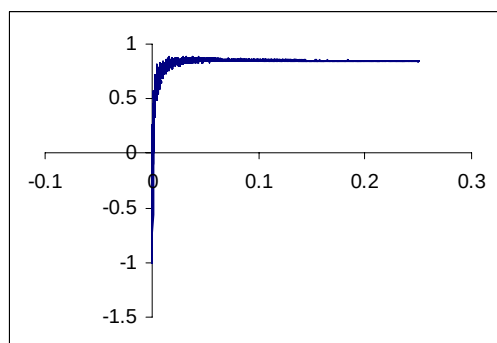
ชั้นทดสอบมุมกระทำกับแนวทิศทางการรีด 0 องศา $r_{0^\circ} = 1.012$



ชั้นทดสอบมุมกระทำกับแนวทิศทางการรีด 45 องศา $r_{45^\circ} = 1.279$



ชั้นทดสอบมุมกระทำกับแนวทิศทางการรีด 90 องศา $r_{90^\circ} = 0.845$



ภาคผนวก ค

การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304

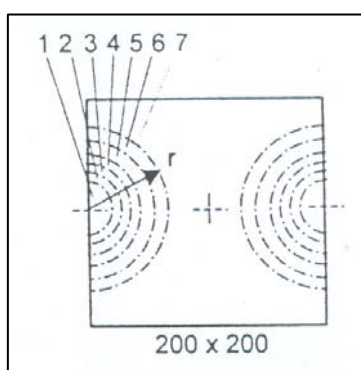
การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ SUS 304 (ขนาดของเครื่องมือและชิ้นทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 2002)

1. ตัดแผ่นชิ้นทดสอบ ขนาด 200 x 200 mm. ใช้ขนาดแผ่นเต็ม (Full Blank) ใช้แผ่นชิ้นทดสอบประมาณจำนวน 90 ถึง 100 แผ่น ต่อหนึ่งเส้นโค้งขีดจำกัด



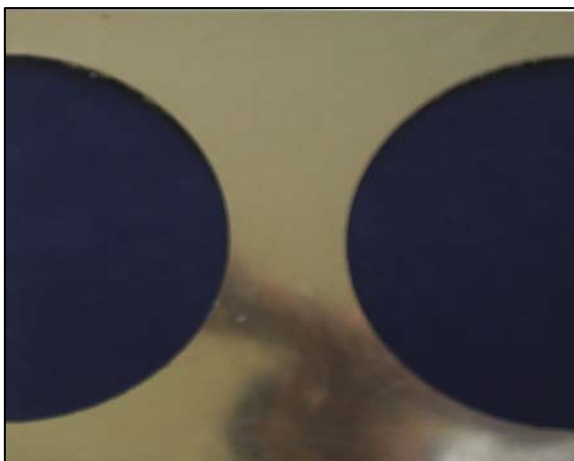
ภาพประกอบ 72 ลักษณะแผ่นชิ้นทดสอบ

2. นำแผ่นชิ้นทดสอบมาตัดรัศมีขอบด้านข้างโดยมีรัศมีโค้ง 40 mm. 50 mm. 57.5 mm. 65 mm. 72.5 mm. และ 80 mm.



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

ภาพประกอบ 73 ลักษณะการตัดส่วนโค้งด้านข้างที่รัศมีต่างๆ



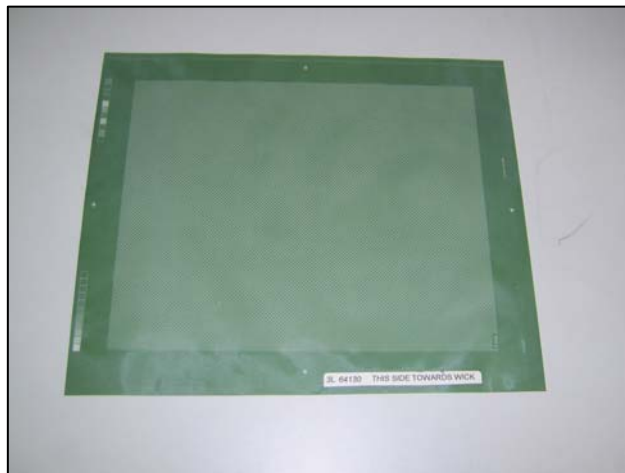
ภาพประกอบ 74 ลักษณะแผ่นชั้นทดสอบที่ถูกตัดด้านข้าง

3. นำแผ่นชั้นทดสอบมาสร้างกริดวงกลม

- 3.1 ใช้น้ำยาล้างทำความสะอาด ชั้นทดสอบ เพื่อกำจัดคราบน้ำมัน, ไขมันต่างๆ
- 3.2 นำชั้นทดสอบมาวางบนแผ่นรองที่ต่อพ่วงกับขั้วลบอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า
- 3.3 นำแผ่นกริดกรัดกัด (Stencils) มาวางทับซ้อนแผ่นชั้นทดสอบ
- 3.4 นำผ้าสักราชมาชุบน้ำยากรดกัดสูตร LNC – Z Electrolyte สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 วางทับแผ่นกริดกัด
- 3.5 เปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าให้จ่ายขั้วบวกต่อกับลูกกลิ้ง (Lectroetch Roller Marker) และนำลูกกลิ้งกลิ้งทับจนทั้งแผ่น จึงได้กริดวงกลมตามขนาดของแผ่นกริดกรัด



ภาพประกอบ 75 ผ้าสักหลาดสำหรับชุบน้ำยา



ภาพประกอบ 76 แผ่นกรองก๊อต (Stencils)

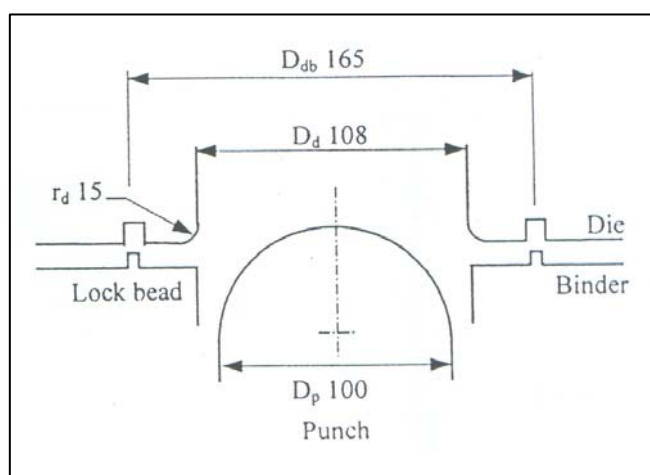


ภาพประกอบ 77 อุปกรณ์สร้างกระแสไฟฟ้า (Electroetch power unit)



ภาพประกอบ 78 ลักษณะการกลิ้งลูกกลิ้ง

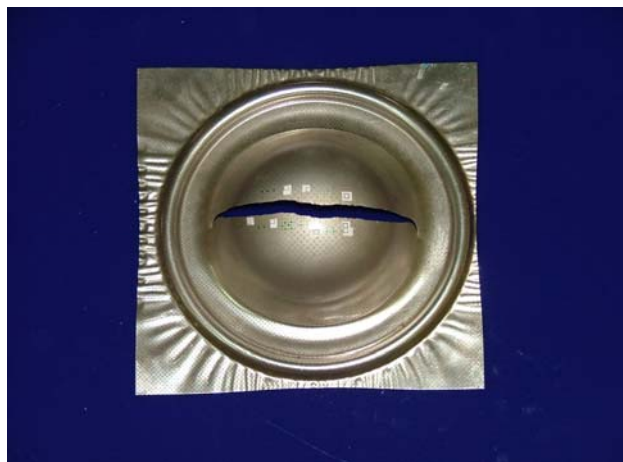
4. นำชั้นทดสอบมาขึ้นรูปโดม โดยนำแผ่นชั้นทดสอบมาวางตรงตำแหน่งศูนย์กลางพอดี โดยใช้สารหล่อลื่น (Renoform) ท่วมบริเวณหัวพิมพ์และชั้นทดสอบ จากนั้นทำการขึ้นรูปในขณะที่ทำการขึ้นรูปต้องทดลองปรับตำแหน่งของลิมิตสวิตช์ เพื่อให้เครื่องหยุดในตำแหน่งที่ชั้นทดสอบเกิดการคอดหรือเสียหายน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 79 แสดงขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโดม



ภาพประกอบ 80 ลักษณะแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโดม



ภาพประกอบ 81 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็ม



ภาพประกอบ 82 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 40 mm.



ภาพประกอบ 83 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 50 mm.



ภาพประกอบ 84 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 57.5 mm.



ภาพประกอบ 85 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 65 mm.



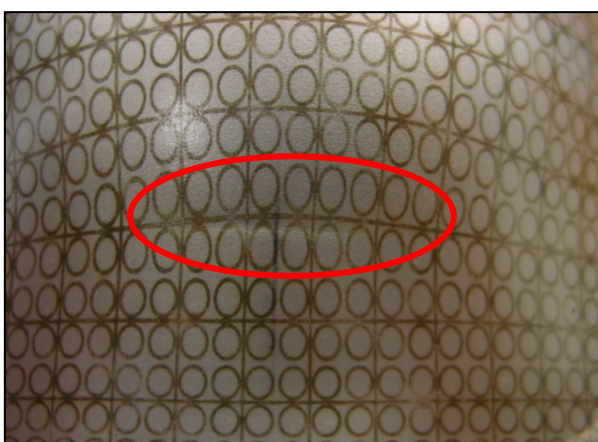
ภาพประกอบ 86 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 72.5 mm.



ภาพประกอบ 87 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากแผ่นเต็มถูกตัดขอบรัศมี 80 mm.

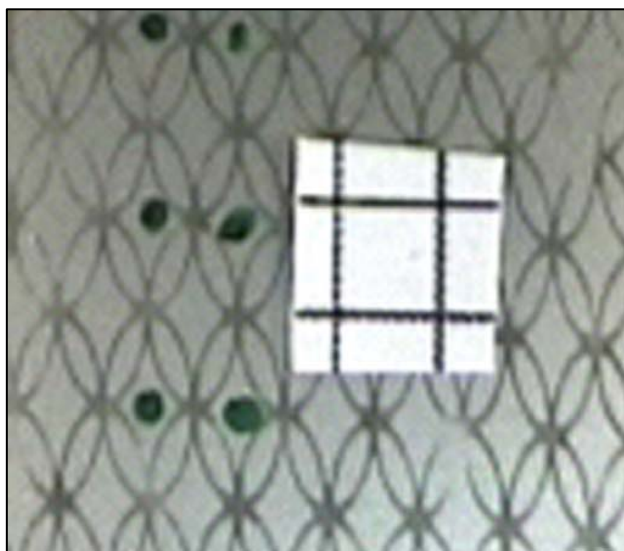
ชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปโดมแล้วแต่ละชิ้นแต่ละรัศมีโค้งนั้นมีขีดจำกัดการขึ้นรูปแตกต่างกันไม่สามารถนำไปพิจารณาจุดที่เกิดการคอดและเกิดความเสียหายได้ทุกชิ้น

5.คัดเลือกชิ้นทดสอบโดยเลือกชิ้นทดสอบที่จุดปลอดภัย จุดที่เกิดการการคอด จุดที่เกิดความเสียหาย ซึ่งชิ้นทดสอบที่มีรัศมีโค้งต่างกัน มีความสามารถสลิปไปกับหัวพินซ์ได้ไม่เท่ากันเพราะฉะนั้นตำแหน่งที่เกิด จุดคอดจุดเสียหายโอกาสที่จะขึ้นรูปแล้วได้พอดีนั้น เป็นไปได้ยาก เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดชิ้นทดสอบต้องมีการปรับตั้งระยะการกดขึ้นรูปอีกครั้ง



ภาพประกอบ 88 ลักษณะชิ้นทดสอบที่เกิดการคอด

6. นำชั้นทดสอบมาติดแผ่นกระดาษอ้างอิงแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2.5 mm. หลังจากที่ได้คัดเลือกชั้นทดสอบได้ลูกที่ตรงแล้ว เพื่อนำไปถ่ายรูปจากกล้องไมโครสโคป จะได้ภาพที่มีความคมชัดของเส้นมากเพื่อให้ค่าที่ถูกตรงมากขึ้นการติดกระดาษบริเวณใกล้จุดที่ตรงการถ่ายภาพนั้น ใช้สำหรับอ้างอิงอัตราส่วนการขยายของภาพ



ภาพประกอบ 89 ลักษณะการติดกระดาษที่ขนาด 2.5x2.5 mm.

7. นำชั้นทดสอบมาถ่ายภาพบริเวณจุดปลอดภัย จุดเกิดการคอด จุดเกิดความเสียหายโดยใช้กล้องถ่ายภาพไมโครสโคปที่อัตรากำลังขยายสูงขึ้น 6.5 เท่า เพื่อให้ได้ภาพที่มีความคมชัดของเส้นกริดวงกลม ให้ความถูกต้องมากที่สุด



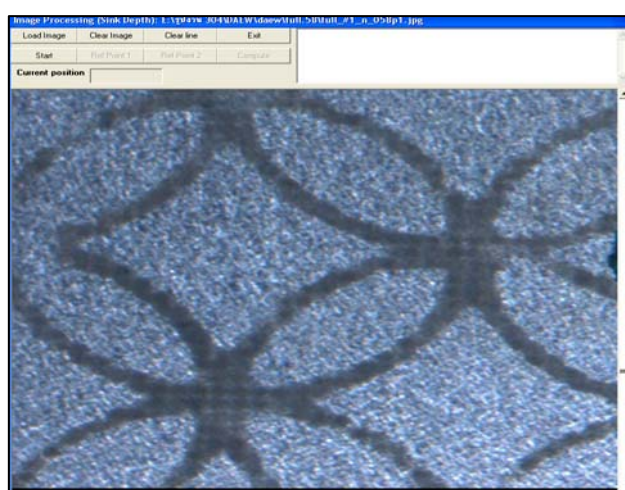
ภาพประกอบ 90 ลักษณะกล้องไมโครสโคปที่ใช้ถ่ายภาพ และการบันทึกภาพ



ภาพประกอบ 91 ลักษณะภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป

ในการถ่ายภาพแต่ละจุดนั้นต้องพยายามให้แผ่นกระดาษใกล้กับตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อให้อัตราส่วนขยายของภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด

8. วัดขนาดการเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลมโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปดีแคล (Program dcal) วัดขนาดการเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่าย ขนาดที่วัดได้มีหน่วยเป็นพิกเซล (Pixel) ในการวัดค่าแต่ละจุดนั้นจำเป็นจะต้องวัดค่าระยะของเส้นบนแผ่นกระดาษที่ติดอยู่ด้วยทุกครั้ง ไม่ว่าภาพจะมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือเล็กลงขนาดระยะห่างของความจริงคือ 2.5 mm. และใช้เป็นระยะอ้างอิงในการคำนวณ

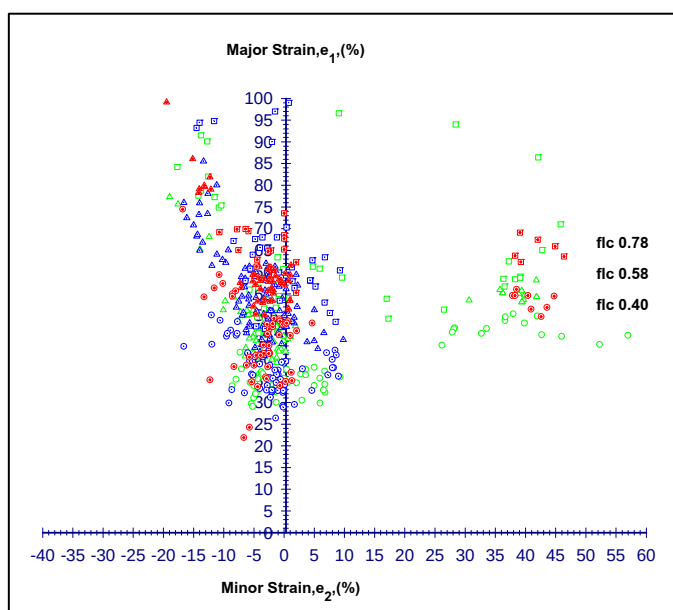


ภาพประกอบ 92 ลักษณะการแสดงผลของโปรแกรมดีแคล

9. คำนวณหาค่าความเครียดหลัก e_1 ความเครียดรอง e_2 ในหนึ่งจุดที่มีการวัดจะทำการคำนวณหาทั้งสองค่า โดยใช้สูตรดังนี้

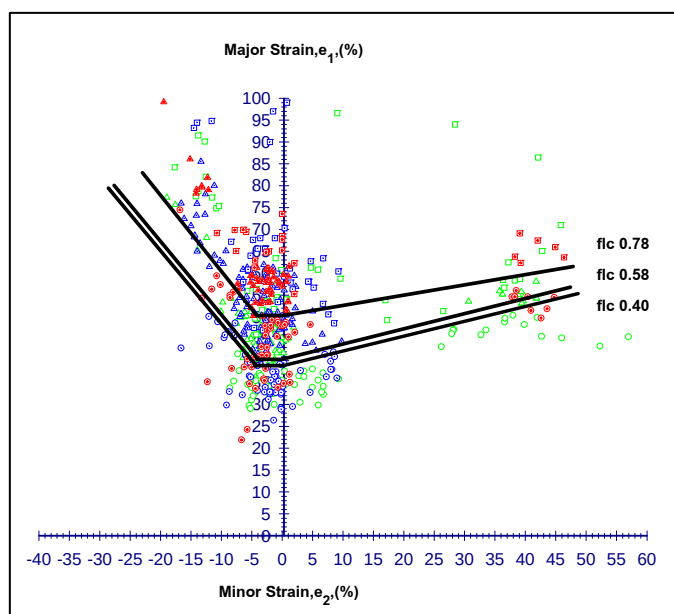
$$e_1, e_2 = \frac{\text{จำนวนปิกเซลที่วัดได้ตรงจุด} - \text{จำนวนปิกเซลของกระดาษ}}{\text{จำนวนปิกเซลของกระดาษ}} \times 100\%$$

10. ระหว่างค่าความเครียดหลัก ความเครียดรองลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นความสัมพันธ์ ค่าความเครียดหลักกับความเครียดรอง (แกน x, e_2) (แกน y = e_1) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่ได้จากการวัดและการคำนวณในแต่ละจุดจะได้ค่า e_1, e_2 เป็นค่าพิกัด เฉพาะฉะนั้นการวัดค่าหนึ่งวงกลมจะได้ข้อมูลมาลงจุดหนึ่งจุด



ภาพประกอบ 93 การลงจุดค่าความเครียดจุดปลอดภัย จุดเกิดการคอด จุดเสียหาย
ในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

11. ลากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยให้แนวเส้นอยู่ระหว่างจุดปลอดภัยและจุดที่เกิดการ
การคอดจะได้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพประกอบ 94 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองนำไปใช้งาน

ภาคผนวก ง

วิธีทดสอบสำหรับอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) สำหรับโลหะแผ่นตามมาตรฐาน

ASTM E 517-92 a

วิธีทดสอบสำหรับอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) สำหรับโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E 517-92 a

(Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal: E 517-92 a)

1. ขอบเขต

1.1 วิธีทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการทดสอบการดึงพิเศษสำหรับวัดเพื่อหาอัตราส่วนความเครียดพลาสติก r ของโลหะแผ่น ที่เน้นในการประยุกต์ใช้สำหรับการตีปดรอว์

1.2 ค่าที่ระบุในหน่วยนี้ – ปอนด์จะถือเป็นค่ามาตรฐานส่วนค่าโดยประมาณของหน่วย SI จะเป็นค่าเทียบเท่า

2. เอกสารอ้างอิง

2.1 มาตรฐาน: ASTM

E 6 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางเชิงกล

E 8 วิธีทดสอบการดึงของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับโลหะ

E 83 แบบฝึกสำหรับการปรับและการแบ่งระดับของเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์

E 92 วิธีทดสอบสำหรับหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับโลหะ

3. ข้อกำหนด

3.1 คำนิยามของหัวข้อพิเศษในมาตรฐานนี้

3.1.1 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก r (ในโลหะแผ่นคือค่าความเครียดโดยการดึงตามแนวแกนที่เพียงพอจะก่อให้เกิดการไหลทางพลาสติก) คืออัตราส่วนของความเครียดจริงที่เกิดขึ้นในทิศทางความกว้าง w ตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นที่กระทำในระนาบของแผ่นโลหะต่อความเครียดจริงที่เกิดขึ้นในทิศทางความหนา t , ดังนั้นค่า r จึงเท่ากับ

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t \quad (1)$$

เมื่อ ε_w = ความเครียดในแนวความกว้าง, ε_t = ความเครียดในแนวความหนา

3.1.1.1 ข้อโต้ตอบ—เนื่องจากความยากในการวัดความหนาที่เปลี่ยนไปให้มีความถูกต้องที่เพียงพอ ในทางปฏิบัติให้ได้ค่าที่เท่ากับการใช้ปรกติจึงให้ใช้พื้นฐานการวัดความเครียดด้านความยาวและความกว้าง

3.1.2 r_m —ค่าเฉลี่ยของค่า r หาได้ใน 3 ทิศทางคือ 0 องศา(ขนาน), ทำมุม 45 องศา และ 90 องศา(ตามขวาง)กับทิศทางการรีด (ดูหัวข้อ 9.3)

3.1.2.1 ข้อโต้ตอบ—วัสดุบางชนิดอาจจะแสดงทิศทางของค่า r ที่แตกต่างไปจากทิศทางการทดสอบ ในกรณีค่าเฉลี่ยอาจจะประกอบด้วยเครื่องหมายพิเศษหรือตัวห้อยอื่นๆที่ใช้เพื่อเลี่ยงความสับสนกับค่า r_m ดังที่กำหนดใน 3.1.2 สัญลักษณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วย r_m คือ ค่า $\bar{r}$ และ $r\text{-Bar}$

3.1.3 เดลต้า r (Δr)—วัดจากแนวโน้มของโลหะแผ่นที่ดรอว์อย่างไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยดิ่งในบริเวณปีกของชิ้นงานทรงกระบอกจากการตีปดรอว์ในทิศทางที่มีค่า r สูง

3.1.3.1 ข้อโต้ตอบ—ในแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิดรีดเย็นและอบคลายความเครียด ค่า r_0 และค่า r_{90} โดยปรกติจะสูงกว่าค่า r_{45} ในขณะที่เหล็กที่รีดร้อนค่า r_{45} จะสูงกว่าและมีแนวโน้มการเกิดรอยดิ่ง ด้วยเหตุนี้สำหรับบางวัสดุแนวโน้มการเกิดรอยดิ่งอาจจะแทนโดย $r_{\max} - r_{\min}$ ได้ดีกว่า

3.1.4 การยึดที่จุดคราก(สำหรับวัสดุที่มีจุดคราก) เป็นสิ่งที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงรวมด้วยการครากที่ไม่ต่อเนื่อง

3.2 คำนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการดิ่งเกิดขึ้นในข้อกำหนด E6 จะประยุกต์ใช้ในวิธีนี้

4. ความสำคัญและการใช้งาน

4.1 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก r เป็นตัวแปรที่บ่งชี้ความสามารถของโลหะแผ่นต่อความต้านทานการบางหรือการหนา เมื่อเกิดแรงดึงหรือแรงกดอย่างใดอย่างหนึ่งมากกระทำในระนาบของแผ่นโลหะ เป็นการวัดความไม่เป็นเนื้อเดียวของวัสดุ(Anisotropy)ในเชิงพลาสติก และยังเกี่ยวข้องไปถึงการจัดเรียงตัวกันของผลึกในวัสดุที่มีหลายผลึก ความต้านทานการบางหรือการหนายังช่วยในการขึ้นรูปของรูปทรง เช่น ถ้วยทรงกระบอกกันเรียบโดยกระบวนการตีปดรอว์ ดังนั้นค่า r เป็นค่าที่วัดเพื่อพิจารณากำหนดความสามารถในการดรอว์ของโลหะแผ่น เป็นสิ่งที่มีประโยชน์โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดมุ่งหมายเพื่อการประเมินวัสดุสำหรับชิ้นงานเมื่อทุกส่วนของแผ่นแบลงก์ภายใต้แรงจับยึดถูกขึ้นรูปเข้าไปในช่องว่างของตาย(Die)

4.2 สำหรับวัสดุหลายๆ ชนิดอัตราส่วนนี้ยังจำเป็นต่อค่าคงที่เหนือช่วงของความเครียดพลาสติกขึ้นไปจนถึงแรงสูงสุดในการทดสอบการดิ่ง สำหรับวัสดุที่ให้ค่า r แตกต่างกันระดับความเครียดก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย ตัวห้อยที่ใช้กำหนดเปอร์เซ็นต์ความเครียดตัวอย่างเช่นการยึด 20% ในรายงานแสดงด้วย r^{20}

4.3 ปกติวัสดุมีค่า r แตกต่างกันได้เมื่อได้ทดสอบในทิศทางการรีดที่ต่างกัน มุมของชิ้นตัวอย่างแต่ละแผ่นที่ทำการทดสอบจะแสดงในรูปตัวห้อย ดังนั้นชิ้นทดสอบตามแนวยาวขนานกับทิศทางการรีดถูกรายงานที่ r_0 ถ้าเพิ่มเติมในกรณีที่ทำการทดสอบ 20 % ของความเครียดและจำเป็นจะต้องแสดงค่าที่ได้ทำการวัด ค่าจะถูกรายงานที่ r_0^{20}

4.4 วัสดุที่มีจุดครากตามแบบจุดครากที่ไม่ต่อเนื่อง ในจุดที่เกิดการครากจะมีการยึดตัวแบบไม่สม่ำเสมอ ในเหล็กกล้าความเกี่ยวข้องนี้จะแพร่กระจายของแถบลือเตอร์บนพื้นผิว การ

กระทำซ้ำหลายครั้งเพื่อที่จะกำหนดค่า r ที่ถูกต้องจะถูกลดลงนอกจากว่าการทดสอบอย่างต่อเนื่อง ถัดไปจากการยึดที่จุดคราก ในขณะที่เดียวกันการครากที่ไม่ต่อเนื่องจะเกี่ยวข้องกับเกรนในวัสดุที่มีขนาดใหญ่ การกระทำซ้ำหลายครั้งในการกำหนดค่า r ที่ความเครียดต่ำจะลดความถูกต้องลงมา

5. เครื่องมืออุปกรณ์

5.1 อุปกรณ์การวัด

5.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความยาวและความกว้างควรจะมีการตรวจสอบความถูกต้องและเป็นเครื่องมือที่สามารถวัดความละเอียดได้ถึง ± 0.001 นิ้ว (± 0.02 mm.) หรือดีกว่า

5.1.2 ถ้าความเครียดตามแนวยาวหรือตามขวางหรือทั้งสองที่หาได้จะใช้เอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ ตามวิธีปฏิบัติ E 83 ชั้น C หรือดีกว่า

5.2 เครื่องทดสอบ—เครื่องที่ใช้ในการทดสอบความเครียดของชิ้นทดสอบจะสามารถทำให้เกิดความเครียดตามแนวแกนในชิ้นทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในข้อ 8.1.2.5

6. ชิ้นงานทดสอบ

6.1 ขนาด—ความยาวและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ไม่วิกฤติ ให้ระวังที่จะใช้การยึดของหน้าตัดเกจในการปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอกับการทดสอบทิศทางเดียว หลีกเลี่ยงผลการจับยึดและการเปลี่ยนแปลงความยาวทดสอบที่ผิดปกติ

6.1.1 ชิ้นทดสอบควรจะมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งชิ้น

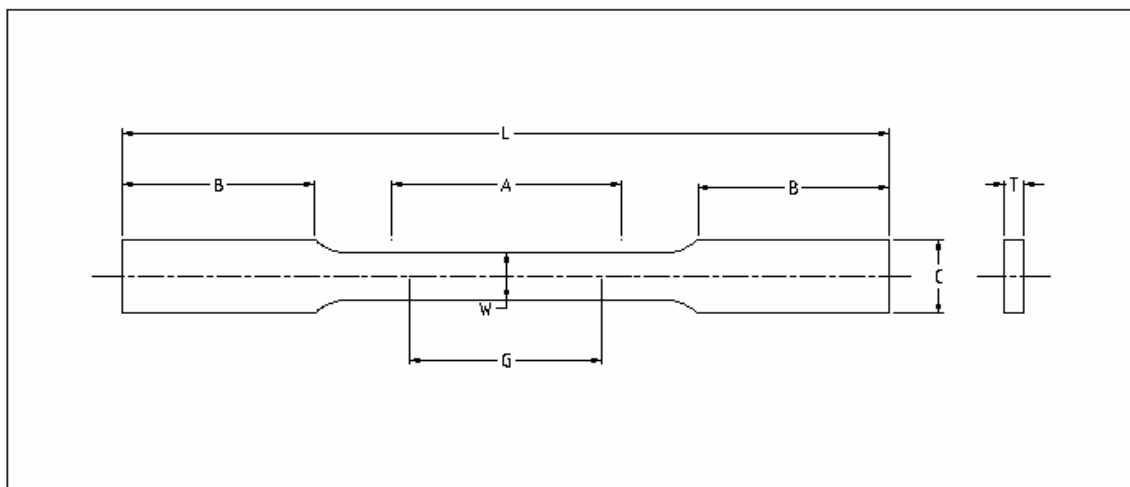
6.1.2 ความหนาของพื้นที่หน้าตัดเกจของชิ้นทดสอบควรจะอยู่ภายใน 0.0005 นิ้ว. หรือ 0.013 mm. ถ้าผิวของโลหะไม่สม่ำเสมอให้ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรหรือโดยการเจียรนัยให้ได้ตามขนาด

6.1.3 ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายเกจและการจับยึดควรจะมีอย่างน้อย 2 เท่าของความกว้างพื้นที่หน้าตัดลดลงของชิ้นงานทดสอบ

6.1.4 ชิ้นทดสอบควรจะทำทดสอบซ้ำๆกันและนำมาหาค่า r เฉลี่ยสำหรับแต่ละทิศทาง ถ้าจำเป็นการทดสอบ 3 ครั้งอาจจะสามารถทำได้ ส่วนที่เกินมาก็ตัดทิ้งไป

6.2 ชนิด—ชิ้นทดสอบจะมีอยู่ 3 ชนิดที่อาจจะถูกใช้ ชนิดอื่นๆรวมอยู่ในชิ้นทดสอบย่อย ถ้าหากว่าค่าที่ให้การเปรียบเทียบมีความถูกต้องเท่ากันก็เป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ชิ้นทดสอบแบบ A

6.2.1 ชิ้นทดสอบ A พร้อมด้วยพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงดังแสดงในภาพ 96—ขณะเดียวกันก็เหมือนกับภาพประกอบ 6 ของวิธีทดสอบ E 8 พื้นที่หน้าตัดที่ลดลงควรมีด้านข้างขนานกันดีกว่าที่จะเป็นรูปรีเว (เทเปอร์)



ภาพประกอบ 95 ชิ้นทดสอบอัตราส่วนความเครียดพลาสติก

ตาราง 5 ขนาดของชิ้นทดสอบอัตราส่วนความเครียดพลาสติก

รายละเอียด	มาตรฐาน		ของเดิม	
	นิ้ว	mm.	นิ้ว	mm.
G ความยาวเกจ	2.00 ± 0.01	50 ± 0.25	1.00 ± 0.005	25 ± 0.13
W ความกว้าง	2.50 ± 0.01	12.5 ± 0.25	0.50 ± 0.01	12.5 ± 0.025
T ความหนา	ความหนาวัสดุ		ความหนาวัสดุ	
R รัศมีของมุมมนขั้นต่ำ	$\frac{1}{2}$	12	$\frac{1}{2}$	13
L ความยาวรวมขั้นต่ำ	8	200	$7 \frac{1}{4}$	180
A ความยาวพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงขั้นต่ำ	3	75	$2 \frac{1}{4}$	60
B ความยาวของพื้นที่จับยึดขั้นต่ำ	2	50	2	50
C ความกว้างพื้นที่จับยึดโดยประมาณ	$\frac{3}{4}$	20	$\frac{3}{4}$	20

7. การเตรียมชิ้นทดสอบ

7.1 แผ่นเบงก์ชิ้นทดสอบควรจะถูกตัดเนื้อหรือถูกเลื่อยด้วยเครื่องจักรแบบเดียวกันหรือการขึ้นรูปเย็นที่ขอบ

7.2 ขนาดของชิ้นทดสอบแต่ละชนิดควรจะมีการวัดลักษณะเดียวกันสำหรับความหนาและความกว้างในพื้นที่หน้าตัดของเกจตามความต้องการที่สอดคล้องในข้อ 6.1.2 และ 7.3

7.3 ภายในช่วงความยาวเกจ ความขนานของขอบควรจะขนานกัน โดยให้ขอบทั้งสองข้างมีความต่างกันไม่เกิน 0.1%-ของความกว้างที่วัดได้

7.4 เหตุควรระวังที่จะกำหนดตำแหน่งเครื่องหมายเกจที่สมมาตรกันไว้ตรงกลางและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบหรือพื้นที่หน้าตัดลดลง

7.4.1 เครื่องหมายเกจควรชี้ตัวอย่างเบาๆหรือตกลงไปที่ผิวชิ้นทดสอบหรือทำขึ้นด้วยหัวเพชรของวิกเกอร์

7.4.2 ความยาวเกจควรจะมีควมยืดหยุ่นตาม 6.1.3 ด้วย

7.4.3 สำหรับชิ้นทดสอบแบบ A พื้นที่หน้าตัดที่ลดลงควรอยู่ตรงกลางของความยาวเกจ

8. วิธีการทดสอบ

8.1 ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติในการดึงของวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งจากการบันทึกของแรง/การยืดตัวในการทำรูปกราฟแบบอัตโนมัติหรือแยกการทดสอบการดึงเพื่อที่จะกำหนดตัวแปรการครากและการยืดตัว ลักษณะการครากที่สอดคล้องกับในวิธีการทดสอบ E 8 ใช้ชิ้นทดสอบที่แสดงในรูป 6 ของวิธีทดสอบ E 8 ในการสร้างขีดจำกัดความเครียดที่ส่วนใดซึ่งอาจจะทำการกำหนดค่า r ได้

8.1.1 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก r อาจจะกำหนดจากผลการเปลี่ยนแปลงความกว้างและความหนาจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ถ้าหากว่าการเปลี่ยนนี้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องที่เพียงพอในการทดสอบการดึง

8.1.2 สำหรับโลหะแผ่นที่บางๆ การวัดความกว้างและความยาวที่เปลี่ยนไปจะโดยวิธีการใดก็ได้แล้วแต่ จะสมมุติฐานให้ปริมาตรคงที่, คำนวณค่า r โดยวิธีดังต่อไปนี้

8.1.2.1 กำหนดความกว้างเดิมของชิ้นทดสอบ W_0 ภายใน ± 0.0005 นิ้ว. หรือ ± 0.013 mm. ถ้าความยาวทดสอบ 0.75 in. หรือ 20 mm.

8.1.2.2 การวัดความยาวเดิม l_0 ภายในพิสัย ± 0.001 นิ้ว.(± 0.025 mm.) ในช่วงความยาวทดสอบ 1.00 นิ้ว.(25 mm.) หรือหน้าตัดทดสอบ 0.75 นิ้ว.(20 mm.)และอยู่ในพิสัย ± 0.002 นิ้ว.(± 0.05 mm.) ที่หน้าตัดทดสอบ 2.00 นิ้ว.(50 mm.)

8.1.2.3 เมื่อทำเครื่องหมายทดสอบด้วยรอย 2 จุด ติดอยู่กับชิ้นทดสอบซึ่งกำหนดระยะไว้ หลังจากทดสอบแล้วจะวัดความยาวและความกว้างทดสอบสุดท้ายตามที่ต้องการ

8.1.2.4 ดึงชิ้นทดสอบไปตามแนวแกนจนกระทั่งเกิดการยืดที่สูงกว่าการยืดที่จุดคราก

แต่ไม่เกินความเครียดที่แรงสูงสุด วัดเหนือขีดจำกัดความเครียดที่เพิ่มขึ้นให้มีความถูกต้องหลังจากที่ได้ปรับปรุงแล้วดังแสดงในหัวข้อ 3.3.1

8.1.2.5 อัตราของความเครียดควรจะอยู่ที่ 0.5/นาทีก หรือน้อยกว่าเว้นเสียแต่จะมีการระบุเป็นอย่างอื่น

8.1.2.6 วัดความกว้าง (W_f) และความยาวทดสอบ (l_f) สุดท้าย ในการกระทำอย่างเดียวกันและพิกัดความเค้นที่เหมือนกับค่าเริ่มต้น ทำการวัดในขณะที่ไม่มีแรงดึงบนชิ้นทดสอบ

9. การคำนวณ

9.1 คำนวณค่า r ตามสมการ

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } \epsilon_w = \ln(W_f/W_o)$$

$$\epsilon_t = \ln(l_f/t_o)$$

สมมติฐานให้ปริมาตรคงที่

$$\epsilon_t = \ln(l_o W_o / l_f W_f) \quad (3)$$

กลับกันตามวิธีการกำจัดค่าลบ จะได้ดังรูป

$$r = \frac{\ln(w_o / w_f)}{\ln(l_f w_f / l_o w_o)} \quad (4)$$

9.1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์บนพื้นฐานของค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายของความยาวและความกว้างทดสอบ อาจจะต้องสร้างขึ้นเพื่อใช้อ่านค่า r ได้โดยตรง

9.2 ใช้ค่า r ทั้งตัวห้อยและตัวยกเพื่อกำหนดขอบเขตการทดสอบที่จำเป็น(ดูส่วนที่ 3)

9.3 คำนวณ ค่า R_m ตามสมการ

$$r_m = (r_o + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (5)$$

9.4 คำนวณแนวโน้มการเกิดรอยดึงตามสมการ

$$\Delta r = (r_o + r_{90} - 2r_{45})/2 \quad (6)$$

10. รายงาน

10.1 รายงานควรจะประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้ที่ให้การยอมรับระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย

10.1.1 รายละเอียดของวัสดุที่ทดสอบ

10.1.2 ชั้นทดสอบที่ใช้และทิศทางของชั้นตัวอย่าง

10.1.3 วิธีการกำหนดความกว้างและความยาว(หรือความหนา)

10.1.4 ความเครียดด้านความยาวที่ใช้

10.1.5 องค์ประกอบพิเศษอื่นๆ ระหว่างการทดสอบ

10.1.6 รายละเอียดข้อสรุปของเครื่องทดสอบ

10.1.7 จำนวนของค่าที่กำหนดและค่า r (ค่าความละเอียด 0.01)

10.1.8 ค่า r_m เฉลี่ย

10.1.9 แนวโน้มการเกิดรอยดึง, Δr , หรือ $r_{\max}-r_{\min}$

11. ความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อน

11.1 ความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนความเครียดพลาสติกจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนของการวัดความเครียด

11.1.1 การใช้วิธีการทดสอบนี้ไม่เชื่อถือต่อการนำระบบใดๆ เข้ามาใช้ทำให้เกิดข้อผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์ที่ได้

11.1.2 ความเที่ยงตรงของค่า r ที่วัดได้จะอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความผันแปร, $v(r)$, นั่นคืออัตราส่วนของการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $s(r)$, ต่อค่าเฉลี่ยที่ได้จาก $v(r) = s(r)/r$

11.2 จากการพิจารณาพื้นฐานทางสถิติ สามารถเขียนค่า $v(r)$ ให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความผันแปรของความเครียดด้านความกว้าง $v(\epsilon_w)$ และความเครียดด้านความยาว $v(\epsilon_l)$ ดังนี้

$$v(r) = (1+r) [(v(\epsilon_w))^2 + (v(\epsilon_l))^2]^{1/2} \quad (7)$$

11.2.1 ต้องการความเที่ยงตรงของการวัดขนาดที่จะนำไปสู่การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรสำหรับค่าความเครียดด้านความยาวและความเครียดด้านความกว้างมีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.025 ตามลำดับ สมมุติฐานให้ $\epsilon_l = 0.1$ และ $r = 1$ ค่าจริงสามารถคำนวณจากการวัดซ้ำๆ กันของขนาดเริ่มต้นและขนาดสุดท้ายตามวิธีการทางสถิติ

11.2.2 การประเมินของ $v(\epsilon_l)$ และ $v(\epsilon_w)$ นำไปสู่การคำนวณ $v(r)$ สำหรับสมมุติฐานของค่า $r=1$ จะได้

$$v(r) = 2 [(0.025)^2 + (0.01)^2]^{1/2} = 0.054 \quad (8)$$

11.2.3 สำหรับต้นแบบเงื่อนไขค่ามากภายใต้ค่า r ที่สามารถวัดได้สำหรับ $0.5 < r < 2$ และ $0.1 < \epsilon_l < 0.2$ ค่า $V(r)$ คาดว่าควรจะประมาณ 0.03 ถึง 0.08

11.3 การกำหนดของค่า r มาก่อนขึ้นอยู่กับความยุ่งยากซับซ้อนของ $v(r)$ บนการประยุกต์ใช้ความเครียดตามแนวแกน ($\mathcal{E}_I$) และค่า r ของตัวมันเอง ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวกของ ASTM E517-92a นี้

ภาคผนวก จ

วิธีทดสอบสำหรับเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด
(n) ของวัสดุโลหะแผ่นตามมาตรฐาน **ASTM E 646-91**

วิธีทดสอบสำหรับเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ของวัสดุโลหะแผ่น

ตามมาตรฐาน ASTM E 646-91

(Standard test method for tensile strain-hardening exponent (n values) of metallic sheet materials: ASTM E 646-91)

วิธีทดสอบนี้สำหรับการกำหนดเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดแรงดึง n โดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลความเค้น-ความเครียดที่หาได้ในการทดสอบแรงดึงตามแนวแกน ข้อมูลการดึงที่หาได้จะอยู่ในรูปของข้อมูลต่อเนื่องและควบคุมอัตราส่วนของระยะทางหรือความเครียด เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดได้กำหนดจากการสังเกตค่าที่แสดงอยู่บนกราฟของค่าความเค้นจริงกับค่าความเครียดจริง สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนในวิธีการนี้คือ

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

เมื่อ σ = ความเค้นจริง ε = ความเครียดจริงช่วงพลาสติก
K = สัมประสิทธิ์ความต้านแรง n = เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

ขอบเขต

1.1 วิธีทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการกำหนดเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด โดย การทดสอบการดึงของวัสดุที่เกี่ยวกับโลหะแผ่น สำหรับพฤติกรรมการไหลของวัสดุช่วงพลาสติกตามเส้นโค้งกำลังที่ให้ไว้ในบทนำ

1.2 วิธีทดสอบนี้สำหรับวัสดุที่เกี่ยวกับโลหะแผ่นมีความหนาอย่างต่ำ 0.005 นิ้ว (0.13 mm.) แต่ไม่หนากว่า 0.25 นิ้ว (6.4 mm.)

1.3 ค่าที่ระบุในหน่วยนิ้ว – ปอนด์จะถือเป็นค่ามาตรฐานส่วนค่าโดยประมาณของหน่วย SI จะเป็นค่าเทียบเท่า

เอกสารอ้างอิง

2.1 มาตรฐาน ASTM:

E 6 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทดสอบทางเชิงกล

E 8 วิธีทดสอบการดึงของวัสดุที่เกี่ยวกับโลหะ

E 517 วิธีทดสอบหาอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) สำหรับโลหะแผ่น

ข้อกำหนด

3.1 คำนิยาม

3.1.1 คำนิยามในหัวข้อที่ให้นี้จะใช้ในคำนิยามตามมาตรฐาน E 6 พร้อมกับเพิ่มเติมหัวข้อพิเศษที่ใช้ตามวิธีการนี้ลงไปด้วย

3.1.2 ความเครียดทางวิศวกรรม (e) —ขนาดค่าที่เปลี่ยนไปตามความยาว (ΔL) ต่อหน่วยความยาวเริ่มต้น (L_0) ตามแนวแกนของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบนั้นคือ $e = (\Delta L)/L_0$

3.1.3 ความเค้นทางวิศวกรรม (S) [FL^{-2}]—ความเค้นตั้งฉากที่แสดงออกมาในหน่วยของแรงที่กระทำ, F , ต่อหน่วยของพื้นที่หน้าตัดเดิม A_0 นั่นคือ $S = F/A_0$

3.1.4 รอยคอด—เริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปแบบไม่สม่ำเสมอหรือการเปลี่ยนรูปช่วงพลาสติกเฉพาะแห่งเป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงเฉพาะแห่ง

3.1.5 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)—เลขชี้กำลังนี้ได้จากการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง $\sigma = K\varepsilon^n$ โดยจะคำนวณจากความชันของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าลอการิทึมของความเค้นจริงและค่าลอการิทึมของความเครียดจริง

3.1.6 สมประสิทธิ์ความต้านแรง (K) [FL^{-2}] ค่าคงที่จากการทดลองจะคำนวณจากข้อมูลที่ดีตามสมมติฐานของความโค้งกำลัง การหาค่าตัวแปรเชิงตัวเลขที่เท่ากันของความเค้นจริงที่ความเครียดจริงเท่ากับ 1.0

3.1.7 ความเครียดจริง (True Strain ε) คือค่าลอการิทึมตามธรรมชาติของอัตราส่วนความยาวทดสอบในชั่วขณะหนึ่ง L ต่อความยาวทดสอบเดิม L_0 นั่นคือ $\varepsilon = \ln (L/L_0)$ หรือ $\varepsilon = \ln (1+e)$

3.1.8 ความเค้นจริง (True Stress, σ) [FL^{-2}] ค่าความเค้นตั้งฉากในชั่วขณะ คำนวณฐานของพื้นที่หน้าตัดในชั่วขณะหนึ่ง A นั่นคือ $\sigma = F/A$ ถ้าไม่มีรอยคอดเกิดขึ้น $\sigma = S (1+e)$

สรุปของวิธีทดสอบ

4.1 วิธีทดสอบนี้ประยุกต์ใช้การแสดงของวัสดุตามเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ต่อเนื่องในบริเวณพลาสติก ใช้วิธีควบคุมอัตราของระยะขจัด (Displacement) หรือความเครียด (Strain) ขณะที่มีความเค้น โดยทั่วไปพื้นที่หน้าตัดที่อยู่ในช่วงขณะนั้นอาจจะประมาณหรือคำนวณโดยสมมติฐานว่ามีปริมาตรคงที่ในช่วงพลาสติก สมการที่แสดงถึงการยอมรับจากการคำนวณของความเค้นจริง, σ , ความเครียดจริง, ε , เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด, n , สมประสิทธิ์ความต้านแรง, K , สำหรับการแบ่งช่วงที่ต่อเนื่องกันของเส้นโค้งความเค้นจริงเทียบกับความเครียดจริง ซึ่งสังเกตตามความสัมพันธ์ที่ได้อธิบายไว้

ความสำคัญและการใช้

5.1 วิธีทดสอบนี้ใช้ประโยชน์สำหรับการประมาณค่าความเครียดที่เกิดรอยคอดในการทดสอบการดึงตามแนวแกนอย่างต่อเนื่อง ตัวแปรที่ได้จากการสังเกตใช้สำหรับการประเมินความสัมพันธ์ของความสามารถในการชดเชยที่ขึ้นรูปของโลหะชนิดเดียวกัน เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดจะวัดความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นในช่วงการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก

5.2 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดอาจจะกำหนดเหนือเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดช่วงพลาสติก หรือส่วนของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่กำหนดโดยข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์

5.3 วิธีทดสอบนี้ไม่ได้มุ่งหมายต่อการใช้ส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นโค้งความเค้นจริงเทียบกับความเครียดจริงซึ่งแสดงพฤติกรรมที่ไม่ต่อเนื่องกัน อย่างไรก็ตามอาจจะใช้วิธีโดยทำให้เส้นโค้งเรียบด้วยเทคนิคที่ได้ตกลงกันไว้

5.4 วิธีการทดสอบนี้เหมาะสมสำหรับการกำหนดความเค้น-ความเครียดแรงดึงของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่นในบริเวณพลาสติกก่อนที่จะเกิดรอยคอด

5.5 ค่า n อาจจะแปรผันด้วยอัตราระยะจัดหรือใช้อัตราส่วนความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโลหะและอุณหภูมิในการทดสอบ

เครื่องมืออุปกรณ์

6.1 เครื่องทดสอบ—เครื่องที่จะใช้สำหรับทดสอบการดึงควรจะปฏิบัติตามความต้องการของแบบทดสอบ E 4 แรงที่ใช้สำหรับกำหนดค่าความเค้นควรจะอยู่ภายในช่วงของเครื่องทดสอบที่กำหนดไว้ในแบบทดสอบ E4

6.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความเครียด—อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการยืดตัวจะปฏิบัติตามความต้องการในชั้น C หรือดีกว่าที่ได้กำหนดในการทดสอบ E 83

ตัวอย่าง

7.1 ตัวอย่างชิ้นงานจะกำหนดจากคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตได้

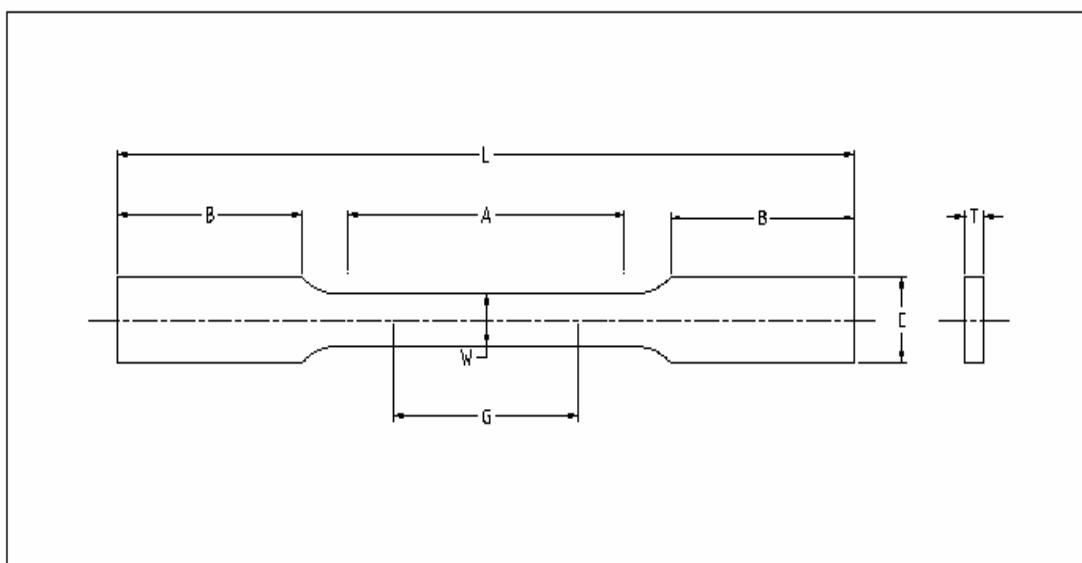
ขั้นตอนทดสอบ

8.1 การเลือกและการเตรียมชิ้นทดสอบ

8.1.1 ในการเลือกแผ่นแบลงก์ของชิ้นทดสอบ สิ่งที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือจะต้องมั่นใจว่าวัสดุที่ใช้ทดสอบมีความเรียบและความหนาสม่ำเสมอ

8.1.2 ในการเตรียมชิ้นทดสอบ สิ่งที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือจะต้องป้องกันการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบ

8.2 ขนาด—รูปร่างของชิ้นทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 96



ภาพประกอบ 96 ชิ้นทดสอบสำหรับการกำหนดค่า n แบบ“Plain-End” Specimen

ตาราง 6 ขนาดที่ต้องการสำหรับการกำหนดค่า n แบบ “Plain-End” Specimen

รายละเอียด	ขนาด		
	นิ้ว		มิลลิเมตร
G ความยาวเกจ	2.000 ± 0.005		50.0 ± 0.01
W ความกว้าง	0.500 ± 0.010		12.5 ± 0.25
T ความหนา	ความหนาของชิ้นทดสอบ		
R รัศมีของส่วนโค้ง, น้อยที่สุด	1/2		13
L ความยาวรวม, น้อยที่สุด	8		200
A ความยาวของการลดพื้นที่หน้าตัด, น้อยที่สุด	$2 \frac{1}{4}$		60
B ความยาวของส่วนที่ใช้จับยึด, น้อยที่สุด	2		50
C ความกว้างของส่วนที่ใช้จับยึด	3/4		20

วิธีการทดสอบ

9.1 วัดและบันทึกความหนาเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงของชิ้นทดสอบอย่างน้อยให้ใกล้เคียงที่สุด 0.0005 in (0.013 mm) และความกว้างของพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงอย่างน้อยให้ใกล้เคียงที่สุด 0.001 in (0.025 mm)

9.2 จับชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบโดยให้แน่ใจว่าตรงตามแนวแกนของชิ้นทดสอบตั้งวิธีการทดสอบในมาตรฐาน E8 และประกอบอิเล็กทรอนิกส์เทนโซมิเตอร์เข้ากับชิ้นทดสอบ

9.3 ความเร็วในการทดสอบ

9.3.1 ความเร็วในการทดสอบควรจะต้องแสดงแรงและความความเครียดอย่างถูกต้องแม่นยำด้วย

9.3.2 ความเร็วทดสอบจะกำหนดในรูปของอัตราการแยกจากกันของหัวจับที่เป็นอิสระต่อกัน ควรจะอยู่ระหว่าง 5% ถึง 50% ของความยาวหน้าตัดที่ลดลงต่อนาที การตั้งความเร็วของหัวจับจะต้องคงที่สำหรับช่วงความเครียดที่จะกำหนดเป็นค่า n

9.3.3 สำหรับอุปกรณ์ของเครื่องจักรที่ควบคุมอัตราความเครียดจะต้องจับยึดให้มั่นคงระหว่างการทดสอบของความเร็วหัวจับ

9.3.4 ถ้าจุดคราก, การยืดที่จุดคราก, ความแข็งแรงที่จุดครากหรือผสมกันอย่างไรอย่างหนึ่งที่กำหนดไว้ด้วยกัน อัตราของความเค้นที่กระทำหรือการแยกจากกันของหัวจับระหว่างการทดสอบควรจะอยู่ในช่วงอนุญาตโดยวิธี E8 หรือค่าเฉพาะอื่นๆ ก็ตาม หลังจากได้ข้อมูลตามที่ต้องการแล้วให้ปรับค่าความเร็วหัวจับให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนดก่อนที่จะทำในขั้นต่อไป

9.4 บันทึกแรงและความเครียดแนวเดียวกันอย่างน้อย 5 ค่า โดยประมาณจากระดับที่เท่ากันของความเครียด รวมทั้งช่วงที่น่าสนใจที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โดยปกติความเครียดมากที่สุดจะเกิดก่อนการบางลงของชิ้นทดสอบในขณะที่แรงสูงสุดและความเครียดต่ำที่สุดจะอยู่ที่จุดคราก (สำหรับวัสดุที่มีการครากแบบต่อเนื่อง) หรือเป็นจุดสุดท้ายของการยืดที่จุดคราก (สำหรับวัสดุที่มีค่าการครากแบบไม่ต่อเนื่อง)

9.4.1 ถ้าค่า n มีหลายค่าจะกำหนดให้ใช้ความเค้นและความเครียดอย่างน้อย 5 ค่าสำหรับการคำนวณค่า n ในแต่ละช่วงของความเครียด

9.4.2 ตัวแปรอื่นๆ อาจจะถูกบันทึกในรูปของแรงและความเครียด แต่สามารถจะแปลงให้อยู่ในรูปของความเค้นจริงและความเครียดจริง อย่างน้อยเทคนิคการวัดที่ใช้จะมีความถูกต้อง ดังจะอธิบายไว้ในบททดสอบนี้

การคำนวณ

10.1 การกำหนดเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดจากรูปแบบค่าลอกการที่มแทนด้วยเส้นโค้งกำลังของค่าความเค้นจริงเทียบกับความเครียดจริงภายในช่วงพลาสติก

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon$$

คำนวณค่าความเค้นจริงและความเครียดจริงจากสมการ

$$\sigma = S(1 + e)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e)$$

เมื่อ σ, ϵ = ความเค้นจริงเทียบกับความเครียดจริงคู่หนึ่งในช่วงการเลือก

S = ความเค้นวิศวกรรม

e = ความเครียดวิศวกรรม

10.2 ค่าลอกการที่มที่หาได้ของความเค้นจริงเทียบกับความเครียดจริงคู่หนึ่งที่คำนวณในข้อ

10.1 จากคู่เซตของการคำนวณ ($\log \sigma, \log \epsilon$) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของ $\log \sigma$ เทียบกับ $\log \epsilon$ ความชัน, n , และค่าผิดพลาดมาตรฐานของความชัน

10.3 สมการสำหรับคำนวณการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log \epsilon_i \log \sigma_i) - \left(\sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \sum_{i=1}^N \log \sigma_i \right)}{N (\log \epsilon_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \right)^2}$$

เมื่อ N = จำนวนของคู่ข้อมูล

10.4 สมการสำหรับการคำนวณความชัน, จุดตัด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันจะทำได้ง่ายขึ้น โดยการกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

$$y = \log \sigma_N = \text{จำนวนของคู่ข้อมูล}$$

$$x = \log \epsilon_{SD} = \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า } n$$

$$b = \log K_n = \text{ค่า } n$$

10.5 สมการสำหรับความชันของเส้นการถดถอยแบบเชิงเส้น สามารถหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดดังสมการ

$$n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

10.6 สมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ของความแข็งแรง (5.7) ดังแสดงไว้ข้างล่างนี้

$$b = \frac{\sum y - n \sum x}{NM}$$

$$K = \exp(b)$$

10.7 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า n เป็นฐานที่ขึ้นกับตัวแปรของความชันของเส้นถดถอย เป็นการวัดความผันแปรที่เกิดขึ้นจากการคำนวณค่า n (10.5) และการคำนวณสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (10.6)

$$SD = \left\{ \frac{\sum (y - b - nx)^2}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \times \frac{N}{N - 2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

รายงาน

11.1 รายงานควรประกอบไปด้วย

11.1.1 ชื่อวัสดุที่มีชื่อเรียกตามรายชื่อมาตรฐานในเชิงพาณิชย์ วัสดุที่ไม่ใช่มาตรฐานเชิงพาณิชย์ควรจะมีการกำหนด

11.1.2 ช่วงของความเครียดที่เหนือกว่าค่า N ควรจะมีการกำหนดไว้

11.1.2.1 ค่า n และที่เกี่ยวข้องกับค่าผิดพลาดมาตรฐานควรมีในรายงาน ควรจะพิจารณาความเหมาะสมกับช่วงความเครียดที่สูงขึ้นสำหรับสิ่งที่ถูกกำหนดไว้

11.1.2.2 จำนวนของคู่ข้อมูลที่เลือกไว้สำหรับคำนวณค่า n

11.1.3 ทิศทางของการทดสอบที่สัมพันธ์กับทิศทางการรีดหลัก

11.1.4 ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนสอดคล้องกับหัวข้อที่ 12

11.1.5 เงื่อนไขพิเศษอื่นๆ ที่คาดว่าจะมีผลกระทบกับผลลัพธ์การทดสอบ

ความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อน

12.1 ความเที่ยงตรงของค่า n ที่มีในรายงาน ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนของข้อมูลความเค้นและความเครียดเดิม

12.2 ความเที่ยงตรงที่มีความสัมพันธ์กันอาจจะกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (COV, Coefficient of Variation) เป็นอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า n ที่ประมาณได้

12.2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ n ขึ้นอยู่กับระดับของความเครียดที่สูงๆ ซึ่ง n ได้ถูกกำหนดบนจำนวนของจุด N ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (ดู 10.4) และปฏิบัติตามคำแนะนำใน E177

12.3 ไม่ประมาณความคลาดเคลื่อนของค่า n ที่เป็นไปได้โดยการคาดคะเนล่วงหน้าจากประสบการณ์ ไม่ใช่ทั้งการประมาณความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้โดยปราศจากการทดลองหรือวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการแก้ปัญหา

ภาคผนวก จ

วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปตามมาตรฐาน

ASTM E 2218-02

วิธีทดสอบสำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปตามมาตรฐานASTME2218-02

(Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves)

- มาตรฐานนี้เกิดขึ้นภายใต้ชื่อที่กำหนดว่า E 2218
- หมายเลขที่ต่อจากชื่อจะระบุถึงปีเริ่มแรกของการนำมาใช้หรือในกรณีที่มีการปรับปรุงใหม่หรือปีล่าสุดที่มีการปรับปรุง
- ตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บจะระบุถึงปีล่าสุดของการให้การยอมรับ
- ตัวอักษรเอปไซลอน(epsilon, ϵ) ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงด้านพฤติกรรมหลังจากมีการปรับปรุงหรือให้การยอมรับ

1. ขอบเขต (Scope)

1.1 วิธีการนี้จะบอกถึงขั้นตอนของการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit curve) สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะแผ่น โดยการใช้การทดสอบของพื้นที่แบบครึ่งวงกลมจนเกิดการเปลี่ยนรูปและการทดสอบการดึงตามแนวแกนต่อการจำลองด้วยปริมาณการดึงขึ้นรูป(Stretch)สองแกนและกระบวนการตีปดรอว์(Dep 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, แผ่นเหล็กกล้าความต้านแรงสูง, แผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ แบบรีดร้อนและรีดเย็น

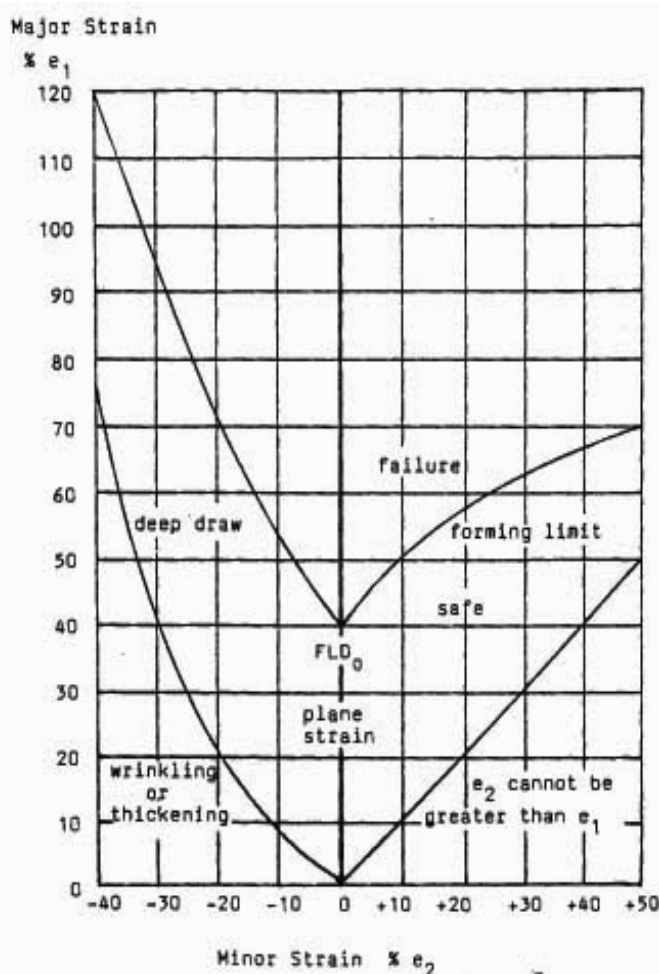
สิ่งที่จำเป็นทั่วไปสำหรับ

E 6 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องถึงวิธีการทดสอบทางเชิงกล

E 8 M วิธีการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เป็นโลหะ(เมตริก)

E 517 วิธีการทดสอบสำหรับอัตราส่วนความเครียดพลาสติก(r) สำหรับโลหะแผ่น

E 646 วิธีการทดสอบสำหรับเลขชี้กำลังการทำได้แข็งด้วยความเครียดการดึง(ค่า n) ของวัสดุที่เป็นโลหะแผ่น



ภาพประกอบ 97 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจาก ASTM E 2218-02

3. ข้อกำหนด (Terminology)

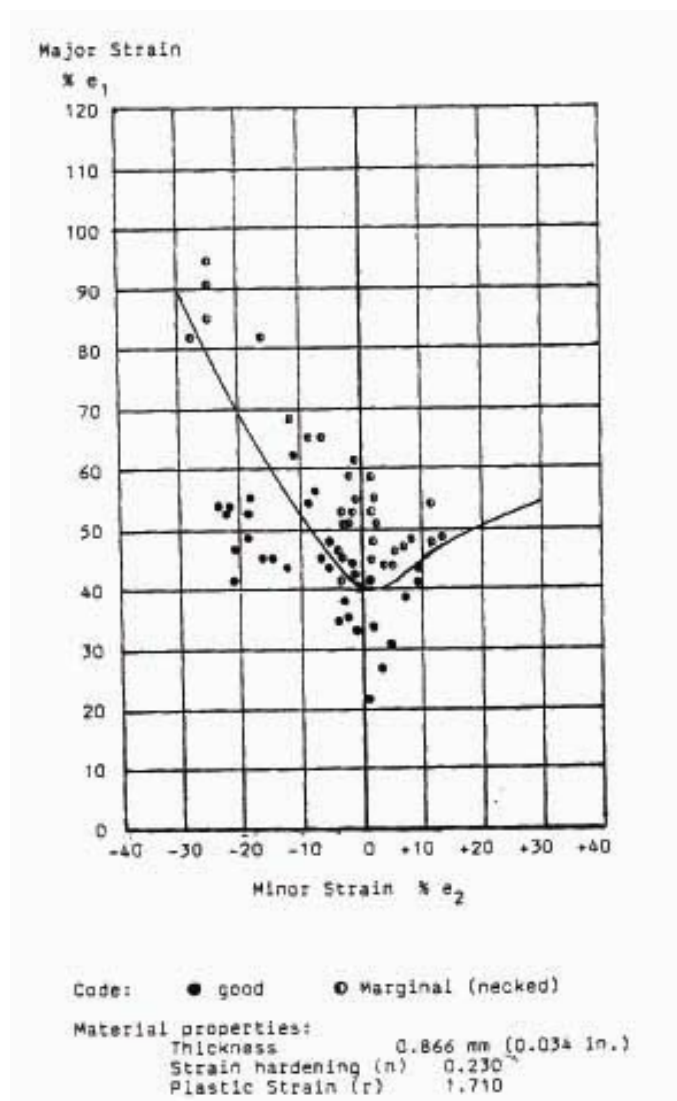
3.1 ข้อกำหนดใน E 6 จะใช้ได้เฉพาะหัวข้อที่ใช้ในวิธีการนี้

3.2 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD)—เป็นกราฟซึ่งเกิดจากการวัดความสัมพันธ์ของความเครียดหลัก(e_1) และความเครียดรอง(e_2) ผสมผสานกันนำมาพล็อตเพื่อการพัฒนาเป็นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(ภาพประกอบ 97)

3.2.1 ข้อโต้ตอบ—สเกลของการแบ่งเป็นชั้นๆบน FLD จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเครียดซึ่งคำนวณจากความยาวทดสอบเริ่มต้น

3.2.2 ข้อโต้ตอบ—ระยะห่างระหว่างเปอร์เซ็นต์ FLD ที่เพิ่มขึ้นจะเหมือนกันทั้งสองแกนความเครียดหลัก (e_1) ขนานกับแกน y ในแนวตั้งและความเครียดรอง (e_2) ขนานกับแกน x ในแนวนอน นอกเสียจากว่าความแตกต่างจะมีบันทึกในรายงานแล้ว

3.3 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC)—เป็นส่วนโค้งที่ได้มาโดยการสังเกตแสดงให้เห็นถึงระดับความเครียดสองแกน ซึ่งถัดไปจากตำแหน่งการเกิดรอยคอด(necking)และความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อมาระหว่างการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ(ภาพประกอบ 98)



ภาพประกอบ 98 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) สำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมเคลือบสีสตีลชนิดรีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์

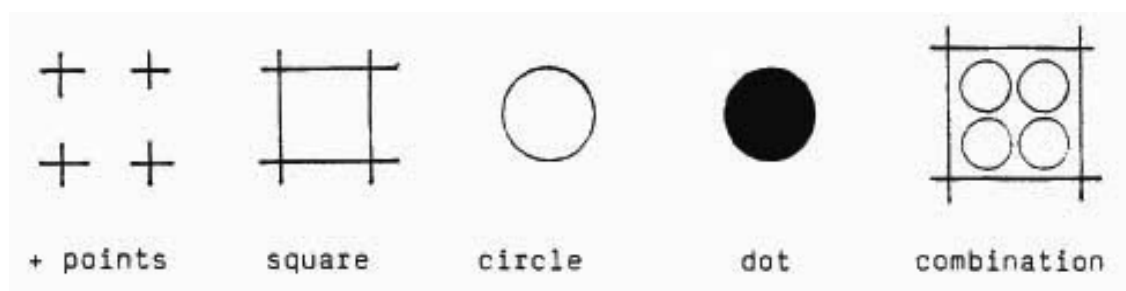
3.3.1 ข้อโต้ตอบ—ส่วนโค้งในภาพประกอบ 98 เป็นขีดจำกัดการขึ้นรูปที่พิจารณา กำหนดสำหรับวัสดุเมื่อโลหะอยู่ภายใต้การทำงานของเครื่องจักรปั๊มขึ้นรูป ซึ่งหามาจากแผ่น เหล็กกล้าอะลูมิเนียมเคลือบสีสตีลชนิดเกรดคุณภาพการดรอว์ ส่วนโค้งในภาพประกอบ 98 จะสัมพันธ์ กับส่วนโค้งบนของภาพประกอบ 97 ซึ่งแทนส่วนโค้งของวัสดุที่เป็นแผ่นโลหะมี FLD_0 เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

3.3.2 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดจะถูกกำหนดขึ้นจากเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและความเครียดรอง โดยทำการวัดหลังจากการขึ้นรูปแผ่นแบลงก์ขึ้นทดสอบที่ต่อเนื่องกัน โดยใช้รูปแบบของกริด ขนาดความยาวของกริดก่อนและหลังการขึ้นรูปชิ้นส่วนจะถูกวัดเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ส่วนโค้งสำหรับความเครียดรองด้านลบ(e_2) ตลอดแนวเส้นโดยทั่วไปจะเป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์พื้นที่ผิวหน้าที่เกี่ยวข้องกับกับความเครียดหลัก(e_1)

3.3.3 ข้อโต้ตอบ—ช่วงที่เป็นไปได้ของความเครียดหลัก(e_1) คือจาก 0 เปอร์เซ็นต์ถึงมากกว่า 200 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่เป็นไปได้ของความเครียดรอง(e_2) คือจาก -40 เปอร์เซ็นต์ถึงมากกว่า +60 เปอร์เซ็นต์หรือแม้แต่ระดับความเครียดที่มากกว่าก็สามารถเป็นได้

3.3.4 ข้อโต้ตอบ—เพื่อให้เกิดความสะดวกเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป สามารถพล็อตในช่วงที่ลดลงของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น ความเครียดหลัก(e_1) จาก +20% ถึง +80% และความเครียดรอง(e_2) จาก -20% ถึง +30% ถ้าการเพิ่มขึ้นของความเครียดหลักต่ำสุด(e_1) ของ FLD ไม่เป็น 0 % ของ e_1 ค่าอันนั้นจะไม่ถูกบันทึกในรายงาน

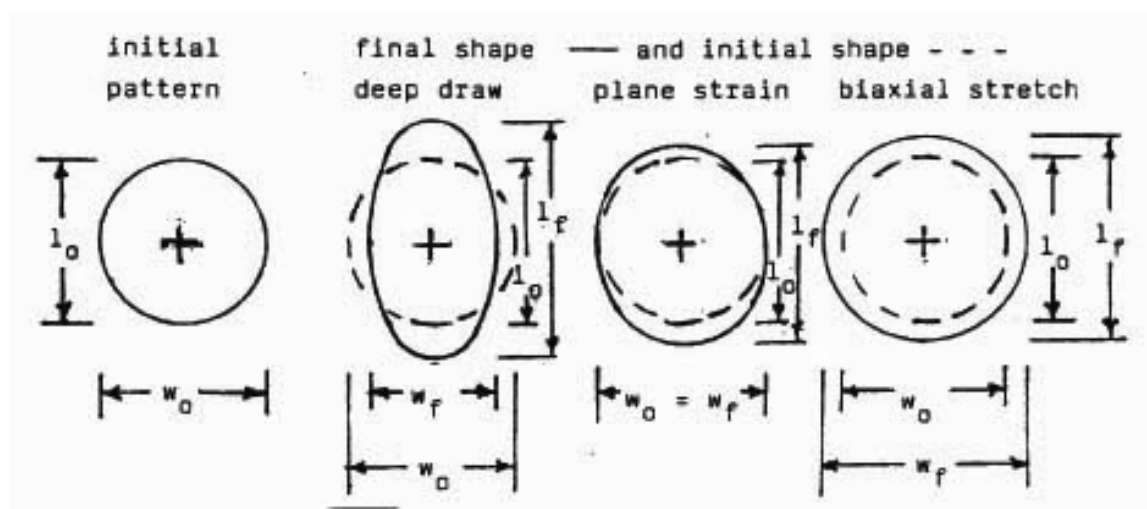
3.4 แบบกริด(Grid pattern)—รูปแบบนี้ใช้กับส่วนพื้นผิวหน้าของแผ่นโลหะเพื่อให้เกิดแถวเรียงต่อกันเป็นพื้นที่ของจุดทดสอบ มีความถูกต้องแม่นยำก่อนที่จะขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปร่างสุดท้ายโดยการใช้แรงขึ้นรูป



ภาพประกอบ 99 แบบตัวอย่างสำหรับวัดความยาวทดสอบใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

3.4.1 ข้อโต้ตอบ—การเรียงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมหรือทั้งสองแบบ จะถูกพิมพ์ลงบนพื้นผิวหน้าดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 99 รูปแบบจะติดอยู่กับโลหะตั้งนั้นมันจะไม่เคลื่อนย้ายจากพื้นผิวหน้าหรือถูกลบออกในขณะที่มีการขึ้นรูป อ้างถึงคุณลักษณะเฉพาะ A568/A568 M ภาพผนวก X4 วิธีการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนรูปช่วงพลาสติก(Plastic Deformation) ที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปหรือการดรอว์ วิธีการใช้ภาพกราฟฟิกและภาพพิมพ์จากระบบเคมีไฟฟ้า(electrochemically) เป็นแบบกริด(Grid pattern)และการทบทวนถึงการวิเคราะห์ความเครียด

3.4.2 ข้อโต้ตอบ—ขนาดที่แนะนำสำหรับความยาวทดสอบ(gage length) สำหรับด้านความยาวของแบบที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบที่เป็นวงกลมคือ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) หลังจากส่วนนั้นๆได้ถูกขึ้นรูปบริเวณพื้นที่วิกฤตจะต้องถูกวัดเพื่อใช้เป็นผลลัพธ์ของความยาวทดสอบที่เปลี่ยนแปลงขนาดจาก (L_0) ถึง (L_f) และขนาดความกว้างจาก (W_0) ถึง (W_f) ที่ 90 องศา ตามแนวยาวซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 96 ความเครียดหลัก(e_1) และความเครียดรอง(e_2) ที่สัมพันธ์กันทำมุม 90 องศา สามารถคำนวณจากค่าที่เปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวกริดที่ใช้ทดสอบ ความเครียดสามารถเป็นได้ทั้งแบบความเครียดวิศวกรรม(Engineering Strain) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของความยาวทดสอบเดิมหรือความเครียดจริง(True Strain)



ภาพประกอบ 100 รูปร่างของแบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น

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

3.4.4 ข้อโต้ตอบ—วงกลมจะถูกแนะนำให้ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปเมื่อความเครียดหลัก(e_1) ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงกับเส้นต่างๆของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สภาวะเช่นนี้ค่อนข้างจะพบในกระบวนการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปน้อยกว่าการประเมินการผลิตในงานปั๊มขึ้นรูปวงกลมโดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) และสามารถเว้นระยะห่างจากกันได้ถึง 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) มีการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางตรงข้ามของวงกลมเมื่อความกว้างของเส้นนั้นน้อยที่สุด สำหรับเส้นที่กว้างกว่าพื้นที่ที่ล้อมรอบวงกลมที่กีดด้วยกรดควรจะไม่เปลี่ยนแปลงจากวงกลมหนึ่งไปยังอีกวงกลมหนึ่งและทำการวัดด้านตรงข้ามเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน จุดวิกฤตที่มากขึ้นนี้ทำให้ความกว้างเส้นมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าความกว้างเส้นของกริดและทำให้ความเครียดหลัก(e_1)สูงขึ้น เมื่อเส้นนั้นแผ่ขยายออกในขณะที่พื้นผิวหน้าของโลหะยืดออกด้วย

3.4.5 ข้อโต้ตอบ—การสลับแบบวงกลมของจุดทึบ(Solid dots)มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เที่ยงตรง ซึ่งจะวัดเส้นผ่าศูนย์กลางตรงข้ามจุดนั้น

3.5 การตีปดรอว์(Deep drawing)—การขึ้นรูปแผ่นโลหะที่ซึ่งเกิดความเครียดบนพื้นผิวหน้าของแผ่นโลหะ ความเครียดเป็นบวกละบวกละอยู่ในทิศทางที่พื้นที่เคลื่อนที่เป็นความเครียดหลัก(e_1)และเป็นลบที่มุม 90° ในทิศทางนั้น(e_1) (ภาพประกอบ 100)

3.5.1 ข้อโต้ตอบ—การตีปดรอว์เกิดขึ้นในผนังของการขึ้นรูปทรงกระบอกหรือมุมผนังของส่วนที่ถูกดรอว์ เมื่อแรงจากการจับยึดส่วนที่อยู่ริมขอบมีปริมาณเพียงพอสำหรับการยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะและเกิดรอยย่นขณะที่พื้นที่เคลื่อนที่ลงถึงบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นแบลงก์เข้าไปในช่องว่างของดราย สภาวะความเครียดซึ่งสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดรอยย่นหรือความหนาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 97

3.5.2 ข้อโต้ตอบ—ในการขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โลหะจากพื้นที่บริเวณขอบซึ่งอยู่ใต้แรงจับยึดของแบลงก์ไฮดรอลิคจะถูกดึงเข้าไปสู่แม่พิมพ์เพื่อที่จะขึ้นรูปผนังผาด้านข้างของชิ้นส่วนนั้นๆ

3.6 ความเครียดหลัก(Major Strain)—ความเครียด(e_1) ที่มากที่สุดพัฒนาขึ้นที่ตำแหน่งกำหนดในพื้นที่ผิวหน้าแผ่นทดสอบ

3.6.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดหลัก (e_1) จะถูกวัดไปตามเส้นที่ยึดออกของรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือถูกวัดไปตามแกนหลัก (major axis) ของวงรีซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของกริดวงกลม

3.7 ความเครียดรอง (Minor Strain)—ความเครียด(e_2) ในพื้นที่ผิวหน้าของแผ่นโลหะในทิศทางตั้งฉากกับความเครียดหลัก

3.7.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดรอง (e_2) ถูกวัดที่มุม 90° กับความเครียดหลักตามขนาดที่สั้นที่สุดของรูปร่างสี่เหลี่ยมสุดท้ายของส่วนที่ถูกขึ้นรูปโดยใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square pattern) หรือแกนที่สั้นกว่าของวงรีที่มีผลมาจากการเปลี่ยนรูปของกริดที่เป็นวงกลม ถ้ารูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลับกลายเป็นเอียงหรือเฉียงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านขนานแล้วลักษณะนี้จะไม่ถูกใช้ในการวัดความเครียด

3.8 ความเครียดในแนวระนาบ (Plane Strain)—สภาวะในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นซึ่งคงไว้ที่ระดับใกล้เคียง(0 ถึง +5%)ของความเครียดรอง(e_2) ขณะที่ความเครียดหลัก(e_1)จะเป็นบวกละบวกละ (ในการดึง) บางครั้งจะต้องอ้างอิงในเรื่องแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram) ภาพประกอบ 97 และภาพประกอบ 100

3.8.1 ข้อโต้ตอบ—ความเครียดในแนวระนาบเป็นลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรงที่สุด และเป็นสาเหตุให้เกิดจุดต่ำสุดในเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อความสะดวกเส้นโค้งขีดจำกัดการ

ขึ้นรูปหลายๆ แบบจะแสดงจุดต่ำสุดที่ 0% ของ e_2 อย่างไรก็ตามการพลิกกลับจับปล้นทันทีของความเครียดหลัก(e_1) จะไม่เกิดขึ้น ภาพประกอบ 98 และภาพประกอบ 101 ถึง 103

3.9 การดึงขึ้นรูปสองแกน(Biaxial Stretching)—วิธีการขึ้นรูปของแผ่นโลหะซึ่งความเครียดในด้านบวกจะเกิดขึ้นในทุกทิศทางของจุดที่กำหนดให้ ภาพประกอบ 100

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

3.10.1 ข้อโต้ตอบ—การทดสอบความสูงโดมจำกัด (LDH) ถูกออกแบบมาเพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ขณะที่ขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนคุณสมบัติเฉพาะของแผ่นโลหะ ดังนั้นค่าที่วัดได้จะเป็นความสูงของแม่พิมพ์ที่แผ่นโลหะเริ่มจะมีรอยแตก ปัญหาคือจะต้องมีการจับยึดแผ่นโลหะ(Lock bead) ที่แน่นหนาและเชื่อถือได้มีฉะนั้นค่า LDH ที่วัดได้จะคลาดเคลื่อน การแก้ไขดัดแปลงของการทดสอบ LDH ใช้แผ่นโลหะยาว 200 mm.(8 นิ้ว) ส่วนความกว้างที่ใช้จะทำให้ค่า(e_1) ใกล้ 0% ของ (e_2) เมื่อความเครียดของพื้นผิวด้านหน้าแผ่นโลหะวัดโดยการใช้รูปแบบของกริดบนหลักการพื้นฐานนี้ การทดสอบจะถูกพัฒนาไปใช้กับการตัดแผ่นโลหะที่มีขนาดกว้าง 200 mm.(8 นิ้ว) ส่วนความยาวเพียงพอที่จะทำการจับยึดที่แน่นหนาในอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ทดสอบ LDH ความสูงในจุดที่เริ่มแตกร้าจะมีความสัมพันธ์กับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป การทดสอบไม่จำเป็นต้องมีการกระทำซ้ำๆอย่างเพียงพอเพื่อที่จะถูกใช้สำหรับประเมินผลของตัวอย่างแผ่นโลหะอุปกรณ์ที่ใช้กับขึ้นทดสอบในการชเรติตซ์ด้วยรูปแบบของกริดจะมีการตัดเปลี่ยนความกว้างและเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ได้จากช่วงของค่า e_2 ที่มีความเกี่ยวข้องกับค่า e_1 สำหรับการพล็อต(plot) เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

4. สรุปวิธีการทดสอบ(Summary of Test Method)

4.1 ขั้นตอนในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะต้องเกี่ยวข้องกับเรื่องต่อไปนี้

4.1.1 การใช้เครื่องทดสอบของพื้นที่แบบครึ่งวงกลม(LDH tester)บางครั้งเรียกว่าเครื่องทดสอบนูนโป่ง (bulge tester) การทดสอบ LDH จะใช้เครื่องจักรพื้นที่ขึ้นรูปที่บริเวณพื้นผิวด้านหน้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm.(4 นิ้ว)

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

4.1.2 เตรียมแผ่นแบลงก์ที่ขึ้นรูปกริดเป็นชุดๆ ที่มีความกว้างแตกต่างกันไปและมีความยาวตามปกติเหมาะสำหรับการจับยึดที่มั่นคงในเครื่องมือทดสอบ

4.1.2.1 ชั้นทดสอบทั้งหมดจะทำการเป็นชุดๆ มีขนาดความยาวที่หันไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กับทิศทางการรีดเดิมของแผ่นโลหะและในทิศทางซึ่งมีบันทึกไว้ในรายงาน

4.1.3 การหล่อลื่นผิวหน้าสัมผัสของแผ่นแบลงก์และพื้นที่สำหรับการทดสอบพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม

4.1.3.1 น้ำมันแร่(Mineral oil) และแผ่นโพลีเอทที่ลื่นบางๆ เป็นการหล่อลื่นที่ดีเยี่ยมชนิดหนึ่ง

4.1.3.2 การใช้ไขมันหล่อลื่นหรือไขมัน(grease)ที่มีกราไฟท์เป็นที่ยอมรับได้

4.1.3.3 น้ำมันก๊าด(Kerosene) ไม่ใช้การหล่อลื่นที่ดีเพราะมันจะเป็นตัวทำความสะอาดพื้นผิวหน้าเท่านั้นในขณะที่เกิดแรงกด ไม่ช่วยทำให้โลหะแผ่นลื่นไหลในขณะที่ทำการพื้นที่ขึ้นรูป

4.1.4 แม่พิมพ์ที่ใช้แบลงก์ไฮดรอลิคของการทดสอบพื้นที่แบบครึ่งวงกลมจะต้องมีการแคลมป์(Clamp)ที่แน่นหนาบริเวณขอบนอกของแผ่นแบลงก์ในลักษณะพื้นปลาหรือลอคปิด

4.1.4.1 สำหรับชั้นทดสอบของการทดสอบการดึง ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับชั้นทดสอบแรงดึงของแผ่นโลหะแต่ละชนิดตามที่แสดงในรูปที่ 1 ของ E 8M

4.1.5 การดึงยืดขึ้นรูป(Stretching)พื้นที่ส่วนกลางของแผ่นแบลงก์ เพื่อให้เกิดการยืดแบบสองแกนบริเวณขอบส่วนโค้งของพื้นที่แบบครึ่งวงกลมหรือการดึงยืดในการทดสอบแรงดึงโดยปราศจากการเข้าไปขัดจังหวะของแรง

4.1.5.1 ความเครียดด้นลบ (e_2) สามารถหาได้โดยใช้การตัดแผ่นโลหะให้แคบลงเพื่อให้พื้นที่ทำการดึงยืดขึ้นรูปของการทดสอบ LDH

4.1.6 ให้หยุดพื้นที่หรือแรงเมื่อสังเกตเห็นความหนาของแผ่นโลหะเกิดรอยคอดโดยทันทีถ้าเป็นไปได้หรือทันทีที่เกิดรอยแตกกว้างที่ชั้นทดสอบ

4.1.7 ระยะทางที่แยกห่างจากกันของชั้นทดสอบจากตัวจับยึดเครื่องทดสอบ(Lock bead) กับการขึ้นรูปที่ความกว้างแตกต่างกัน แผ่นแบลงก์ในชุดทดสอบจะเป็นวัสดุที่มีขนาดเท่าเทียมกัน

4.1.8 การวัดและการบันทึกความเครียดหลัก(e_1) และความเครียดรอง(e_2) จากขนาดของกริดบนพื้นที่ผิวด้านหน้าไกล์รอยคอดของชั้นทดสอบทั้งหมดที่ต่อกันเป็นชุด

4.1.8.1 การวัดเหล่านี้รวมทั้งพื้นที่ที่ดี (ไม่มีรอยคอด) พื้นที่เกิดรอยคอดและพื้นที่ที่เกิดการแตกกว้าง

4.1.8.2 ถ้าในตำแหน่งที่ดี(ไม่มีรอยคอด) ซึ่งประกอบด้วยการวัดแต่ละจุดจะสามารถประเมินได้ด้วยการมองด้วยตาและบันทึกไว้ตามแสดงในภาพประกอบ 98

4.1.9 การพล็อต (Plot) ที่ผสมผสานของความเครียดที่ได้จากการวัดในส่วนของ FLD ภาพประกอบ 98

4.1.10 การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จะเชื่อมต่อเหนือส่วนที่ดีที่สุด(ไม่มีรอยคอด) ของความเครียดหลัก(e_1) ที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดรอง(e_2) บนช่วงที่ใช้ในการศึกษา

4.1.10.1 สำหรับการแนะนำในการใช้ได้จริงของชั้นทดสอบซึ่งมีความเครียดที่ด้านล่างของรอยคอดหรือรอยแตกกว้างที่ทะเลาะ สภาวะเช่นนี้สามารถที่จะวัดที่ตำแหน่งในฝั่งตรงกันข้ามของรอยโป่งนูนครึ่งวงกลมจากรอยแตกในสภาพที่ดี(ไม่มีรอยคอด) เพื่อให้ได้ค่าในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

4.1.10.2 ขั้นตอนที่ยอมรับอีกอันหนึ่งคือการวัดขนาดกริดใกล้ๆรอยคอดหรือรอยแตก ตำแหน่งที่ระบุนี้เป็นจุดข้อมูลที่กำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของ FLC ในภาพประกอบ 98

4.1.10.3 การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จะขึ้นอยู่กับพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบจากการบันทึก ภาพประกอบ 98 มีส่วนดีมากมาย(ไม่มีการเกิดรอยคอด) ของจุดข้อมูลที่เหนือเส้น FLC และจุดที่ใกล้ๆรอยคอด(จุดวิกฤต)สองจุดต่ำกว่าเส้น FLC

4.1.10.4 ส่วนโค้งของ FLC จะไม่ได้รวบรวมถึงเนื้อที่บริเวณที่เหนือกว่าจุดข้อมูลวิกฤตที่ระดับความเครียดหลัก(e_1) ต่ำกว่าการวัดจุดข้อมูลที่ดี(ไม่มีรอยคอด)

5. ความสำคัญและการใช้(Significance and use)

5.1 ส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปให้นิยามว่าเป็นความเครียดสูงสุด(ซึ่งมีขีดจำกัด) ของตัวอย่างแผ่นโลหะซึ่งสามารถเกิดความเปลี่ยนแปลงสำหรับช่วงของสภาวะการขึ้นรูป อย่างเช่นการตีปดหรือ การชเทอร์ตซ์ การพับขึ้นรูปรีดมีโค้งและกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ต่างๆ ซึ่งปราศจากการเกิดรอยคอด ซึ่งอาจจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่กำลังเริ่มขึ้น

5.1.1 ส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถหาได้จากประสบการณ์โดยใช้การทดสอบหาความเครียดในห้องทดลองของการชเทอร์ตซ์ขึ้นรูปแบบสองแกนโดยใช้พื้นที่ครึ่งทรงกลมและทดสอบความเครียดการดึงของชั้นทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะ จากตัวอย่างวัสดุที่อยู่เหนือขอบเขตการยืดหยุ่น(Elastic limit) ของวัสดุนั้นๆก่อนการเกิดรอยคอดและรอยแตกกว้าง

5.1.1.1 แต่ไม่สามารถจะกำหนดไว้ล่วงหน้าได้ว่าจะใช้ตัวอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างของรูปสี่เหลี่ยมปกติหรือวงกลมขนาดเล็กที่จะเป็นแบบกริด เพื่อใช้วัดระยะทดสอบ(gage length) ของความเครียดขึ้นรูปที่ผิวหน้าของชั้นทดสอบโดยวิธีที่เหมาะสมเช่น การขีดถ่ายภาพกริด หรือใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าและที่เป็นอยู่ในขณะนั้นชั้นทดสอบแต่ละอันจะก่อให้เกิดจุดรอยคอดหรือรอยแตกกว้าง

5.1.2 ความเครียดในทิศทางหลัก(e_1)และทิศทางรอง(e_2) จะถูกวัดโดยการใช้จุดบนกริดในบริเวณเนื้อที่ของรอยคอดหรือรอยแตกกว้าง

5.1.2.1 ความกว้างแผ่นแบลงก็หลายๆแบบจะถูกใช้เพื่อก่อให้เกิดสภาพความเครียดที่อยู่ในช่วงกว้างๆ ในทิศทางของความเครียดรอง(e_2)

5.1.2.2 ความเครียดหลัก(e_1) ถูกกำหนดโดยความสามารถของวัสดุที่ชเทอร์ตซ์ในหนึ่งทิศทางพร้อมกันกับแรงชเทอร์ตซ์อันใดอันหนึ่งที่พื้นผิวหน้าโลหะในทิศทางของความเครียดรอง

5.1.2.3 ในกระบวนการเปลี่ยนรูปของการทดสอบการดึง ความเครียดรอง(e_2)จะเป็นลบและโลหะจะแคบทั้งสองด้านจากต้นจนจบทั้งความหนาและตามขวางของความกว้าง

5.1.3 ความเครียดเหล่านี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป และส่วนโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นการลากเส้นให้ติดต่อกันจากการผสมผสานความเครียดหลัก(e_1)และความเครียดรอง(e_2) ที่วัดได้สูงที่สุดรวมจุดข้อมูลที่ดี

5.1.3.1 เมื่อมีการผสมเข้าด้วยกันและไม่มีความแตกต่างที่เด่นชัดระหว่างจุดข้อมูลที่ดีและจุดข้อมูลที่เกิดรอยคอด เส้นโค้งที่มีความพอดีมากที่สุดคือการสร้างขึ้นมาจากจุดข้อมูลที่ดีสูงสุดจึงจะเป็น FLC

5.1.4 ขีดจำกัดการขึ้นรูปถูกสร้างขึ้นที่ความเครียดหลักสูงสุด(e_1)ที่ได้มาก่อนถึงรอยคอด

5.1.5 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปกำหนดขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปซึ่งเป็นประโยชน์ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น

5.1.6 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเริ่มต้นเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงวัสดุ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติทางกลหรือสมบัติของความสามารถในการขึ้นรูปถูกพัฒนาขึ้นมาระหว่างกระบวนการปฏิบัติงานที่ใช้การทำจากวัสดุ)และความหนาของแผ่นตัวอย่าง

5.1.6.1 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(Strain hardening exponent) ค่า n มีค่านิยมในวิธีทดสอบ E 646 ผลกระทบต่อขีดจำกัดการขึ้นรูป ค่า n ที่สูงจะเป็นการเพิ่มขีดจำกัดความเครียดหลัก(e_1)ให้สูงขึ้น โดยการยินยอมให้การขoretซ์มากขึ้นภายใต้สภาวะของความเครียดรอง(e_2) เป็นบวก

5.1.6.2 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก(Plastic Strain ratio) ค่า r มีนียมในวิธีทดสอบ E 517 ผลกระทบต่อความสามารถในการตีปรอว์ของวัสดุ ค่า r สูงจะทำให้ความเครียดรองด้านลบ($-e_2$) เคลื่อนเข้าไปสู่พื้นที่ที่มีความรุนแรงน้อยลงจนถึงด้านซ้ายของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุด(FLD_0) ดังนั้นจึงยอมให้ความเครียดหลัก(e_1) มีการตีปรอว์ที่ลึกมากขึ้น

5.1.6.3 ความหนาของวัสดุจะมีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเมื่อขึ้นทดสอบความหนามากกว่าจะมีปริมาตรมากขึ้นที่จะตอบสนองต่อกระบวนการขึ้นรูป

5.1.6.4 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กกล้าที่ถูกใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของภาพประกอบ 94 ประกอบด้วยค่า n และค่า r

5.1.7 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการวินิจฉัย สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดของวัสดุและได้ถูกใช้สำหรับประเมินผลการปฏิบัติงานปั๊มขึ้นรูปและการคัดเลือกวัสดุ

5.1.8 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นตัวให้พื้นฐานที่เกี่ยวกับเส้นกราฟ สำหรับการเปรียบเทียบกับ การกระจายความเครียดบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยให้ผลสืบเนื่องกับการปฏิบัติงานปั๊มขึ้นรูป

5.1.9 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่หามาได้โดยวิธีนี้เป็นสัดส่วนคงที่ตามวิถีความเครียด (Strain path) ซึ่งจะมีอัตราส่วนที่แน่นอนของความเครียดหลัก(e_1) ไปยังความเครียดรอง(e_2)

5.1.9.1 ไม่มีการขัดจังหวะในการกระทำของแรงหรือการกลับตรงข้ามของการเกิดความเครียด แต่อัตราของความเครียดอาจจะถูกทำให้ช้าลงขณะที่ขึ้นทดสอบเข้าใกล้การเกิดรอยคอดหรือรอยแตก

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

5.1.10 การขึ้นรูปแบบสลับซับซ้อนในที่ซึ่งเปลี่ยนแนววิถีความเครียดหรือความเครียดมีลักษณะไม่เหมือนกันตลอดความหนาของแผ่นโลหะ อาจจะก่อให้เกิดการจำกัดความเครียดไม่สอดคล้องกับขีดจำกัดการขึ้นรูปที่หามาได้โดยวิธีนี้

5.1.11 ลักษณะของการตอบสนองของวัสดุต่อการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกสามารถเกี่ยวพันกันกับความเครียดไปสู่การเริ่มเกิดรอยคอด การแตกร้าว ความเครียดเหล่านี้จะอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

5.1.12 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่เหมาะสำหรับการทดสอบแบบประกันคุณภาพล็อตต่อล็อต(lot-to-lot) เพราะว่าวัสดุตัวอย่างมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ซึ่งถูกทดสอบเพื่อที่จะสร้างขีดจำกัดในการขึ้นรูป

6. เครื่องมือ(Apparatus)

6.1 จุดข้อมูล(Data points) สำหรับความเครียดรอง(e_2) ที่ใกล้ 0% และสำหรับความเครียดรองด้านบวก(+ e_2)จะสัมพันธ์กันกับความเครียดหลัก(e_1) สามารถที่จะหาได้โดยการใช้เครื่องทดสอบพื้นที่แบบครึ่งวงกลมอย่างเช่น เครื่องทดสอบความสูงโดมจำกัด(LDH) เครื่องทดสอบการอัดขึ้นรูปเอนกประสงค์หรือเครื่องทดสอบรอยโป่งนูนไฮดรอลิก(Hydraulic bulge Testing machine)

6.1.1 รอยโป่งนูนไฮดรอลิก(The hydraulic bulge) สามารถใช้ของเหลวหรือวัสดุที่ยืดหยุ่นอ่อนนุ่มเป็นตัวสร้างแรงขึ้นรูป

6.2 จุดข้อมูลสำหรับความเครียดรองด้านลบ(- e_2) จะมีความสัมพันธ์กันกับความเครียดหลัก(e_1) สามารถที่จะหาได้โดยการใช้เปลี่ยนแผ่นความกว้างในการทดสอบความสูงโดมจำกัด(LDH) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์และวิธีการทดสอบ E 8M สำหรับการทดสอบการดึงของขึ้นทดสอบซึ่งมีแบบกริดบนพื้นผิว

6.2.1 ขึ้นทดสอบเป็นชุดๆ ที่มีความกว้างแตกต่างกันของส่วนขนานที่ถูกกดลงหรือชุดของแผ่นเต็มความยาวที่ถูกตัดบางส่วน ใช้แบบกริดให้ได้รับความเครียดตามช่วงระยะของความเครียดรอง(e_2)

6.3 เครื่องมือในการเพรส (The press apparatus) จะต้องมีความสามารถในการจับยึดแผ่นแบล็กที่มั่นคงขณะทำการทดสอบ เพื่อป้องกันหรือทำให้เกิดน้อยที่สุดสำหรับการเลื่อนเข้าไปของขอบโลหะ

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

6.3.2 การจำกัดวงการดึงเข้าของขอบโลหะจะไม่เป็นจุดวิกฤติในการหาแผ่นสำหรับวัดความเครียดหลัก(e_1) ที่ความสัมพันธ์กับความเครียดรอง(e_2) ต่อการสร้างขีดจำกัดการขึ้นรูป

6.3.3 การจับยึดที่มั่นคงของขอบโลหะเป็นจุดที่ต้องระวังสำหรับการทดสอบความสูงโดมจำกัด(LDH) ในที่ซึ่งความสูงของพื้นที่เท่ากันที่ถูกบันทึก

6.4 ระบบการทดสอบจะต้องมีแรงเพียงพอและมีระยะที่แน่ใจว่าพื้นที่ครึ่งทรงกลมสามารถที่จะถูกขับเคลื่อนไปจนกระทั่งแผ่นโลหะเกิดรอยแตก

6.5 เครื่องมือจะต้องก่อให้เกิดแรงที่เพียงพอทั้งสองด้านการจับยึดที่ขอบและการใช้พื้นที่เพื่อทำให้การเปลี่ยนรูปของแผ่นแบลงก์สมบูรณ์ขึ้น

6.6 ถึงแม้ว่าจะไม่มีการวัดระยะพื้นที่หรือแรง การวัดความสามารถที่ต้องการควรจะมีสำหรับการกำหนดข้อมูลเช่น อุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินการทดสอบ

6.7 พื้นที่ครึ่งทรงกลม(The hemispherical punch) เคลื่อนที่กระทำที่อัตราคงที่โดยมีศูนย์กลางของการจับยึดชิ้นทดสอบด้านไว้ จนกระทั่งวัสดุนั้นมีรอยคอดเฉพาะที่(localized necking) และการแตกร้าปรากฏขึ้นบนพื้นผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

6.7.1 พื้นที่เคลื่อนที่กระทำอาจจะช้าลงที่ปลายของกระบวนการขึ้นรูป เพื่อที่จะช่วยในการหยุดในขณะเริ่มเกิดรอยคอดหรือเมื่อเริ่มเกิดการแตกร้า

6.7.2 ความเร็วของพื้นที่กล่าวนี้นี้จะถูกวัดและรายงานด้วย

6.7.3 นอกเสียจากว่ามีรอยแตกร้าในวัสดุ มันไม่ควรที่จะมีร่องรอยแตกขวางขอบของพื้นที่ (The nose of the punch) ในทางกลับกันเมื่อพื้นที่เคลื่อนที่กระทำเหนือขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ รอยคอดหรือการแตกร้าหรือทั้งสองลักษณะจะเกิดขึ้นในวงแหวนล้อมรอบปีกวงกลม(round cap)ของบริเวณที่ถูกขึ้นรูป

6.8 การหล่อลื่นช่วยทำให้การลื่นไหลของวัสดุบนผิวหน้าของพื้นที่ขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกไกลกับส่วนบน ลักษณะนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นการปรับความเครียดรอง(e_2) เพื่อที่จะทำให้ความเครียดหลัก(e_1) เพิ่มขึ้น

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

6.9.1 อุปกรณ์การทดสอบความสูงโดมจำกัด(LDH) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100mm.(4 นิ้ว) จะเหมาะสมอย่างดีกับความเครียดแผ่นแคบๆ และขนาดแผ่นเต็ม(สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลม) ของการทดสอบแผ่นแบลงก์เพื่อที่จะใช้หาข้อมูลสำหรับการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

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

6.10 ระยะเพื่อ(Clearanee) ระหว่างพื้นสำหรับขึ้นรูปและแม่พิมพ์ตัวเมีย(hold down dies) จะต้องใหญ่เพียงพอที่จะป้องกันการกดจิกของโลหะถ้าพื้นได้กระทำอย่างเต็มความสูงของแม่พิมพ์

6.11 การดรอร์เข้าใกล้เส้นรัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย จะต้องเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวของแผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบ(the test blank) ในบริเวณนั้นระหว่างการขึงเทรตซ์(Stretching)

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

6.12 รัศมีขอบของพื้นซ์ (the punch nose) และแม่พิมพ์ตัวเมียจะมีความแข็งที่ $50.0 \text{ HRC} \pm 5.0$

7. วัสดุ(Materials)

7.1 เตรียมแผ่นลายฉลุกริดต้นแบบ(Stencils) ขนาดเหมาะสมและมีขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรง อาจจะถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์การกัดกรดโดยใช้เคมีไฟฟ้า ภาพถ่ายกริดหรือวิธีการถ่ายโอนอื่นๆ เพื่อที่จะสร้างแบบกริดของสีเหลืองมัจจุรัส วงกลม จุด หรือรูปแบบผสมผสานกัน

7.1.1 ขนาดแบบกริดจะต้องถูกตรวจสอบลดตายแต่ละอัน(Stencil) ที่จุดเริ่มต้นและเป็นระยะๆระหว่างการใช้ เพื่อให้แน่ใจว่าขนาดของกริดนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการยืดหรือการหดตัว

7.1.2 การเกิดรอยย่นของลดตาย (Stencil) จะต้องถูกป้องกัน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความถูกต้องเที่ยงตรงกับความยาวทดสอบ (gage length) ที่อยู่บนพื้นที่ของกริด

7.1.3 ขนาดของกริดที่ถูกถ่ายโอนมาบนแผ่นแบลงก์โลหะจะต้องแน่นอนโดยการสุ่มวัดขนาดของกริดจากชิ้นทดสอบ

7.2 เทคนิคในการประยุกต์ใช้กริดจะถูกอธิบายไว้ในภาคผนวก X1 ของวิธีการนี้

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

7.2.2 แบบกริดที่มีเส้นบางๆสีดำจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ทำให้มีความถูกต้องเที่ยงตรงในการอ่านค่า

7.3 แบบกริดที่เป็นลักษณะสีเหลืองมัจจุรกและวงกลมทำด้วยเครื่องมือที่เป็นโลหะ

7.3.1 มีความจำเป็นที่จะต้องวัดวงกลมและสีเหลืองมัจจุรกที่เขียนขึ้นก่อนที่จะขึ้นรูปแผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบ เพื่อที่จะทำให้เกิดความยาวทดสอบ (gage length) เริ่มต้นกับทิศทางในการวัดครั้งสุดท้าย

7.4 แบบกริดที่มีความถูกต้องแม่นยำในความยาวทดสอบ (gage length) สามารถถูกพิมพ์บนด้านหรือสองด้านของพื้นผิวหน้าชั้นทดสอบ

7.4.1 บางครั้งบางครั้งอาจมีความจำเป็นเมื่อมีการศึกษาถึงการผลิตขึ้นรูปขึ้นส่วนแต่ไม่ใช่สำหรับชั้นทดสอบที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

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

7.5.1 ตัวอย่างของแบบกริดได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 99

7.6 ความยาวของด้านข้างแต่ละด้านของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมจะอยู่ใน ± 0.025 mm.(0.001 นิ้ว) ของการสร้างความยาวทดสอบ(gage length)

7.6.1 เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงความกว้างเส้นที่อาจเป็นไปได้ภายในรูปแบบที่ถูกพิมพ์ 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. ชั้นทดสอบตัวอย่าง(Sampling)

8.1 แผ่นแบลงก์ที่ถูกทดสอบจะแทนคุณสมบัติของวัสดุ ดังที่ระบุไว้ในการใช้คุณลักษณะเฉพาะผลผลิตและจะนำมาจากแหล่งที่รู้จักทั่วไปด้วยเช่นตัวอย่างหนึ่ง

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

8.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นการทดสอบเฉพาะของวัสดุตัวอย่าง

8.3 ความเป็นไปได้สำหรับเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่จะแตกต่างกันสำหรับตัวอย่างของโลหะที่มีการให้เกรดแบ่งแยกออกจากกัน

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

9. การเตรียมชั้นทดสอบตัวอย่าง (Sample Preparation)

9.1 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบหลายๆ อันที่ต้องการเพื่อใช้ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

9.1.1 ตัวอย่างเช่น ข้อมูล 64 จุด(64 data points) ในภาพประกอบ 94 จะมีความกว้างที่ต่างๆ กันของชั้นทดสอบ 32 ตัวอย่าง ซึ่งได้ถูกขึ้นรูปโดยวิธีต่างๆ

9.1.2 ช่วงของความกว้างที่อยู่บนชั้นทดสอบถูกใช้เพื่อหาความแตกต่างของความเครียดรอง(e_2)

9.2 แผ่นแบลงก์จะต้องยาวเพียงพอในทิศทางของความเครียดหลักของการขึ้นรูป เพื่อที่จะยอมให้มีการจับยึดที่มั่นคงในสิ่งที่ใช้จับยึดและยอมให้มีช่วงระยะการยึดตัว

9.2.1 สำหรับความเครียดการดึงถูกประยุกต์ใช้ในเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ แผ่นทดสอบแต่ละมาตรฐานการตัดจะถูกลดลง 50 mm.(2 นิ้ว) หรือสามารถใช้แผ่นแถวยาวด้านขนาน โดยการตัดเปลี่ยนความกว้างหลายๆขนาด

9.2.2 สำหรับการทดสอบพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม แผ่นแบลงก์จะต้องมีความยาวเพียงพอที่จะถูกจับยึดอย่างมั่นคงในการยึดของแม่พิมพ์โดยปราศจากการดึงเข้าไปที่มากเกินไปจนเกินไป

9.2.2.1 สภาพการจับยึดที่มั่นคงสำหรับริมขอบไม่ได้เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดในการขึ้นรูปแต่จำเป็นสำหรับการทดสอบความสูงโดมจำกัด

9.2.3 ความยาวตัวอย่างคือ 180 ถึง 225 mm.(7 ถึง 9 นิ้ว) สำหรับการทดสอบโดยใช้พื้นที่ครึ่งวงกลมขนาด 100 mm.(4 นิ้ว) และสำหรับชั้นทดสอบที่ใช้ทดสอบการดึงด้วย

9.3 ความกว้างแต่ละชุดของแผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบนั้นแตกต่างกัน เพื่อที่จะสร้างช่วงระยะของค่าความเครียดรอง(e_2)

9.3.1 ชุดของชั้นทดสอบหลายๆชุดอาจมีความจำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอ

9.3.2 ตัดเป็นแผ่นแถบยาวสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Strips) ความกว้างหลายๆขนาดเหมือนต้นแบบโดยทั่วไปจะมีขนาดช่วงจาก 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 ความสัมพันธ์ของทิศทางการรีดต่อความยาวของชั้นทดสอบจะถูกรวมไว้ในรายงาน

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

9.5.1 จำนวนขอบเขตที่เหมาะสมของรอยเยื่อนี้เนื่องจากการตัดจะไม่มีผลกระทบกับผลลัพธ์ของการทดสอบ

9.5.2 มุมเอียงของใบมีดตัดด้านบนควรจะน้อยกว่า 3 องศา เพื่อป้องกันการม้วนของชั้นทดสอบที่แคบๆ

9.6 ขอบต่างๆของแผ่นแบล็กที่ใช้ทดสอบอาจจะถูกขีดหรือตบแต่งเพื่อที่จะทำให้รอยเย็นบริเวณขอบที่มากเกินไปนั้นหลุดออกไป

9.7 ชั้นทดสอบจะมีขอบซึ่งเป็นด้านขนานกันภายใน 1 เปอร์เซ็นต์ของความยาวของมันทั้งหลาย

10. การสอบเทียบ (Calibration)

10.1 การทดสอบสำหรับเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ทำขึ้นในเครื่องอัดขึ้นรูปที่มีพื้นที่ครึ่งทรงกลมและเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ไม่จำเป็นต้องวัดแรงที่ใช้

10.2 การวัดความเครียดหลัก(e_1) และความเครียดรอง(e_2) จะต้องมีความเที่ยงตรง $\pm 2.5\%$ ของความเครียด

10.3 ขั้นตอนที่ใช้ในการวัดเหล่านี้อาจจะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หนึ่งในห้าดังต่อไปนี้หรืออาจจะมีเทคนิคการเปรียบเทียบและมีอุปกรณ์ซึ่งให้ความแม่นยำถูกต้องได้เท่าเทียมกัน

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

10.3.1.1 พื้นผิวหน้าที่จะทำการวัดจะต้องถูกจับยึดไว้ในลักษณะตั้งตรงได้ฉากกับเครื่องไมโครสโคป

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

10.3.3 ตัวขยาย(magnifier) ซึ่งอยู่รวมกันกับสเกลสอบเทียบ

10.3.4 สเกลรูปลิ้มปลายแหลม(tapered wedge Scale)บนแผ่นพลาสติกใส(ไมลาร์) ซึ่งให้ความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์สำหรับการสร้างความยาวทดสอบ(gage length) ซึ่งจะขยายความเครียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

10.3.5 ผู้วิเคราะห์กริดวงกลมมีการใช้กล้องถ่ายรูปและเครื่องคอมพิวเตอร์ในการจำลองภาพ(Imaging) ซึ่งทำให้การอ่านเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันหลายเท่า

10.4 ความโค้งของพื้นผิวหน้าชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยพื้นที่แบบครึ่งทรงกลม จะไม่เป็นระยะวิกฤตบนระยะ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) ซึ่งเป็นความยาวทดสอบ(gage length) เริ่มต้น

11. เงื่อนไขชั้นทดสอบ(Conditioning of Specimens)

11.1 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นลักษณะเฉพาะกับตัวอย่างวัสดุ มันสามารถเปลี่ยนแปลงถ้าวัสดุนั้นต้องเข้ากับกระบวนการรีดเย็นหรือกระบวนการอบอ่อน(Annealing)ใดๆ ดังนั้นสองตัวอย่างจากที่ให้มาของวัสดุ สามารถสร้างส่วนโค้งที่แตกต่างกันถ้ากระบวนการผลิตแผ่นโลหะเปลี่ยนไป

11.2 ประวัติกระบวนการผลิตของวัสดุจะต้องเป็นที่รู้จักดีถ้าการทดสอบจะต้องถูกนำมาพิจารณาให้เป็นตัวอย่างของเกรดผลิตภัณฑ์

11.3 การใช้แบบกริดอาจจะต้องการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าของตัวอย่างซึ่งจะไม่มีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ กริดจะใช้ได้ดีกับโลหะที่เคลือบ(Metallic coated) และพื้นผิวหน้าก่อนมีการหล่อลื่น

12. ขั้นตอน(Procedure)

12.1 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเช็ดให้สะอาดและแห้ง เพื่อที่จะขจัดครวดและทรายออกไป น้ำมันหล่อลื่นชนิดใดๆที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ระหว่างพื้นที่ครึ่งวงกลมและพื้นผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

12.1.1 น้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มจำนวนของการยึดก่อนเกิดรอยคอดเฉพาะที่และย้ายตำแหน่งไปยังขอบส่วนโค้งของพื้นผิว

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

12.1.2. การหล่อลื่นจะช่วยเปลี่ยนแปลงความเครียดหลักและความเครียดรอง แต่ไม่มีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป จุดข้อมูลจะเคลื่อนที่ไปตามส่วนโค้งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดรอง ซึ่งจะกลายเป็นด้านบวกมากขึ้นในบริเวณการ ชะเทิร์ตซ์ และมีค่าลบมากขึ้นในบริเวณการดรอร์ของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เมื่อตัวหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพถูกนำมาใช้ในการอัดขึ้นรูป

12.2 โลหะใดๆที่พบบนพื้นผิวจะต้องเอาออกก่อนที่จะทดสอบต่อไป

12.2.1 การเก็บโลหะขึ้นมาเพื่อป้องกันการติดกันโดยไม่มีความร้อน(Cold welding) สามารถจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากความร้อน แรงกดอัดและการเคลือบบนชิ้นทดสอบถ้าไม่มีน้ำมันหล่อลื่น

12.3 ความเร็วของพื้นผิว(หรืออัตราการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ) ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสามารถถูกหยุดได้เมื่อเกิดรอยคอดหรือเกิดการแตกร้าว

12.3.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป(forming force)เริ่มต้นจะไม่เกิดขึ้นในทันที

12.3.2 การรับโหลดที่เพิ่มขึ้นในที่ซึ่งแรงได้ถูกเอาออกไปและนำมาใช้อีกจะไม่ใช้ในการกำหนดเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

12.4 แผ่นแบลงก์ที่ใช้ทดสอบจะอยู่ตรงจุดศูนย์กลางบนพื้นผิวโดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นทดสอบที่ใช้ขึ้นรูปในแผ่นแคบ ๆวางอยู่พื้นที่ครึ่งทรงกลม ถ้าพื้นผิวหน้าเพียงด้านเดียวใช้เป็นกริด มันก็จะหลุดออกจากพื้นผิวที่สัมผัสกับพื้นผิว

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

12.5 เครื่องทดสอบจะกระทำให้เกิดการยืดในแผ่นแบลงก้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงระยะเริ่มต้นของรอยคอด ซึ่งสามารถสังเกตเห็นด้วยตาหรือโดยการเฝ้าตรวจการลดลงของแรงที่ใช้ในเครื่องทดสอบ

13. ผลลัพธ์และการคำนวณ(Results and Calculations)

13.1 การคัดเลือกความยาวทดสอบ(gage length) ที่จะถูกวัด

13.1.1 ไม่จำเป็นที่จะวัดตำแหน่งทดสอบ(gage) แต่ละอันด้วยรูปแบบที่เป็นจุด(dot pattern) ตำแหน่งทั้งหมดสามารถที่จะวัดได้โดยการใช้ผู้วิเคราะห์กริดวงกลม แต่การทำเช่นนี้ต้องใช้เวลามากถ้าทำโดยการใช้ถือสเกลและแว่นขยายด้วยมือ

13.1.2 วงกลมที่เปลี่ยนรูปอาจจะเกิดขึ้นเป็นวงรีที่มีเส้นกว้างออกตรงส่วนปลายรูปด้านความยาว ลักษณะนี้จะถูกวัดจากด้านในของเส้นหนึ่งไปยังด้านในของเส้นที่อยู่ตรงข้าม

13.1.3 ความยาวทดสอบทั้งหมดที่ถูกวัดจะอยู่ใกล้ตำแหน่งที่เริ่มเกิดรอยคอดบนชิ้นทดสอบ วงรีที่มีไม่มากกว่า 2 หรือ 3 วงรี ห่างจากรอยคอดหรือการแตกร้าว ที่ตั้งอยู่ในทิศทางของรัศมีจะสัมพันธ์กับขอบส่วนโค้งของพื้นผิว

13.1.4 ถ้ามีรอยแตกเกิดขึ้นมันจะเกิดขึ้นบนด้านหนึ่งของขอบพื้นผิวครึ่งทรงกลม (hemisphere pole) กริดที่เหมาะสมสำหรับการวัดระดับความเครียดที่ตำแหน่งรอยคอด(necking) สามารถพบได้บนขอบพื้นผิวด้านตรงข้าม(pole)

13.2 อัตราการมองเห็นพื้นที่กริดที่เปลี่ยนรูปแต่ละอัน จะถูกทำขึ้นด้วยกลุ่มแต่ละกลุ่มที่ทำให้ได้ดี(ไม่มีรอยคอด) กลุ่มวิกฤต(ตำแหน่งที่มีรอยคอด) หรือกลุ่มรอยแตก มีนิยามคือ

13.2.1 ส่วนที่ดี(หมายถึงการไม่มีรอยคอด การผ่านหรือการยอมรับบนชิ้นส่วนของการผลิต) ตำแหน่งกริดที่เปลี่ยนรูป(deformed grid) ในพื้นที่ด้านนอกทั้งหมดของบริเวณรอยคอดของชิ้นทดสอบ

13.2.2 ช่วงวิกฤต(ซึ่งเรียกเป็นตำแหน่งรอยคอด หรือช่วงที่คาบเกี่ยว, borderline) ตำแหน่งกริดที่เปลี่ยนรูปในบริเวณจุดที่ทำให้เกิดการบางหรือร่องในพื้นผิวชิ้นทดสอบ

13.2.2.1 สำหรับแบบกริดวงกลมถ้าวงรีนั้นมีรูปร่างฉีกขาด(Tear-drop Shaped) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ(nonuniform strain) มันก็จะไม่ถูกวัด สภาวะเช่นนี้สามารถทำให้เหมาะสมได้โดยใช้กริดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

13.2.3 การแตกร้าว(บางที่เรียกว่าความเสียหาย, fail) การแยกขาดจากกันของชิ้นทดสอบที่ความยาวทดสอบ(gage length)ของกริดแยกออกเป็นสองส่วนและเนื้อที่บริเวณอยู่ถัดไปจากขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถถูกวัดเพื่อจุดประสงค์ของข้อมูลแต่ละข้อมูล

13.3 การวัดความเครียด(Strain measurements)

13.3.1 ความเครียดหลัก(e_1)และความเครียดรอง(e_2)ของการเลือกกริด ที่เปลี่ยนรูปจะถูกวัดภายใน $\pm 2.5\%$, สำหรับความยาวทดสอบเริ่มต้นที่มีขนาด 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) นี้คือ ± 0.075 mm.(0.0025 นิ้ว)

13.3.2 แผนภาพที่เป็นแบบตัวอย่างสามรูปแบบที่กริดวงกลมสามารถที่จะเปลี่ยนรูปดังแสดงในภาพประกอบ 96 แทนการดรอว์(draw) ความเครียดในแนวระนาบ(plane strain) การชเทิร์ตซ์สองแกน(biaxial stretch)

13.3.3 การคำนวณความเครียดหลัก(e_1) ที่สัมพันธ์กับความเครียดรอง(e_2)ตามที่ได้แสดงมานั้น จะพบว่าความเครียดหลัก(e_1) เป็นการเกิดขึ้นตรงกันพอดีกับทิศทางของการเปลี่ยนรูปหลักและความเครียดรอง(e_2)คือที่มุม 90 องศากับทิศทางของความเครียดหลัก

$$\begin{aligned} \text{ความเครียดหลัก} &= \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 = e_1 (\%) \\ \text{ความเครียดรอง} &= \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100 = e_2 (\%) \end{aligned}$$

ซึ่ง

L	=	ความยาว (length)
W	=	ความกว้าง(Width)
0	=	จุดเริ่มต้น
f	=	จุดสุดท้าย

14. เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Curve)

14.1 ข้อมูลสำหรับความเครียดหลัก(e_1)และความเครียดรอง(e_2)ของกริดที่คัดเลือกแล้ว จะถูกพล็อต(Plot)ลงบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ตามที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 98

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 ช่วงระยะของความเครียดหลัก(e_1) สามารถที่จะเป็นได้จาก 0% ถึง มากกว่า 200%

14.5 ช่วงระยะของความเครียดรอง(e_2) สามารถที่จะเป็นได้จาก -40 % ถึง มากกว่า +60%

14.6 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับวัสดุสามารถลดช่วงระยะลงได้ ถ้าขีดจำกัดที่ต่ำลงของขนาดความเครียดหลัก(e_1) ไม่ได้แสดงออกมาเป็น 0% ลักษณะนี้จะถูกบันทึกไว้ในรายงาน

15. การรายงาน(Report)

15.1 การรายงานเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจะต้องประกอบด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

15.1.1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่มีขีดจำกัดต่ำลงของแกนความเครียดหลักจะถูกบันทึกไว้ถ้ามันมีความแตกต่าง 0% ของความเครียดหลัก(e_1) บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

15.1.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ถูกวาดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

15.1.3 ชื่อเรียกที่กำหนดของวัสดุและกระบวนการผลิตถ้าไม่มีเกรดมาตรฐาน

15.1.4 ความหนาของวัสดุ

15.1.5 การกำหนดทิศทางด้านยาวของแผ่นแบลงก์จะสัมพันธ์กับทิศทางของกระบวนการผลิตแบบขดม้วน (Coil processing direction)

15.1.6 อุณหภูมิของเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบถ้านอกเหนือจากอากาศที่ล้อมรอบ

15.1.7 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ครึ่งวงกลมใดๆที่ใช้ในการยืดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

15.1.8 ความเร็วพื้นที่ของเครื่องที่ใช้เคลื่อนที่ลงในระหว่างการทดสอบไม่นับรวมการช้าลงในช่วงสุดท้าย

15.1.9 การหล่อลื่นที่ใช้บนพื้นผิวหน้าสัมผัส

15.1.10 ขนาดแผ่นแบลงก์, ความยาวและความกว้างที่ใช้

15.1.11 ปริมาณขนาดขึ้นทดสอบที่ได้ถูกทดสอบซ้ำๆกันสำหรับตัวอย่างเดี่ยว ตัวอย่างคู่ ตัวอย่างแบบสามอัน

15.1.12 ความยาวทดสอบ (gage length) ของกริดที่ใช้

15.2 การรายงานอาจจะรวมถึงค่าของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุด (FLD₀)

16. ความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อน (Precision & Bias)

16.1 วิธีนี้จะไม่เชื่อถือกับข้อเสนอแนะของความคลาดเคลื่อนระบบใดๆ

16.2 การใช้สเกลสอบเทียบ (Calibrated scales) เพื่อวัดกริดที่มีการขยายใหญ่เพียงพอในการกำหนดความเที่ยงตรง ความแม่นยำในการอ่านความเครียดหลัก (e_1) แต่ละค่าที่สัมพันธ์กับความเครียดรอง (e_2) ที่มีความยาวทดสอบเริ่มต้นที่ 2.5 mm.(0.100 นิ้ว) ควรจะอยู่ภายใน $\pm 0.5\%$ (0.012 mm. หรือ 0.0005 นิ้ว)

16.3 เนื่องจากวิธีการตามความรู้สึกของผู้ทดสอบในการคัดเลือกพื้นที่ที่จะวัดและแบ่งแยกตามรอยคอดหรือไม่เป็นรอยคอด 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 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดความเครียด สำหรับพล็อตบน FLD จากนั้นก็จะหา FLC ได้ สำหรับแบบกริดที่ให้ประโยชน์ในการขึ้นรูปโดยปกติประกอบด้วยสี่เหลี่ยม วงกลม จุด หรือผสมกันในแบบต่างๆ

X1.1 การทำเครื่องหมายด้วยการพินช์(Punch marks) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดด้วยการทำความยาวทดสอบ(gage length) 2 ส่วนสำหรับความเครียดหลัก(e_1) และทำมุม 90 องศาทั้งสองส่วน เป็นความเครียดรอง การวัดระยะก่อนและหลังการขึ้นรูปขึ้นทดสอบมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้น การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเครียดซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของความยาวทดสอบเริ่มต้นในแต่ละทิศทาง การทำ Punch marks จะทำให้เกิดรอยตื้นๆและอาจจะเป็นสาเหตุให้ความเสียหายถึงก่อนกำหนด ในวัสดุบางชนิด สำหรับสาเหตุนี้เอง Punch marks จะถูกใช้เมื่อมีการประเมินวัสดุให้มีความสามารถในการขึ้นรูปอย่างสูงๆ เท่านั้น

X1.2 การเขียนรูปสี่เหลี่ยม (Scribed Square) เขียนเส้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมบนแผ่นโลหะเพื่อใช้ศึกษาการขึ้นรูปขึ้นส่วนสำหรับการประเมินความเครียด เพื่อต้องการให้เกิดความถูกต้องในการสร้าง FLC จุดตัดผ่านกันของการเขียนเส้นแต่ละเส้นในพื้นที่วิกฤติจะมีการวัดบริเวณที่สำหรับทำเครื่องหมายไว้ (Punch marks)

X1.3 การเขียนวงกลม (Scribed Circle) ใช้วงเวียนเหล็กจุดที่ตำแหน่งเขียนวงกลมบนพื้นผิวด้านหน้าของชิ้นส่วนเพื่อศึกษาการกระจายความเครียดซึ่งเป็นการกระทำอย่างธรรมดาบนพื้นที่ที่ใช้งานในระดับความเครียดต่ำ ขนาดปกติเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 mm.(5 นิ้ว) ใช้กับความเครียดที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 5% วงกลมที่คล้ายกันขนาด 2.5 mm.(0.10 นิ้ว) สามารถใช้ในการกำหนด FLC ได้เหมือนกัน

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

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

X1.6 การกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้าคือการสกัดของวิธีซิลค์สกรีน แผ่นกริดต้นแบบ (Stencils) ซึ่งหาซื้อได้จากแบบที่แตกต่างกันหลายๆแบบสำหรับใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้เพื่อกำหนด FLC รูปแบบความกว้างเส้นจะต้องคม ละเอียด ชัดเจนและไม่ยืดขยายตัวหลังจากการขึ้นรูป

X1.6.1 เทคนิคนี้ใช้เป็นอันดับแรกเพื่อทำให้เกิดรอยกดและเป็นข้อมูลบนชิ้นส่วนโลหะ

X1.6.1.1 การพิจารณาความจำเป็นสำหรับการใช้ข้อมูลเฉพาะและเป็นคำแนะนำสำหรับใครก็ตามที่จะใช้วิธีการกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้าควรจะได้มีการฝึกอย่างถูกต้องเป็นอันดับแรกโดยบุคคลที่มีความรู้ในเรื่องนี้อย่างดี

X1.6.2 หม้อแปลงชนิดพิเศษและสารละลายกัดกรดหาได้จากผู้ขาย Stencils ก่อนการใช้ Stencils ให้จุ่มเบาะรองในน้ำยาเคมีวางทับและกดลงไป ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนเบาะรองอย่างต่อเนื่องมากที่สุด

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

X1.6.4 Stencil จะถูกเคลือบด้วยสารละลายกัดกรดและวางบนวัสดุ แผ่นเบาะรองก็จุ่มด้วยสารละลายทางเคมีด้วยเหมือนกันตามลักษณะเฉพาะของโลหะวางอยู่บน Stencil อีกทีหนึ่ง แผ่นเบาะรองจะต้องมีปริมาณสารละลายที่เพียงพอแต่ไม่มากเกินไปเพราะอาจจะสร้างปัญหาได้ ความหนาแผ่นเบาะรองควรประมาณ 3 mm.(1/8 นิ้ว)

X1.6.5 เปิดใช้กระแสไฟฟ้าที่ Rectifier ลูกกลิ้งจะถูกหมุนอย่างช้าๆตรงความกว้างของแผ่นรอง Stencils ไม่ควรจะหมุนลูกกลิ้งไปข้างหน้าและมาข้างหลังด้วยการพิมพ์ 2 ครั้ง เพราะอาจจะเกิดการเลื่อนของแผ่น Stencils ภายใต้แผ่นรอง

X1.6.5.1 ถ้าการพิมพ์หรือกดที่เบาเกินไปแผ่นรองอาจจะต้องมีสารละลายกัดกรดมากกว่าปกติหรือถ้ามันเข้มข้นและเด่นชัดเกินไปสามารถปรับโวลท์เพื่อให้เหมาะสมกับวิธีปฏิบัติ

X1.6.5.2 คำเตือน ควรจะฝึกเพื่อไม่ให้ตะลูกกลิ้งโลหะและวัสดุที่กำลังกัดกรดไฟฟ้าอาจจะช็อตผู้กำลังทำงานในขณะที่ถือลูกกลิ้งและเปิดกระแสไฟฟ้าในระหว่างการกัดกรด

X1.6.6 แผ่นเบาะรองและ Stencils จะถูกเอาออกจากแผ่นโลหะขณะที่ทำการกัดกรด แล้ว แบบของเส้นที่มีความเข้มสม่ำเสมอจะอยู่บนพื้นผิวและควรจะแห้งก่อนจะใช้มือจับ สามารถจะเช็ดออกได้ ส่วนที่ติดเส้นบางๆจากแบบที่กัดกรดจะทำให้อ่านได้ยากยิ่งขึ้น

X1.6.7 สารละลายที่แตกต่างกันหลายๆ แบบที่หาได้จากบริษัทผู้จัดหา Stencils สำหรับใช้บนพื้นผิวของเหล็กกล้า สแตนเลส อลูมิเนียม ทองเหลือง สังกะสี และโลหะอื่นๆ

X1.6.7.1 กระแสไฟ AC และ DC สามารถจะใช้ได้ขึ้นอยู่กับผิวสำเร็จที่น่าพอใจต่อรูปแบบและวัสดุขณะที่ทำการกัดกรด

X1.6.8 สารละลายกัดกรดเป็นตัวกัดกร่อนอย่างอ่อนๆและถ้าไม่ถูกล้างหรือทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายอีกตัว พื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าจะเป็นสนิมเมื่ออากาศเข้าไปรวมตัวในเวลาสั้นๆ สารละลายนี้สามารถทำให้มีขนาดลดลงโดยไม่มีสารละลายที่มากกว่าปรกติบนแผ่นรอง สารละลายบางชนิดประกอบด้วยน้ำยากันสนิม

X1.6.9 การเช็ดพื้นผิวที่ถูกกรดกัดด้วยน้ำมันหล่อลื่นจะเป็นการป้องกันการเกิดสนิมที่มากเกินไป

X1.6.10 ความยาวทดสอบ (Gage length) ของกริดจะถูกตรวจสอบที่ตำแหน่งการสุ่มบนชิ้นทดสอบก่อนการใช้เพื่อความแน่ใจว่าความยาวทดสอบจะไม่มีผลกระทบต่อกริดตัวของแผ่น Stencils

X2. ตัวอย่างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอลูมิเนียมคิลล์สตีลชนิดคุณภาพการดรอว์, อลูมิเนียม ชนิด 3003-0 และทองเหลืองผสม C260

บทนำ

เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปได้ถูกกำหนดขึ้นสำหรับ 3 วัสดุ โดยการใช้ขั้นตอนที่ได้อธิบายในวิธีการนี้

X2.1 วัสดุแรกคือแผ่นอลูมิเนียมคิลล์สตีลชนิดรีดเย็น ซึ่งคล้ายๆกับภาพประกอบ 97 ซึ่งเป็นวิธีสำหรับสร้างขีดจำกัดการขึ้นรูป ทำให้มีผลกับตำแหน่ง FLC เหนือตำแหน่งที่ดี (วงกลมที่บ) และต่ำกว่าจุดข้อมูลวิกฤต (วงกลมระบายสีดำครึ่งวงกลม) ตามภาพประกอบ 101

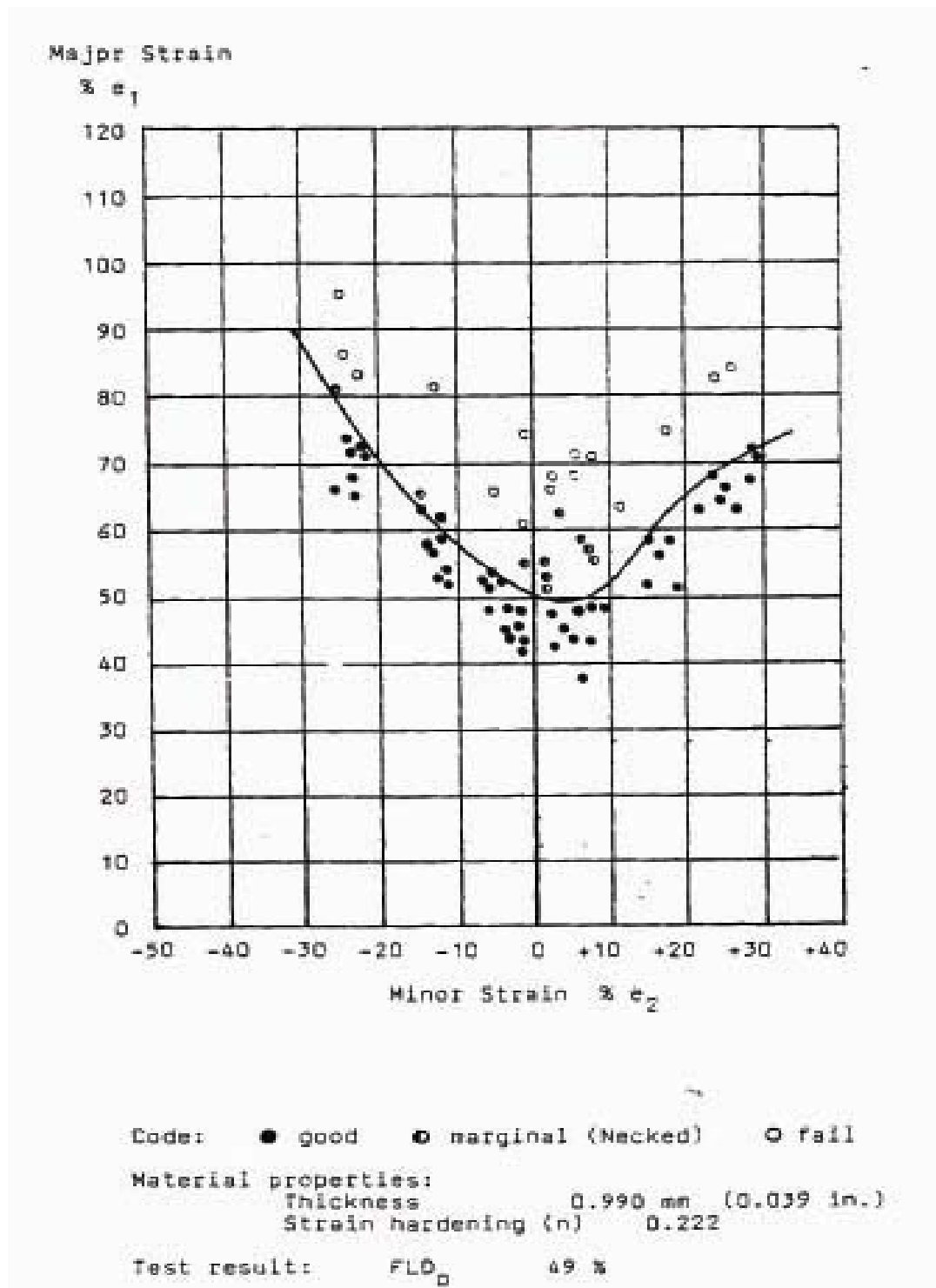
X2.1.1 ค่า FLD ต่ำสุดสำหรับเหล็กกล้าอยู่โดยรอบประมาณ + 5% ของความเครียดรอง (e_2) ซึ่งหา FLD_0 ได้เท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก (e_1)

X2.2 วัสดุที่สองคือแผ่นอลูมิเนียม 3003-0 ตามภาพประกอบ 102

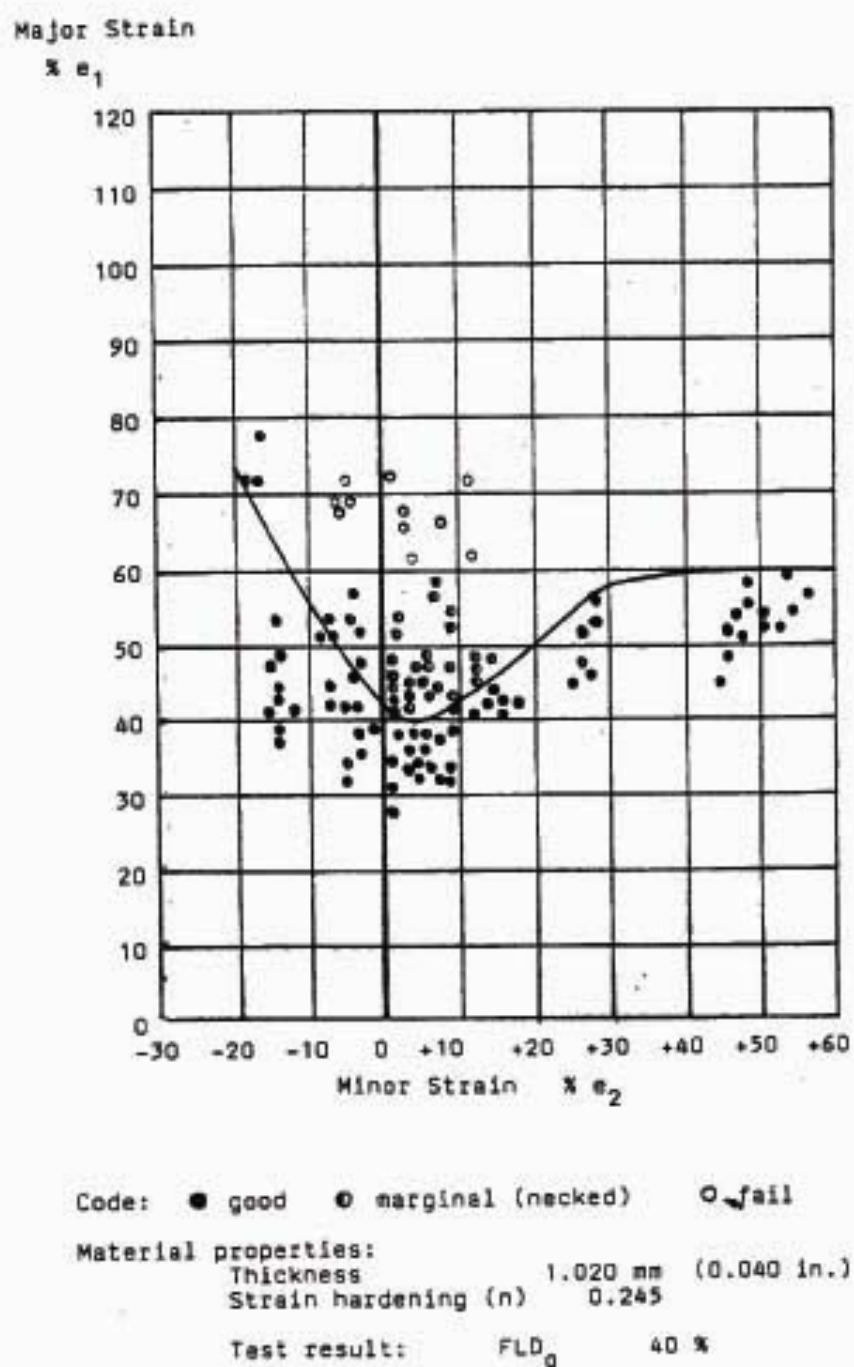
X2.2.1 ค่า FLD ต่ำสุดสำหรับอลูมิเนียมอยู่โดยรอบประมาณ +5% เปอร์เซ็นต์ของความเครียดรอง (e_2) และ FLD_0 ได้เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก (e_1)

X2.3 วัสดุที่สามคือแผ่นทองเหลือง C260 ตามภาพประกอบ 9103

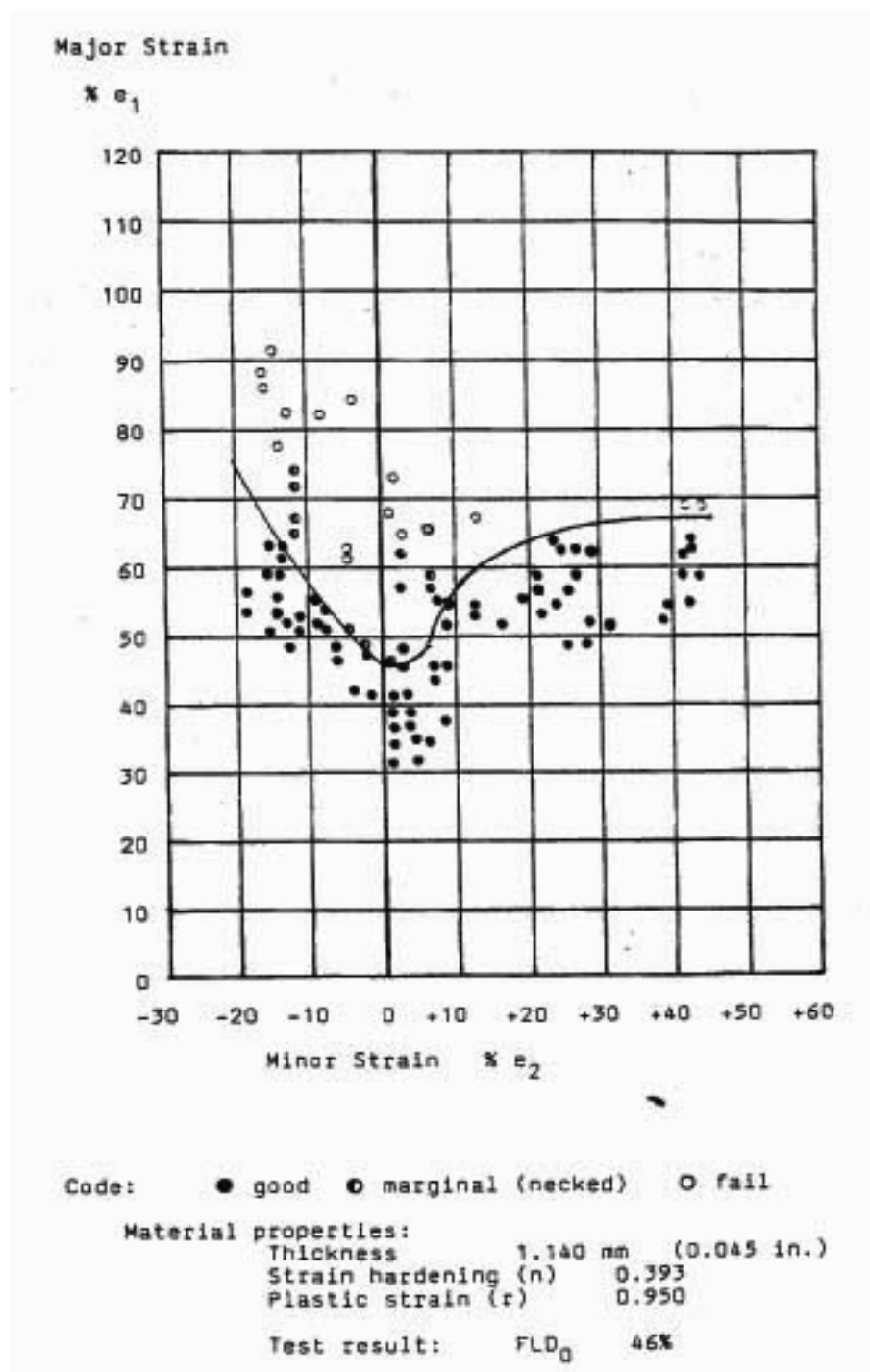
X2.3.1 จุดต่ำสุดบนเส้นโค้ง FLC สำหรับแผ่นทองเหลืองนี้อยู่ระหว่าง 0 และ +5% ของความเครียดตรง (e_2) และ FLD_0 ได้เท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก (e_1)



ภาพประกอบ 101 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมคัลล์สตีลชนิดรีดเย็นเกรดคุณภาพการดรอว์



ภาพประกอบ 102 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมเจือชนิด 3003-0



ภาพประกอบ 103 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับแผ่นทองเหลือง C 260

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20



Certificate of Participation

This is to certify that

Mr. Komsan Ngamkum

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*

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

*Assoc. Prof. Gp. Capt. Dr. Vorapot Khompis
Dean of Institute*

ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จากการเปลี่ยนความหนา

Forming Limit of Austenitic Grade Stainless Steel in Various Thicknesses

คมสัน งามข้า^{1*} วิชิต บัวแก้ว¹ ศุภกฤษ์ ศิริเวทิน² สุวัฒน์ จีระเชรนาท³

¹ โครงการความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
โทร 0-2644-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 Email: komsan_ngamkum@yahoo.com vichib@swu.ac.th

² สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทร 0-2913-2500 ต่อ 6437 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร 0-2564-6500 ต่อ 4717 โทรสาร 0-2564-6332
E-mail: suwatj@mtc.ac.th

Komsan Ngamkum^{1*} Vichit Buakeaw¹ Suparerk Sirivedin² Suwat Jirathearanat³

¹ Srinakharinwirot University and Chulachomklao Royal Military Academy Jointed Graduated Program
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkarak
Nakhonnayok 26120, Thailand, Tel: 0-2644-1000 ext. 2055, Fax: 0-3732-2609 Email: komsan_ngamkum@yahoo.com
vichib@swu.ac.th

² King Mongkut s Institute of Technology North Bangkok Piboonsongkram Rd., Bangsue Bangkok 10800
Tel. 0-2913-2500 ext. 6437 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³ National Metal and Materials Technology Center 114 Thailand Science Park, Paholyothin Rd., Klong Luang,
Pathumthani 12120 Thailand Tel. 0-2564-6500 ext. 4717 E-mail: suwatj@mtc.or.th

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของวัสดุขึ้นทดสอบที่มีต่อขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS304 หนา 0.4 มิลลิเมตร 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จะนำไปใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปอย่างล้าทางและด้วยทรงกรวย ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาสร้างกริดวงกลมเพื่อใช้เป็นขึ้นทดสอบ จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปด้วยพันธ์ครึ่งทรงกลม แล้วนำผล การวัดค่าความเครียดบนขึ้นทดสอบ ตรงบริเวณจุดที่ปลอดภัย จุดที่เกิดการคอดและจุดที่เกิดความเสียหายมาลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก ϵ_1 , ความเครียดรอง ϵ_2 เพื่อสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปและใช้วิเคราะห์ขีดจำกัดการขึ้นรูปอย่างล้าทางและด้วยทรงกรวย ผลการวิจัยพบว่าความหนาของวัสดุขึ้นงานมีผลต่อขีดจำกัดการขึ้นรูปและมีแนวโน้มทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของวัสดุขึ้นงานเพิ่มขึ้น ส่วนผลการขึ้นรูปอย่างล้าทางและด้วยทรงกลมพบว่ามีความเครียดสอดคล้องกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้น

Abstract: The aim of this research is to study the thickness effect upon forming limit of sheet metal. Austenitic stainless steel sheet SUS304 with various thicknesses of 0.4 mm, 0.58 mm and 0.78 mm were used to construct the forming limit curves (FLC). The FLCs, obtained from the experiment, were used to determine the forming limit of sink and conical cup. The circular marks were formed onto the surface of the stainless steel sheets. After that, the sheets were formed into a semi-spherical shape. The strains in the vicinity of the safety, necking and damaged locations were accurately measured to construct the relationship diagrams of major strain, ϵ_1 , and the minor strain ϵ_2 . These diagrams were used to determine the formability of the sink and the conical cup. The results were found

that the thickness of stainless steel sheet has an effect on forming limit, thereby the thicker sheet has lower forming limit than the thinner one. The experimental results agreed well with the FLCs.

Keywords: Forming limit diagram, Forming limit curve, Sink, Conical Cup, Austenitic Grade Stainless Steel

การศึกษาผลกระทบต่อนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS304 จากการเปลี่ยนความหนาเป็นแนวทางที่ช่วยประเมินสภาพปัญหาในกรรมวิธีการผลิตด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลึก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมของภาคอุตสาหกรรม โดยการใช้แผนภาพนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปวิเคราะห์หาความเครียดจากการเปลี่ยนรูปการดัดวงกลมเป็นวงรีทำให้ทราบบริเวณวิกฤตบนชิ้นงาน เพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงกระบวนการและวิธีการทำงานได้อย่างถูกต้อง[1]

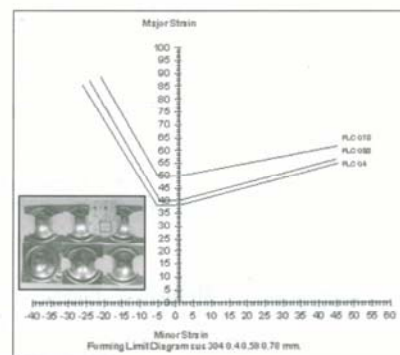
วิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดการดัดวงกลมหลังการเปลี่ยนรูปในแนวแกนหลัก L_o, L_f ในแนวแกนรอง W_o, W_f และนำไปคำนวณ ตามสมการที่ (1) และสมการที่ (2) เพื่อหาความเครียดหลักและความเครียดรอง [2] การคำนวณหาค่าความเครียดโดยนำค่าที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดการดัดวงกลม

$$\text{Major strain} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 = \varepsilon_1(\%) \quad 0 \% \text{ ถึง } 100 \% \quad (1)$$

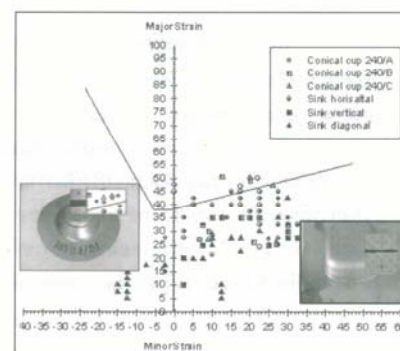
$$\text{Minor strain} = \frac{W_f - W_o}{W_o} \times 100 = \varepsilon_2(\%) \quad -40 \% \text{ ถึง } 60 \% \quad (2)$$

การสร้างแผนภาพนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปนั้น ได้นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบและสร้างการดัดวงกลม [3] จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาดึงขึ้นรูปด้วยพื้นที่ครึ่งทรงกลม โดยชิ้นทดสอบ มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร แล้วนำผล การวัดค่าความเครียดบนชิ้นทดสอบไปคำนวณตามสมการที่ (1) และ (2) โดยเลือกบริเวณจุดที่ปลอดภัย จุดที่เกิดการคอด และจุดที่เกิดความเสียหายมาพล็อตลงจุดบน แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลักกับความเครียดรอง จึงได้เส้นโค้งนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมตามความหนาชิ้นทดสอบ (รูปที่ 1) และประยุกต์ใช้วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปร่างลักษณะที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร (รูปที่ 2) และด้วยทรงกรวยเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นแบล็ก 240 มิลลิเมตร มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นโค้งนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม สูงขึ้น นิพจน์จำกัดการขึ้นรูปต่ำสุดเกิดขึ้นที่ระนาบความเค้น (Plane Strain) (รูปที่ 1) ผลการขึ้นรูปร่างลักษณะ ด้วยทรงกรวย มีสภาวะความเครียดสอดคล้องกับแผนภาพนิพจน์จำกัดการขึ้นรูป โดยสังเกตได้จากจุดสัญลักษณ์ เป็นค่าความเครียดที่วัดจาก รูปร่างลักษณะ และจากด้วยทรงกรวย ซึ่งตำแหน่งที่ปลอดภัยของจุดดังกล่าวอยู่ภายใต้ นิพจน์จำกัดการขึ้นรูป ส่วนตำแหน่งที่เสียหายจุดความเครียดอยู่เหนือ เส้นนิพจน์จำกัดการขึ้นรูป(รูปที่ 2)



รูปที่ 1 แผนภาพนิพจน์จำกัดการขึ้นรูป มีความหนาชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นทำให้เส้นโค้งนิพจน์จำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้น



รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้แผนภาพนิพจน์จำกัดการขึ้นรูป 0.4 มิลลิเมตรวิเคราะห์การขึ้นรูปร่างลักษณะ ด้วยทรงกรวย

- [1] ชาญณรงค์งาน, 2547. เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ . กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] ASTM, 2002. Standard Test Method for Determining Forming Limit Curve. E2218-02. USA.
- [3] S. Tirathearnat, T. Tntarkumthopomchai & W. Limtrakarn. 2004. Finite Element simulation study of hemispherical Dome Forming Construction of Limit Diagram (FLD) for Sheet Metal Forming Process. Thailand : National Metal and Materials Technology Center.

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

สัญลักษณ์		หน่วย
A_0	= พื้นที่หน้าตัดเดิม	mm^2
A_f	= พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลง	mm^2
E	= ยิงโมดูลัส	MPa
F_i	= แรงกระทำที่พื้นผิว	-
F_F	= แรงเสียดทาน	-
F_N	= แรงกระทำที่ตั้งฉาก	-
G	= โมดูลัสเฉือน	MPa
H	= สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ	-
J_2	= ลำดับที่สองของความเค้นเบี่ยงเบน	-
J_3	= ลำดับที่สามของความเค้นเบี่ยงเบน	-
K	= สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง	-
N	= ฟังก์ชันรูปร่าง	-
R_m	= ความต้านแรงดึง	-
R_p	= ความต้านแรงคราก	-
S	= พื้นผิววัสดุ	mm^2
U	= พลังงานความเครียดภายใน	-
V	= ปริมาตรวัสดุ	mm^3
W	= พลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงภายนอก	-
$a_1, a_2, \dots, a_{n+1}$	= สัมประสิทธิ์พอลิโนเมียล	-
d	= ส่วนต่างย่อย	-
e_f	= คือผลรวมของส่วนยืด สม่่าเสมอกับส่วนที่รอยคอด	-
e_y	= ส่วนที่ยืดสม่่าเสมอ	-
k	= ความเค้นเฉือนสูงสุด	-
r_{90}	= อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทางเก้าสิบองศาแนวรีด	-
r_{45}	= อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทางสี่สิบห้าองศาแนวรีด	-
r_o	= อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทางศูนย์องศาแนวรีด	-
r_a	= อัตราส่วนค่าแลงค์ฟอร์ต	-
r	= อัตราส่วนความเครียดพลาสติก	-
n	= เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด	-

l_0	= ความยาวเดิม	mm
m	= ความไวต่ออัตราความเครียด	-
l_f	= ความยาวที่เปลี่ยนแปลง	mm
l_u	= ความยาวชั้นหดรอบเมื่อเริ่มเกิดการคอด	mm
t	= ความหนาวัสดุ	mm
v	= อัตราส่วนบัวของ	-
u, v, w	= การกระจัดในทิศทาง x,y และ z ตามลำดับ	-
w_1	= ความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุใดๆ	-
x, y, z	= ทิศทางการกระจัดในแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ	-
$[D]$	= เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด	-
$[B]$	= เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความเครียดและการกระจัด	-
$[k]$	= สทียเฟเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์	-
$[K]$	= สทียเฟเนสมเมทริกซ์ของรวมของระบบ	-
$[N]$	= ฟังก์ชันรูปร่าง	-
$\{d\}$	= เมทริกซ์การกระจัดที่จุดต่อ	-
$\{\bar{d}\}$	= เมทริกซ์การกระจัดของระบบ	-
$\{f\}$	= เมทริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ	-
$\{F\}$	= เมทริกซ์รวมของแรงกระทำที่จุดต่อ	-
$\{\phi\}$	= เมทริกซ์การกระจัด	-
σ	= ความเค้น	N/mm ²
σ_f	= ความเค้นไหล	N/mm ²
σ_{eng}	= ความเค้นวิศวกรรม	N/mm ²
σ_{ij}	= ความเค้นเทนเซอร์	-
σ_m	= ความเค้นเฉลี่ย	-
σ_n	= ความเค้นที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว	-
σ_0	= ความเค้นคราก	-
$\bar{\sigma}$	= ความเค้นประสิทธิภาพ	-
σ'_{ij}	= ความเค้นเบี่ยงเบน	-
ε	= ความเครียด	N/mm ²
ε	= ความเครียดจริง	N/mm ²
ε^E	= ความเครียดอีลาสติก	-
ε_m	= ความเครียดเฉลี่ย	-
ε^P	= ความเครียดพลาสติก	-

ε_{ij}	= เทนเซอร์ความเครียด	-
$\bar{\varepsilon}$	= ความเครียดประสิทธิผล	-
$\dot{\varepsilon}$	= อัตราความเครียด	-
$\dot{\varepsilon}_V$	= อัตราการเปลี่ยนรูปเชิงปริมาตร	-
ε_{ij}	= ความเครียดเบี่ยงเบน	-
τ	= ความเค้นเฉือน	-
τ_F	= ความเค้นเสียดทาน	-
y	= ความเครียดเฉือน	-
δ_{ij}	= โครเนกแคร์เดลต้า	-
$d\lambda$	= อัตราส่วนของความเครียดต่อความเค้น	-
ξ_1, ξ_2, ξ_3	= พิกัดธรรมชาติ	-
π	= พลังงานศักย์รวม	-
Δ	= ผลต่าง	-
μ	= สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	-
λ	= ตัวคูณของรากฐานเฉียน	-

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-ชื่อสกุล	นายคมสันต์ งามขำ
วัน เดือน ปี เกิด	24 พฤศจิกายน 2515
สถานที่เกิด	อำเภอ ด่านช้าง จังหวัด สุพรรณบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	129/1 ต.หนองมะค่าโมง อ.ด่านช้าง จ.สุพรรณบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ ประจำแผนกช่างยนต์ สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสุพรรณบุรี อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทร 035544-301-3 E-mail : komsan_ngamkum@yahoo.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2530	มัธยมศึกษาปีที่ 3 จากโรงเรียนวัดโบสถ์วรดิตถ์วิทยาประสุทน์ อ.ป่าโมก จ.อ่างทอง
พ.ศ. 2533	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.) สาขาช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี
พ.ศ. 2536	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) สาขาช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี
พ.ศ. 2541	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต(อศ.บ.) สาขาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ