

บทคัดย่อ

เมื่อชิ้นงานถูกตีขึ้นรูปนั้นความสามารถหรือขีดจำกัดในการตีขึ้นรูปก็คือการแตกหัก โดยเฉพาะการแตกหักแบบเหนียว สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงเกณฑ์การแตกหักที่จะนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของการแตกหักที่เกิดขึ้นในงานตีขึ้นรูป โดยจะมีวัสดุที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองเหลือง และ อะลูมิเนียม โดยรูปร่างชิ้นงานทรงกระบอกตันที่มีขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5, 1.0 และ 1.5 ทำการทดลองจริงด้วยการตีขึ้น และศึกษาพฤติกรรมของการแตกหักตลอดจนความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุแต่ละชนิด ภายใต้เงื่อนไขของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในการตีขึ้นรูปตามปกติ พร้อมกันนั้นก็ใช้วิธีการจำลองการตีขึ้นรูป โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการทำแบบจำลองการตีขึ้นรูปซึ่งเป็นงานตีขึ้นรูปเย็น แล้วใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นจากการจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราจะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ชื่อ DEFORM_2D ซึ่งมีความสามารถในการจำลองการไหลตัวของโลหะในงานขึ้นรูปโลหะ โดยใช้เกณฑ์การแตกหักของ Cockcroft and Latham และ Oyane ที่มีอยู่ในโปรแกรม เป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ เมื่อนำผลจากการคำนวณที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าเกณฑ์การแตกหักของ Cockcroft and Latham ทำนายการแตกของชิ้นงานทองเหลืองคลาดเคลื่อนมากกว่าของ Oyane ส่วนชิ้นงานเหล็กกับอะลูมิเนียม ความแม่นยำในการทำนายใกล้เคียงกัน

คำหลัก การตีขึ้นรูป / การทำนายการแตกหัก /
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เรือเอก บพิท ทศเทพพิทักษ์

ประจำแผนกวิชาการ กองวิจัยและพัฒนา กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกศาสตร์เรือ

E-mail : borpitt@yahoo.com

ดร.สุรศักดิ์ สุรนันทชัย

ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยี CAD/CAM/CIM คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

E-mail : surasak.sur@kmutt.ac.th

พลเรือตรี เอกชัย ตรุศรบรรจง

ผู้จัดการฝ่ายบรรจุภัณฑ์ บริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บริวเวอรี่ จำกัด

E-mail : ekachai@tapb.co.th



การทำนายการแตกหักด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Prediction of Fracture Initiation in Forged Product Using Finite Element Method)

บทนำ

สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงการแตกหักที่เกี่ยวข้องในงานตีขึ้นรูป (Upsetting) ในกรณีการแตกหักแบบต่าง ๆ เพื่อค้นหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของวัสดุแต่ละแบบ เนื่องจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการแตกหักนั้นมีหลายทฤษฎี ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์บ่อยครั้งที่การประเมินความเสียหายที่ได้จากการคำนวณผิดพลาด เนื่องจากการเลือกใช้ทฤษฎีที่ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริง ดังนั้นความรู้พื้นฐานในทฤษฎีต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นในการที่เราจะสามารถทำนายการเกิดการแตกหักของชิ้นงานที่ถูกตีขึ้นรูปในแบบ Upsetting (ตีขึ้น) ได้

โดยในการทดลองจริงนั้น จะกระทำชิ้นงานในลักษณะตีขึ้นแล้วเปรียบเทียบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มาช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง และรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง กับโปรแกรมมาประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบหาข้อสรุปในการทำนายการเกิดการแตกหักก่อนที่จะทำการผลิตชิ้นงานจริง

การแตกหักในกระบวนการตีขึ้นรูป (Ductile Fracture in Cold Forging)

การแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการตีขึ้นรูปเย็น แบ่งได้ 3 แบบ มีการแตกร้าวที่ผิว (Free Surface Cracks), การแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Cracks) และสุดท้ายการร้าวที่ผิวโดยการสัมผัสกับเครื่องมือ (Tool Contacting Surface Cracks) ในที่นี้จะพิจารณาการแตกที่เกิดขึ้นจากการแตกร้าวที่ผิวเท่านั้น การแตกร้าวที่ผิวจะสังเกตได้ในงานขึ้นรูปแบบตีขึ้น และตีหัวยื่น (Heading) เพราะว่าจะเกิดความเค้นบีบทางด้านแรงดึง (Tensile Hoop Stress) ขึ้นในระหว่างการเสียรูป ดังแสดงในรูป 1 และจะเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปแท่งกลมแบบเดินหน้า (Forward Bar Extrusion) อันเนื่องมาจาก การหล่อลื่นที่ไม่ดีระหว่างชิ้นงาน และแม่พิมพ์



รูปที่ 1 แสดงภาพการแตกร้าวที่ผิวในกระบวนการตีขึ้นรูป

1. การทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Fracture Prediction in Metal Forming)

ในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) เท่านั้น สำหรับปรากฏการณ์การแตกหักแบบเหนียว นั้น เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ในโลหะซึ่งสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งในการอัดขึ้นรูป (Extrude) และการตีขึ้นรูป (Forge) เกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนายการแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น มีหลายเกณฑ์ ที่สามารถที่จะทำนายได้ว่า เมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนรูปแล้วเกิดการแตกหัก ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของเกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนาย โดยอาศัยการค้นคว้าข้อมูลจากหนังสือ, งานวิจัย และบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะเน้นเกณฑ์การแตกหักในลักษณะที่เราสามารถที่จะทำนายได้ว่าเมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนรูป และเกิดการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูป

เพื่อที่จะแก้ปัญหาในการแตกหักในการขึ้นรูปโลหะ โดยปราศจากการแตก และการแพร่กระจายของรอยแตก ในการพิจารณาการแตกหักของวัสดุในงานวิจัยนี้ จะมีเกณฑ์ที่พิจารณา 2 ข้อ คือ

1.1 รูปแบบของการแพร่กระจายรอยแตก (Void Growth Models)

นี่คือพื้นฐานของการสังเกตปรากฏการณ์ในระดับจุลภาคของการแตกหัก ซึ่งก็คือรูปแบบของ Holes Growing ที่เกิดขึ้นในโลหะ ที่จะนำไปสู่การแตก (Crack) นี่ก็คือกระบวนการของการแตกหักเสียหาย การวัดคุณสมบัติของการแตกหัก โดยการดูผลรวมของ Plastic Strain Path จนกระทั่งมันถึงค่าวิกฤติ นั้นหมายถึงวัสดุก็จะเริ่มเกิดการแตกขึ้น สำหรับเกณฑ์ที่จะนำมาใช้ในการทำนายการแตกหัก คือเกณฑ์ของ Oyane ดังมีรายละเอียด ดังนี้

Oyane และเพื่อนร่วมงาน [1-2] ได้เสนอการพัฒนาส่วนประกอบในการแตกหัก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อผลรวมปริมาณความเค้น ถึงจุดวิกฤตที่วัสดุจะเป็นอิสระได้ นี่เป็นเกณฑ์การแตกหักที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left[1 + \frac{\sigma_H}{A\sigma} \right] g d\bar{\epsilon} = G \quad (1)$$

เมื่อ A = Material Constant

G = Critical Damage Value

1.2 เกณฑ์การแตกหักที่เกิดจากการตั้ง โดยการสังเกต (Empirical or Semi- Empirical Rule)

การค้นคว้าหาเกณฑ์การแตกหักบนพื้นฐานของกฎที่ตั้งขึ้น โดยการสังเกตและจากประสบการณ์ ไม่ตามทฤษฎีนั้น จะถูกใช้มากกว่าการสังเกตจากการทดลอง หรือการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การแตกหักแบบเหนียวของของแข็งบางชนิด ขึ้นอยู่กับว่าในอดีตเคยได้รับภาระมากมาแล้ว นั่นก็คือบทสรุปของเกณฑ์ที่ถูกตั้งขึ้นของวัสดุที่ได้รับความเครียดมากเกินไป ต่อมา Cockcroft and Latham [1-2] ได้เริ่มงานในการค้นคว้าอย่างมีเหตุผลมีผลของเกณฑ์การแตกหักนี้ พวกเขาได้เพิ่มการทดลองแรงดึงของวัสดุชิ้นงานที่สมมาตรรอบแกน และได้ผสมผสานเกณฑ์การแตกหักนี้ โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหักของ Maximum Tensile Stress

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* \cdot d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (2)$$

เมื่อ C_2 = Material Constant

σ^* = Maximum Principal Tensile Stress

2. จุดวิกฤติของการแตกหักเสียหาย

2.1 ค่าของการแตกหัก (Damage Value)

เกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวที่กล่าวมาทั้งหมด จะเป็นตัวแทนของรูปแบบเงื่อนไข [3] ดังนี้

$$\int F(\text{deformation history}) d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

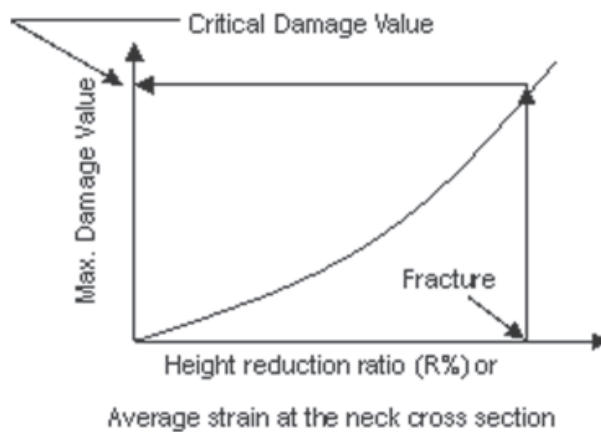
เมื่อ ϵ คือ Effective Strain

C คือ Damage Value

ค่าของการแตกหักนี้ คือค่าตรงจุดที่เกิดการเสีรูปของชิ้นงาน และสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (3) เป็นค่าสมมุติที่บอกปริมาณของความเสียหาย จะไม่ลดลงในระหว่างกระบวนการตีขึ้นรูปเย็นอย่างต่อเนื่องกัน โดยปราศจากการอบอ่อนระหว่างกระบวนการ ดังนั้น การอินทิเกรตสมการการแตกหักแบบเหนียวนี้ ค่าที่ได้จะมากกว่าศูนย์เสมอ

2.2 ค่าวิกฤติของการแตกหัก (Critical Damage Value)

สมมุติฐานพื้น ๆ ของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว ในรูปแบบของสมการ (3) ก็คือการแตกหักแบบเหนียวจะเกิดขึ้น เมื่อค่าสูงสุดของการแตกหัก (Maximum Damage Value) ในชิ้นงานเกินค่าวิกฤติ หรือ Critical Damage Value สำหรับวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน ค่าของ Critical Damage Value สามารถที่จะพิจารณาได้จากค่าคงที่วัสดุ (Material Constant) ก็เปรียบเสมือนกับค่า Yield Stress หรือ Tensile Strength ดังนั้นความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวนำไปสู่ความแตกต่างของค่า Damage Value ค่า Critical Damage Value ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ที่จะให้ความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว ซึ่งก็คือความแตกต่างกันของชนิดวัสดุด้วย

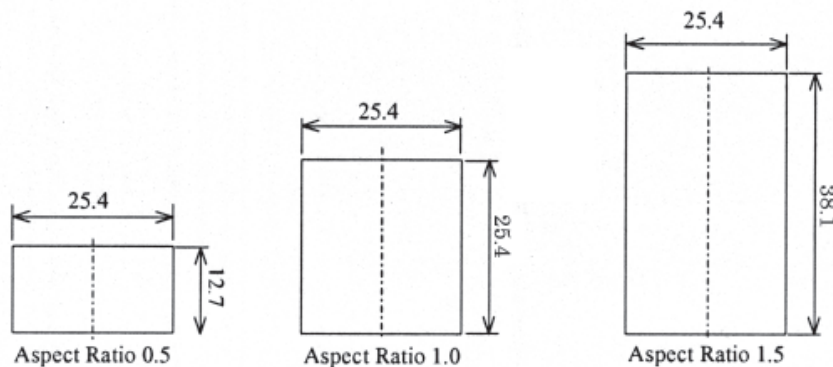


รูปที่ 2 ไดอะแกรมเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว

ขั้นตอนการวิจัย

1. การทดลองตีขึ้นชิ้นงาน

จะทำการตีขึ้นชิ้นงานทรงกระบอก ที่มีขีดจำกัดสัดส่วนของรูปร่าง (Aspect Ratio) 3 ขนาด คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีชนิดของวัสดุชิ้นงาน 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม, ทองเหลือง และเหล็ก

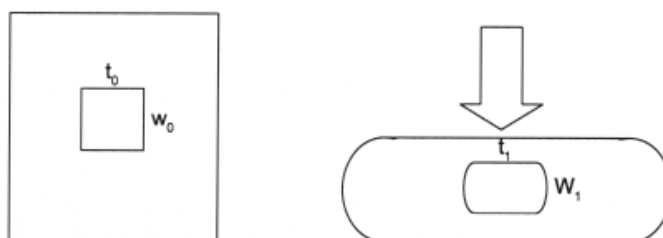


รูปที่ 3 ลักษณะของชิ้นทดสอบ

ในการทดลองดัดจะใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส ขนาด 150 ตัน ก่อนทำการทดลองจะทำตารางสี่เหลี่ยมไว้ที่ตรงกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อวัดความเปลี่ยนแปลงของขนาดตารางทุกครั้งของการลดลงของความสูงชิ้นงาน ที่ลดลงไปครั้งละ 10% ของความสูง ทั้งนี้ก็เพื่อคำนวณหาค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวงและแนวแกน ตามสมการที่ 4 และ 5 จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหักแล้วบันทึกเปอร์เซ็นต์การลดลงของความสูงที่จุดแตกหัก

$$\varepsilon_z = \ln \left[\frac{t}{t_0} \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \ln \left[\frac{t}{t_0} \right] \quad (5)$$



รูปที่ 4 ลักษณะของการทดลองดัด โดยแสดงการตีตาราง เพื่อวัดค่าความเครียด

หลังจากนั้น ก็จะมีการคำนวณเพื่อหาตัวคูณการแตกหักโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง ด้วยเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham และ Oyane และนำข้อมูลจากการทดลอง และจากการจำลองด้วยโปรแกรมมาทำการเปรียบเทียบกัน

2. คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในที่นี้คือ เหล็ก, ทองเหลือง และ อะลูมิเนียม ซึ่งคุณสมบัติทางกลเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก โดยใช้การทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM และใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machine (UTM.) โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ต่อชิ้นงาน จุดประสงค์เพื่อทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุ เพื่อสามารถนำมาเขียนโมเดลทางคณิตศาสตร์ของวัสดุได้ ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงยกกำลัง [4] คือ

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (6)$$

ค่า n คือ เลขยกกำลังของความเครียดเชิง และค่า K คือสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D จะกำหนดให้เป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก จากการทดสอบจะได้รับความสัมพันธ์ของสมการความเค้นและความเครียดเชิงยกกำลังดังนี้

เหล็ก : $\sigma = 1554 \varepsilon_p^{0.2613}$

อะลูมิเนียม : $\sigma = 245 \varepsilon_p^{0.1736}$

ทองเหลือง : $\sigma = 602 \varepsilon_p^{0.1248}$

3. การทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายนี้จะใช้วิธีการกดวงแหวน (Ring Compression Test) [5] โดยจะทำการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทำการทดลองทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก, ทองเหลือง และอะลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงสภาวะในการทดลองที่ย่นขึ้นรูปจริง ๆ ว่า ค่าของความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการนั้น มีสัมประสิทธิ์ความเสียหายเกิดขึ้นเท่าใด จากการทดสอบการกดวงแหวนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของวัสดุชิ้นงานทั้ง 3 ชนิด จะได้อ่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวของแม่พิมพ์ ดังนี้

ทองเหลือง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.73

อะลูมิเนียม มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.81

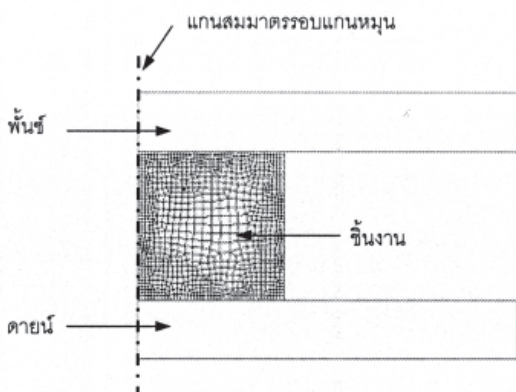
เหล็ก มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.67

4. การจำลองการตีขึ้นด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรม DEFORM_2D เป็นโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ในเชิงพาณิชย์ สามารถให้ผลการทดลองรูปแบบการไหลตัวของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองที่ใช้แทนพฤติกรรมทางกลของวัสดุจะใช้แบบจำลองแบบวัสดุแข็งเกร็ง-พลาสติกสมบูรณ (Rigid-Viscoplastic Flow Model) ตามทฤษฎีของ ฟอน มิเชล (Von Mises Theory) ในการอธิบายและทำนายผลกระทบที่เกิดกับวัสดุในกระบวนการผลิต สามารถที่จะกำหนดแม่พิมพ์ให้เป็นแบบวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) หรือ อีลาสติก (Elastic) ก็ได้ DEFORM_2D ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางและได้ผลดีในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ เพื่อที่จะทำให้การจำลองการเปลี่ยนแปลงวัสดุ สามารถทำนายพฤติกรรมในการไหลตัวของวัสดุและการเติมแต่ง แม่พิมพ์, ทำนายการเกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ (Die Wear), ทำนายการแตกหัก, พังของแม่พิมพ์ หรือชิ้นงาน, ตรวจสอบข้อบกพร่องในการไหลของวัสดุ, ตรวจสอบการแตกหักแบบเหนียวระหว่างกระบวนการ เหล่านี้เป็นต้น

4.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)

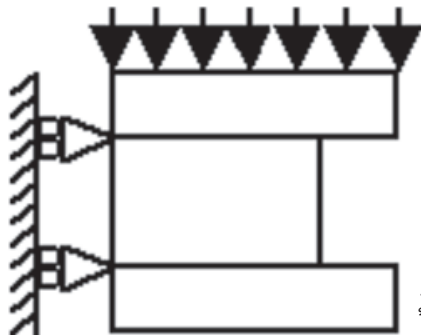
แบบจำลองที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 5 จะมีขนาดและสัดส่วนไปตามขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างต่าง ๆ



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สมมาตร 1 ใน 2 ส่วน

4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

การกำหนดรูปแบบของสมมาตรรอบแกนของชิ้นงานจำลอง 1 ใน 2 ส่วน ดังแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการกำหนดเงื่อนไขขอบ

4.3 การกำหนดรูปแบบของความเสียดทาน (Friction Model)

สำหรับการกำหนดรูปแบบของความเสียดทาน ในการจำลองตีขึ้นรูปนั้น จะใช้รูปแบบของแรงเสียดทานจากแรงเฉือน (Shear Friction Model, m) ดังสมการที่ 7

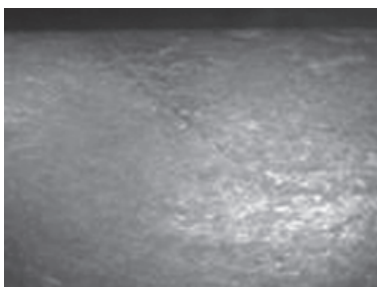
$$\tau = mk \quad (7)$$

เมื่อ m คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉือน (Friction Shear Factor) และ k คือ ความเค้นเสียรูปจากการเฉือนของวัสดุ เพราะว่าในการขึ้นรูปโลหะก่อนนั้น จะเกิดความดันที่จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์สูง ที่จุดสัมผัสความดันสูง กฎของคูลอมบ์จะทำนายค่าความเค้นเสียดทาน ได้ใหญ่กว่าความแข็งแรงทางด้านแรงเฉือนของชิ้นงาน และความเสียดทานยึดติด (Sticking) ก็มากกว่าสี่เท่า สำหรับกฎของคูลอมบ์จะใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ความดันที่ผิวสัมผัสไม่สูงมากนัก

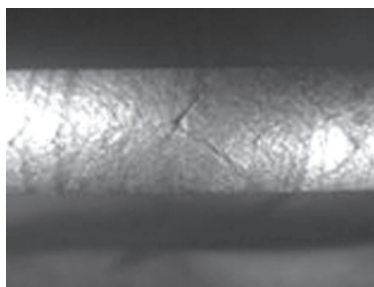
ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองตีขึ้นรูป

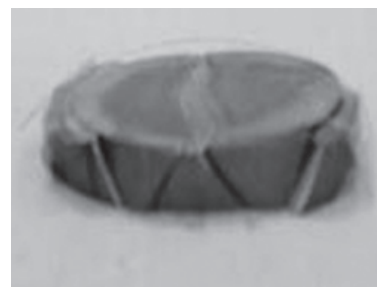
สำหรับผลของการทดลองจริงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำการทดลองตีขึ้นชิ้นงานหาผล การทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทำการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และส่วนที่สองก็คือทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลอง เพื่อให้เกิดสภาวะของการจำลองเหมือนจริงให้มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ, หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ และการเปรียบเทียบความหนาผิว และสารหล่อลื่นเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นว่าที่สภาวะในการทดลองต่าง ๆ มีผลแตกต่างจากการทดลองอย่างไร



ก) เหล็ก



ข) อะลูมิเนียม

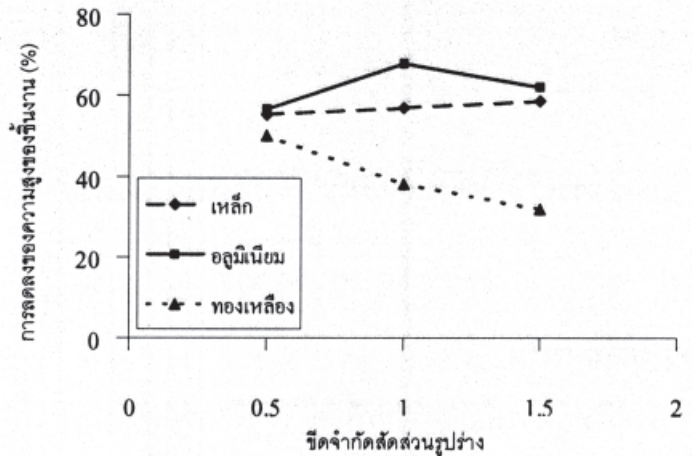


ค) ทองเหลือง

รูปที่ 7 แสดงภาพที่ชิ้นงานเริ่มแตกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดวัสดุ	ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง	ความสูงของชั้นงานที่ลดลงที่จุดแตกหัก (%)
เหล็ก	0.5	55.3
	1.0	57
	1.5	58.8
อลูมิเนียม	0.5	56.7
	1.0	68
	1.5	62
ทองเหลือง	0.5	50
	1.0	38
	1.5	32

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองที่ย่น

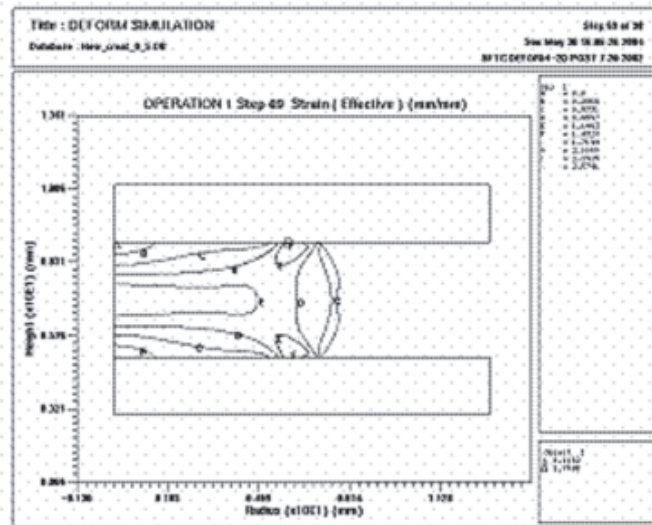


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างกับเปอร์เซ็นต์ลดลงที่จุดแตกหัก

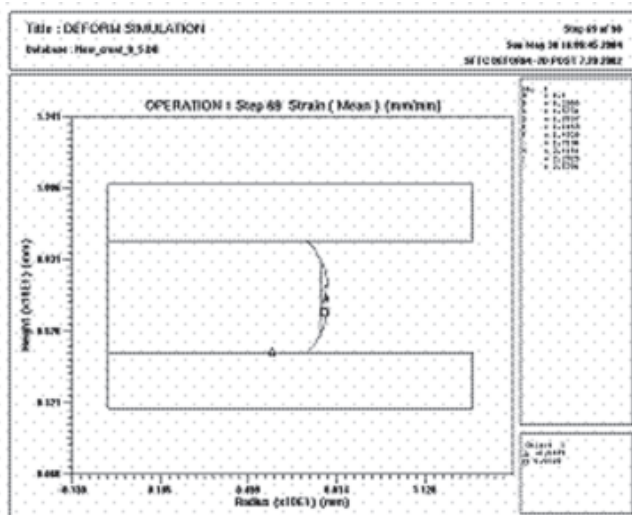
จากผลการทดลองในการย่นชั้นงานจริงนั้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ในรูปที่ 6 และ 7 จะเห็นว่าความสามารถในการย่นชั้นรูปของอะลูมิเนียมจะมากที่สุด รองลงมาจะเป็นเหล็ก และสุดท้ายก็คือทองเหลือง และสำหรับเหล็กขีดความสามารถในการย่นจะเพิ่มขึ้นตามค่าของขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับทองเหลืองซึ่งจะมีขีดความสามารถต่ำลง เมื่อค่าของขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างเพิ่มขึ้น ส่วนของอะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการย่นรูปดีที่สุดที่ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง เท่ากับ 1.0 เมื่อเราพิจารณาคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของทองเหลืองมีมากที่สุด ซึ่งน่าที่จะทำให้ความสามารถในการย่นรูปดีที่สุด แต่ไม่สอดคล้องกับผลจากการย่นชั้นรูปจริง ดังนั้นจากการศึกษาข้อมูลทางด้านโลหะวิทยา “พบว่าทองเหลืองเป็นธาตุผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี ซึ่งสังกะสีนั้น มีคุณสมบัติทำให้ทองเหลืองมีความแข็งแรงดี และความเหนียวสูง และคุณสมบัตินี้จะดีขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณสังกะสีมีมากเกินไป จะพบว่าความเหนียวจะลดลงอย่างมาก ทำให้มีความเปราะมากขึ้นรับแรงกดได้น้อยลง แต่ความแข็งแรง ดียังไม่ลดลงมากนัก” [7] นั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ทองเหลืองมีความสามารถในการรับแรงกดได้น้อยมากส่วนของอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นของโมเลกุลต่ำ ทำให้ความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดี เมื่อรับแรงดีก็จะขาดเร็วกว่าเหล็ก แต่ที่ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างสูง ๆ อะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการย่นรูปต่ำลง เพราะอะลูมิเนียมมีความอ่อนตัวสูง ทำให้เกิดระนาบเลื่อนของโมเลกุลได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งมีความแข็งแรงสูง และความหนาแน่นของโมเลกุลก็สูงกว่าอะลูมิเนียม [8]

2. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D

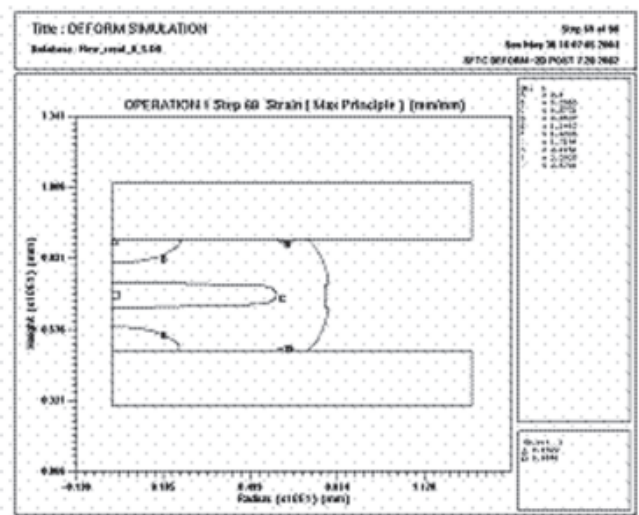
จากผลการจำลองย่นชั้นรูปชั้นงาน เราได้พิจารณาความเครียดที่เกิดขึ้นบนชั้นงาน พบว่าภายในเนื้อวัสดุมีการกระจายตัวของค่าความเครียดเฉลี่ย (Distribution of Mean Stress) การกระจายตัวของค่าความเครียดสูงสุด (Distribution of Maximum Stress) และการกระจายตัวของค่าความเครียดสมมูล (Distribution of Effective Stress) ซึ่งค่าความเครียดเหล่านี้ เป็นตัวแปรที่สำคัญของสมการเกณฑ์ความเสียหายที่ใช้ในการจำลองการย่นชั้นรูป นอกจากนี้จากการจำลองยังพบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันไม่ว่าจะเลือกใช้วัสดุชนิดใดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 9 ภาพแสดงค่าความเครียดสมมูล ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก



รูปที่ 10 ภาพแสดงค่าความเครียดเฉลี่ย ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก

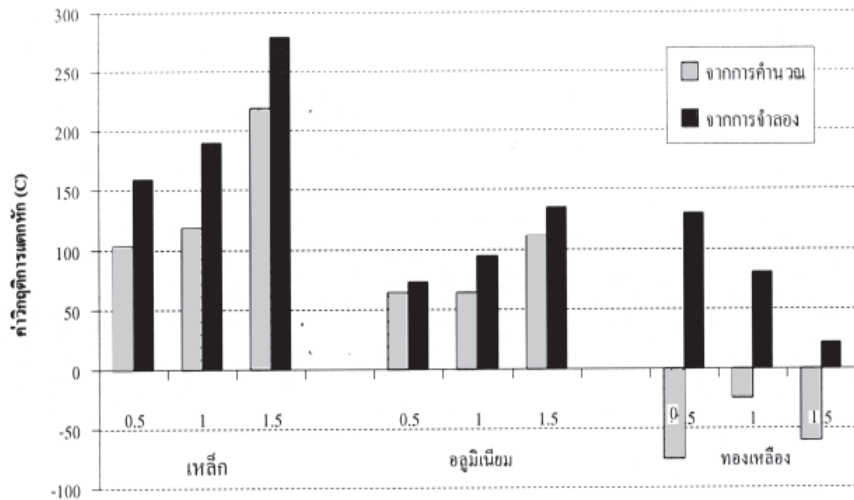


รูปที่ 11 ภาพแสดงค่าความเครียดสูงสุด ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก

3. วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

สำหรับหัวข้อนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการคำนวณค่าวิกฤติการแตกหัก กับผลจากการจำลอง เพื่อหาค่าวิกฤติการแตกหัก ซึ่งจะสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 11 และ 12 จากการพิจารณาเกณฑ์ความเสียหายทั้ง 2 แบบ ของผลจากการจำลองการตีขึ้นรูป และผลจากการคำนวณจากการทดลองจริง สามารถแบ่งกลุ่มของชนิดของเกณฑ์ความเสียหาย โดยอาศัยแนวคิดพื้นฐานของการหาสมการเกณฑ์ความเสียหาย ออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

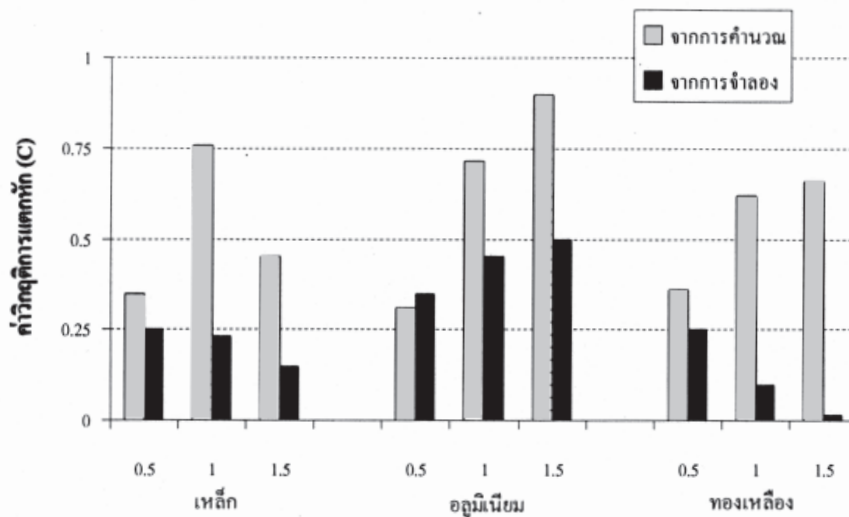
Cockroft & Latham



จัดจำกััดส่วนรูปร่าง

รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบค่าวิกฤติการแตกหัก จากการคำนวณและการจำลอง โดยพิจารณาจากเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

Oyane



จัดจำกััดส่วนรูปร่าง

รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบค่าวิกฤติการแตกหัก จากการคำนวณและการจำลอง โดยพิจารณาจากเกณฑ์การแตกหักของ Oyane

3.1 เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham จะอยู่ในกลุ่มที่เกณฑ์ความเสียหาย ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าวัสดุจะเกิดการแตกหักเมื่องานจากการเสียรูปมีค่าจนถึงค่าวิกฤติหรือเรียกว่าทฤษฎี Empirical Plastic Work Theory [1] และจากการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการคำนวณ โดยใช้เกณฑ์ความเสียหายของ Cockroft & Latham ให้ผลการเปรียบเทียบของการทำนายการเกิดการแตกของชิ้นงานทองเหลืองผลิตลาดค่อนข้างมาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในรูปที่ 11

3.2 เกณฑ์การแตกหักของ Oyane จะจัดอยู่ในกลุ่มที่เกณฑ์ความเสียหายตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ภายในเนื้อวัสดุจะมีโพรงขนาดเล็กอยู่ภายใน และการแตกหักจะเกิดเมื่อโพรงภายในขยายตัวจนมาพบกันหรือเรียกว่าทฤษฎี Void Growth Theory^[1] และจากการเปรียบเทียบผล จากการจำลองและผลจากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 12 มีค่าแตกต่างของผลการเปรียบเทียบไม่มากเท่าใด เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

สำหรับผลการทดลองที่แตกต่างกัน ของการคำนวณหาค่าวิกฤติของการแตกหักจริง กับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เนื่องมาจากว่าในการทดลองจริง ๆ นั้น ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในกระบวนการระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ มีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งกระบวนการอันเกิดมาจากเศษวัสดุที่ตกค้าง หรือไม่มีความหยาบของผิวแม่พิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งแม่พิมพ์จำลองนั้น เราได้สมมุติให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) เหตุผลอีกอย่างก็คือว่าในการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM_2D นั้น ชิ้นงานจำลองนั้น มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ทั้งยังต่อเนื่องกัน และเป็นไอโซทรอปิก ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเนื้อวัสดุปกติจะมีช่องว่าง (Void) อันเกิดจากกระบวนการผลิตอยู่แล้ว ซึ่งช่องว่างเหล่านี้จะเป็นจุดวิกฤติที่จะทำให้เกิดรอยแตกเริ่มต้น (Crack Growth) เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก^[9] อีกทั้งในขณะที่เราทำการจำลองนั้น ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น ก็จะไม่คงที่ตลอดทั้งกระบวนการ สมมุติว่าเราให้ค่าความเสียหายมีค่าเท่ากับ 0.5 ตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นจนจบ ค่าความเสียหายจะคงที่ตลอด แต่ในความเป็นจริงนั้น ค่าความเสียหายจะไม่คงที่ เนื่องจากความร้อน หรือเศษของโลหะเล็ก ๆ ที่เกิดจากความสึกหรอของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าวิกฤติที่คำนวณได้จากการทดลองนั้น มีความแตกต่างกับการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง ที่ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน ก็คือ ความเร็วในการขึ้นรูประหว่างการทดลองกับการจำลองนั้น จะต้องมีความเร็วเท่า ๆ กัน แต่ในงานวิจัยนี้ เราใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส ซึ่งจะไม่สามารถควบคุมความเร็วในการขึ้นรูปได้ จะเป็นการควบคุมความดันที่เป็นแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงาน ทั้งที่เราทราบว่า ความเร็วในการขึ้นรูปเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะ^[10] นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนอีกส่วนหนึ่งมาจาก การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีทดสอบแรงดึง ทั้ง ๆ ที่ในการตีขึ้นรูปนี้ ชิ้นงานจะได้รับแรงกดนำที่จะใช้วิธีหาค่าคุณสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงกดมากกว่า แต่ด้วยเหตุผลที่เราไม่สามารถควบคุมการทดลอง การกดชิ้นงานให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงได้ สิ่งทีกล่าวมานี้ เป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญ ในการทำให้ผลการทดลองนี้คลาดเคลื่อนไปค่อนข้างมาก

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า เราสามารถใช้โปรแกรมทางการค้า DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีตีขึ้นได้ โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหัก ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

จากผลการทดลอง พบว่าเราสามารถที่จะใช้โปรแกรม DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักชิ้นงานวัสดุเหล็ก และอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีตีขึ้น โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ซึ่งจะให้ค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงโดยเฉลี่ยประมาณ 31.5% สำหรับเหล็ก

และ 20.8% สำหรับอะลูมิเนียม ที่ทุก ๆ ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง ส่วนวัสดุของเหลือนั้น เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham จะให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงมาก จึงไม่ควรที่จะใช้เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ทำนายการแตกหักของชิ้นงานของเหลือนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีดัด โดยอาศัยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM_2D และ สำหรับผลที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ก็คือ วัสดุอะลูมิเนียม ที่ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5

2. เกณฑ์การแตกหักของ Oyane

สำหรับการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลจากการทดลอง จะเห็นว่า ให้ค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของการทำนายการแตกหักของชิ้นงานวัสดุเหล็ก และ อะลูมิเนียม ที่ทุก ๆ ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง เท่ากับ 54.6% และ 30.7% ตามลำดับ แต่สำหรับของเหลือนั้นคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 70.7% ถึงแม้ว่า จะให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ดีมากกว่าเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ก็ตาม แต่ก็ยังมีค่ามาก และสำหรับผลที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ก็คือ วัสดุอะลูมิเนียม ที่ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5 เช่นเดียวกับ Cockroft & Latham

เราสามารถที่จะใช้โปรแกรม DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีดัดได้ แต่ว่าเราจำเป็นต้องเพื่อค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากงานนี้ลงไปด้วย ก็จะทำให้การทำนายการแตกหักใกล้เคียงกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ๆ ได้ ทั้งนี้ ก็เพื่อที่จะลดความสูญเสียจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ๆ แต่เราก็ต้องทราบว่าศาสตร์ในการทำนายการแตกหักนั้นมีหลายรูปแบบของสมการและผลการทดลองที่แตกต่างกัน ของการทดลองหาค่าวิกฤติของการแตกหักจริง กับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เนื่องมาจากว่าสมการที่กำหนดเกณฑ์การแตกหักแต่ละเกณฑ์นั้นมีลักษณะ และความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ตามสภาวะเงื่อนไขของแต่ละกระบวนการขึ้นรูป

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Suranuntchai, S. 2001. Fracture Prediction in Metal Forming Operations, Engineering Journal of Siam University, Volume 6, Year 3, July-December 2001: 28-33.
- [2.] Gouveia, B.P.P.A., Rodrigues, J.M.C. and Martins, P.A.F. 1995. Fracture Prediction in Bulk Metal Forming. Journal of Materials Processing Technology, 101: 361-372.
- [3.] Kim, H., Yamanaka, M. and Altan, T. 1995. Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forgings Using FEM Simulation. The Ohio State University, Ohio, pp. 1-5.
- [4.] Robert, K. 1989. Materials Testing for the Metal Forming Industry, Springer, New York, pp. 21-36.
- [5.] American Society for Testing and Material. 1978. Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials, Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, Easton, p. 266.
- [6.] Avizur, B., Van Tyne C.J. and Umana C. 1977. Analytical Determination of the Sensitivity of the Ring Test as an Experimental Study of Friction. Proceedings of the 18th International Machine Tool Design and Research Conference, London, UK, September 1977.
- [7.] สุวรรณ สุนทรรัตน์. 2529. โลหะวิทยาทางกายภาพสำหรับวิศวกร ทองแดงและทองแดงผสม. สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 15-20.
- [8.] Dieter, G.E. 1988. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, Singapore, p.546.
- [9.] สุธีระ ประเสริฐสุรพร. 2542. การแตกหักในอุณหภูมิสูง. วารสารเทคโนโลยี. ปีที่ 19, ฉบับที่ 11: 16-18.
- [10.] Edward, M. 1991. Metalworking Science and Engineering, McGraw-Hill, New York, pp. 198-205.