

การทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการแตกหักในงานขึ้นรูปโลหะก้อน โดยอ้างอิงถึงแบบจำลองกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทีย Finite Element Prediction of Damage in Bulk Metal Forming Based on Lemaitre's Damage Mechanics Model

สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย¹

บทคัดย่อ

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อนนั้น นอกจากการทำนายความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นแล้ว ยังจำเป็นต้องทำการทำนายถึงการแตกหักที่จะเกิดขึ้น กับชิ้นงานในขณะที่กำลังขึ้นรูป หรือหลังจากการขึ้นรูป ด้วยสมการในการทำนายการแตกหัก ในยุคแรก ๆ จะเป็นการมองในระดับมหภาค คือได้จากการสังเกตการทำงาน เช่น สมการการแตกหักที่สร้างบนพื้นฐานการสังเกตค่าพลังงาน กลศาสตร์การแตกหัก แต่เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้นและคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการทำนาย ทำให้สมการในการทำนายการแตกหักมองลึกลงในระดับจุลภาค อันได้แก่สมการกลศาสตร์ความเสียหาย ซึ่งเป็นผลให้ความแม่นยำในการทำนายผลเข้าใกล้ค่าแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงการทำนายการแตกหักในงานขึ้นรูปโลหะก้อนด้วยสมการกลศาสตร์ความเสียหายโดยใช้สมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทีย ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับการยอมรับว่ามีความแม่นยำในการทำนายสูง โดยในสมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทียได้ตั้งอยู่บนทฤษฎีความต่อเนื่องของกลศาสตร์ความเสียหาย และในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความเค้นประสิทธิผลเป็นตัวแสดงถึงการแตกหักของชิ้นงาน ทำการทำนายการแตกหักโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม MSC.Superform2002 ในการทำนายการตีขึ้นรูปขึ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิในการตี 500 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปการกระจายคอนทัวร์ของความเสียหายสัมพันธ์ที่ระดับการตีขึ้นต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการแตกหักของชิ้นงานที่ระดับการตีขึ้นต่าง ๆ

คำสำคัญ : สมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทีย, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การขึ้นรูปโลหะก้อน

Abstract

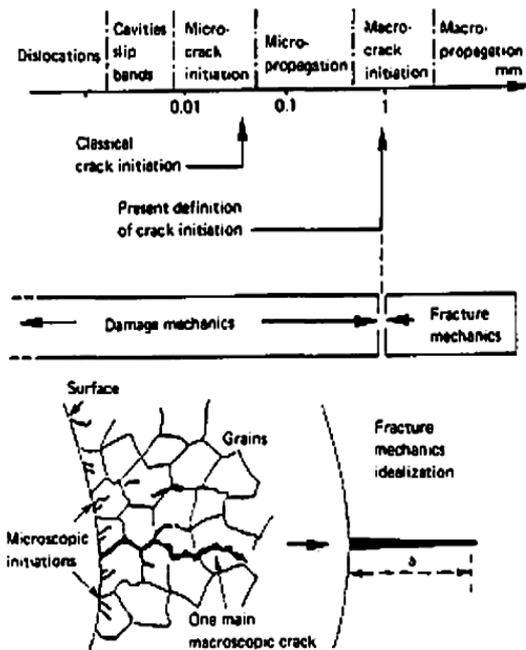
In bulk metal forming process, it is very important to predict the distribution of stress and strain in the workpieces, however, it is also necessary to predict the damage mechanics in the work piece often the forming process. The early equation for prediction of damage model concentrated on the macroscopic level, which comes from the observation such as the equation of fracture that are based on plastic work done or fracture mechanics. After the evolution of technology on computer in the numerical manipulation and simulation, the equation for prediction of damage model has focused deeply in the microscopic level such as damage mechanics, which resulted in higher accuracy of the predicted results. Thus this research is concerning about the study of damage prediction in bulk metal forming process by using the equation of damage mechanics that had been proposed by Lemaitre-Based Damage Mechanics Equation. This Lemaitre-Based Damage Mechanics Equation had been approved for its high accuracy in the damage prediction. The equation is based on the method of continuous damage mechanics (CDM) and this research is presented. The damage model used the effective stress to predict fracture in work piece by, which is simulated the model by Finite Element Method program MSC.Superform2002. In the upsetting process of pure copper workpiece 99.99% at the temperature of 500 °C, the results are shown in the distribution of contour plot for different damage during the upsetting process, which represented the accumulated level of the damage value.

Keywords : Lemaitre-Based Damage Mechanics Equation, Finite Element Method, Bulk Metal Forming

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. บทนำ

การวิเคราะห์เพื่อทำนายการขึ้นรูปโลหะนั้น นอกจากดูความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและความเครียด เพื่อนำค่าเหล่านั้นที่ได้มาใช้ในการหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เลือกวัสดุทำแม่พิมพ์และอื่นๆ ยังจำต้องทราบถึงการแตกหักที่จะเกิดกับชิ้นงานในขณะทำการขึ้นรูปและหลังการขึ้นรูปด้วย โดยการแตกหักในงานขึ้นรูปโลหะจะเป็นการแตกหักแบบเหนียว ซึ่งก็มีหลายวิธีด้วยกันในการที่จะเลือกนำมาวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากการแตกหักแบบเหนียว โดยถูกสร้างในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกลไกการแตกหัก เกณฑ์การแตกหักที่เลือกใช้กันมากก็คือกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture Mechanics) เกณฑ์การชำรุด (Failure Criteria) และเกณฑ์การแตกหักที่สร้างบนพื้นฐานการสังเกตค่าพลังงานที่ได้จากพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด ซึ่งเป็นตัวบอกถึงความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานได้สูงสุดก่อนที่ชิ้นงานจะเกิดการแตกหัก [1] ซึ่งเกณฑ์การแตกหักที่กล่าวไปแล้วนี้ถูกใช้กันมากเพราะเป็นการเน้นไปที่การแตกหักที่ผิวของชิ้นงานคือสามารถมองเห็นรอยแตกหักได้ด้วยกล้องที่มีกำลังขยายไม่มากนักแล้วนำไปวิเคราะห์สร้างแบบจำลองเป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่ในปัจจุบันสมการวิเคราะห์กลไกการแตกหักได้มองลึกลงไปทีในเนื้อวัสดุคือลงไปถึงระดับอะตอม นั่นคือสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์ความเสียหาย (Damage Mechanics) นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 1 [2-3]



รูปที่ 1 ขนาดการเริ่มแตกหักระดับไมโคร

2. สมการคอนสทิทิวทีฟพอลัสติก-วิสโคพลาสติก

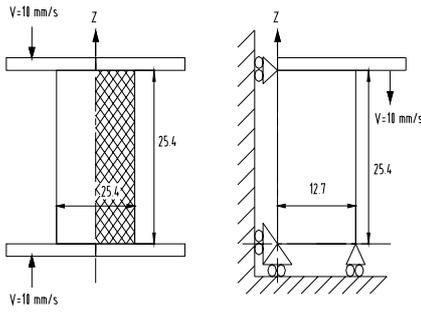
สมการพลาสติก-วิสโคพลาสติก คอนสทิทิวทีฟของชาร์บอร์เช่ [4-5] สามารถถูกแสดงได้ดังนี้

$$\dot{X}_{ij} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma X_{ij} \dot{p} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \left\langle \frac{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq} - \sigma_y}{K} \right\rangle^n \frac{(\sigma'_{ij} - X'_{ij})}{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq}} \quad (2)$$

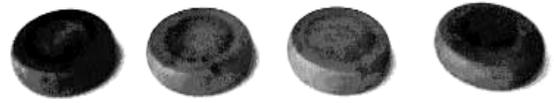
$$\sigma_{ij} = [D](\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) \quad (3)$$

ปัจจุบันนี้สมการคอนสทิทิวทีฟของชาร์บอร์เช่ได้ถูกพัฒนาเป็นส่วนหนึ่งของซอฟต์แวร์ Marc ในเวอร์ชัน MSC.Metat2003 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การขึ้นรูปวัสดุทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% โดยทำการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการขึ้นงานทองแดง ที่อุณหภูมิในการตี 500 องศาเซลเซียส ตีลดความสูงของชิ้นงานลงไป 39% นำผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เทียบกับการทดลองในการตีจริง ซึ่งในการคำนวณนั้นจะตัดผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิออกไปทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ได้ทำให้เกิดผลกระทบมากนักกับชิ้นงานและใช้เวกเตอร์ของความเร็วที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยเวกเตอร์ความเร็วนี้ได้จากค่าความเร็วหัวกดของเครื่องปั๊มที่ได้ตั้งไว้ ชิ้นงานที่เลือกใช้เป็นทรงกระบอกกลมตัน แบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงเป็นแบบจำลองสมมาตรรอบแกนและคิดแค่ 1 ใน 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 25.4 มิลลิเมตรและความสูงชิ้นงานคือ 25.4 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์คือ $C=28952 \text{ MPa}$, $\gamma=1700$, $E=63991 \text{ MPa}$, $\sigma_y=13 \text{ MPa}$, $n=7.38$, $K=20.1 \text{ MPa}$ และ $\nu=0.33$ [6] ทำการตีด้วยความเร็วคงที่ที่ -10 มิลลิเมตร/วินาที เก็บข้อมูลทุกๆ 0.01 วินาทีหรือในทุกๆ -0.1 มิลลิเมตร ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นหาได้จากวิธีการทดสอบการกดวงแหวน (Ring Compression Test) ได้ค่าความเสียหายเฉือน (Shear friction) ที่ $m=0.5$ เอลิเมนต์ที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแปดจุดต่อ (Eight-Node Quadrilateral Element) ทำการทดสอบหาขนาดจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 3 จากกราฟจะเห็นว่าค่าแรงที่ใช้ในการตีขึ้นที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากที่จำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 128 เอลิเมนต์เป็นต้นไป ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่ 128 เอลิเมนต์ 433 จุดต่อ เพราะใช้เวลาน้อยกว่า จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบกับการทดลอง รูปที่ 4 เป็นกราฟระหว่างแรงที่ใช้ในการตีขึ้นกับระยะทางที่ตีขึ้น ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองของการขึ้นชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% แบบสมมาตรรอบแกนที่อุณหภูมิในการตี 500 องศาเซลเซียส ผลที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ส่วนในรูปที่ 5 เป็นรูปชิ้นงานที่ระยะการตีขึ้น 39.4% และคอนทัวร์การกระจายความเค้นแสดงในรูปที่ 6



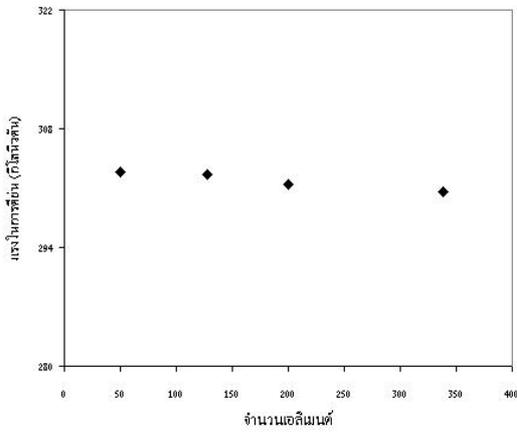
ก. ข.

ก. แบบจำลองชิ้นงานเต็ม ข. แบบจำลองชิ้นงานสมมาตร 1 ใน 2 ส่วน

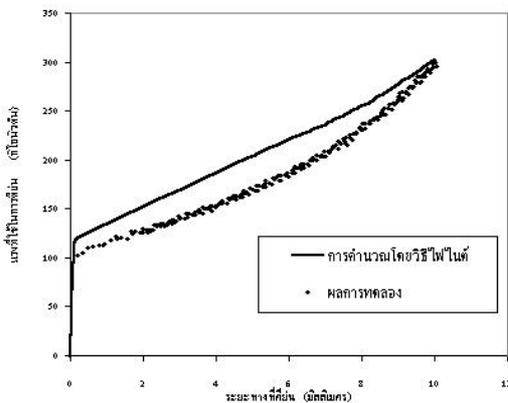


รูปที่ 5 ชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% หลังการตีขึ้น

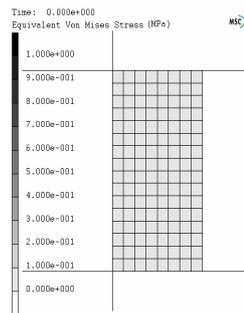
รูปที่ 2 แบบจำลองชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์กรณีสมมาตรรอบแกน



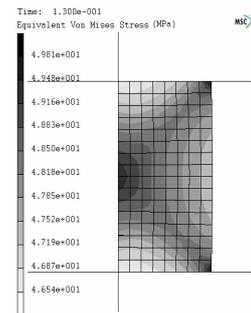
รูปที่ 3 การหาขนาดจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการตีขึ้นชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์สมมาตรรอบแกน



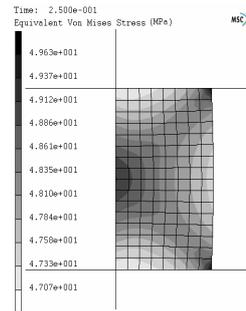
รูปที่ 4 การเปรียบเทียบการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองของการตีขึ้นชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์กรณีสมมาตรรอบแกนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



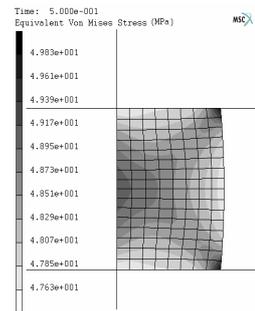
ก. การแบ่งเอลิเมนต์



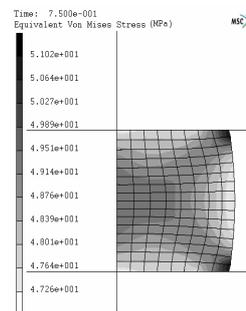
ข. 5.1 เปอร์เซ็นต์



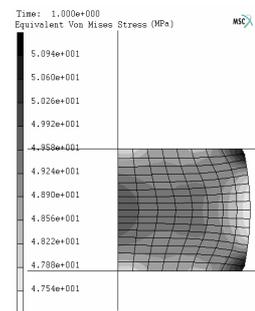
ค. 9.8 เปอร์เซ็นต์



ง. 19.7 เปอร์เซ็นต์



จ. 29.5 เปอร์เซ็นต์



ฉ. 39.4 เปอร์เซ็นต์

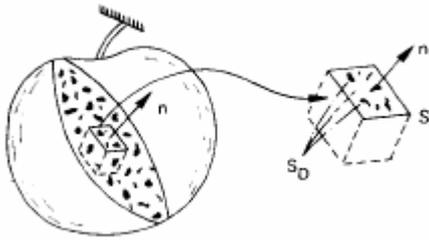
รูปที่ 6 ความเค้นพอน-มิสสิส ในการตีขึ้นที่ระดับต่างๆของชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ (500 องศาเซลเซียส)

3. สมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทีย

หลักการของสมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทียตั้งอยู่บนทฤษฎีความต่อเนื่องของความเสียหายโดยใช้ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) [7] เป็นตัวแสดงโดยที่

$$D = \frac{S_D}{S} \tag{4}$$

เมื่อ D คือค่าความเสียหาย S_D คือพื้นที่ที่เกิดความเสียหาย และ S พื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่า D จะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq D \leq 1$ ขึ้นอยู่กับชั้นงานที่เลือกใช้ ถ้า $D=0$ หมายถึงไม่เกิดความเสียหายขึ้นเลยกับชั้นงาน แต่ถ้า $D=D_C$ ชั้นงานจะเกิดการแตกหัก โดย D_C คือค่าวิกฤตของค่าความเสียหายหาได้โดย



รูปที่ 7 รูปแบบเอลิเมนต์ของความเสียหาย

$$D_C = \frac{D_c \sigma_u}{f(\eta) \bar{\sigma}} \tag{5}$$

โดย D_c คือค่าวิกฤตของค่าความเสียหายในกรณีแรงกระทำแกนเดียว σ_u คือความเค้นประลัย $\bar{\sigma}$ คือความเค้นประสิทธิผล และ $f(\eta)$ คือค่า Triaxiality function ซึ่งในโปรแกรม MSC.Superform2002 ค่า $f(\eta)$ คือ [8]

$$f(\eta) = \frac{3}{2} \eta \tag{6}$$

เมื่อ

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \tag{7}$$

σ_m คือความเค้นเฉลี่ย (mean normal stress)

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - hD} \tag{8}$$

h คือ ค่าพารามิเตอร์ fracture closure โดยมีค่าประมาณ 0.2 ค่าความเสียหายที่เปลี่ยนไปในแต่ละชั้นตอนหาได้จาก

$$\Delta D = \frac{dD}{d\tilde{\epsilon}^p} f(\eta) \Delta \tilde{\epsilon}^p \tag{9}$$

$$\frac{dD}{d\tilde{\epsilon}^p} = \frac{D_c}{(\tilde{\epsilon}_R - \tilde{\epsilon}_D)} \tag{10}$$

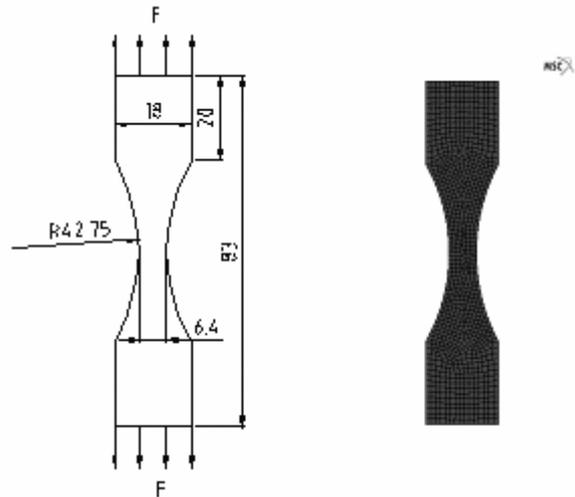
เมื่อ ค่า $\tilde{\epsilon}_R$ คือค่าความเครียดประสิทธิผล ณ จุดที่เกิดการแตกหัก และ $\tilde{\epsilon}_D$ คือค่าความเครียดประสิทธิผล ณ จุดที่เริ่มเกิดความเสียหาย [9] ลาไมเทียได้คิดวิธีในการวัดค่าความเสียหายด้วยกัน 8 วิธีและยังได้แสดงข้อดีของแต่ละวิธีว่าใช้ได้กับการแตกหักแบบใด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายกับค่าวิกฤตของความเสียหายจะอยู่ในรูปของความเสียหายสัมพันธ์ (D_{rel}) คือ

$$D_{rel} = \frac{D}{D_C} \tag{11}$$

4. การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น

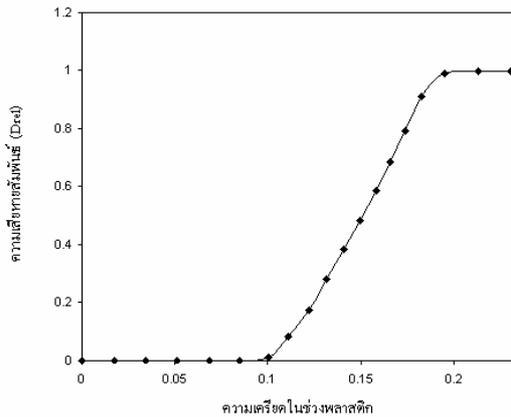
ในส่วนแรก จะเป็นการทดลองในการจำลองปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการดึงชั้นงานแกนเดียว กับชั้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่อุณหภูมิในการดึง 20 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 8 ซึ่งได้แสดงขนาดของชั้นงานและแบบจำลองการแบ่งเอลิเมนต์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่ชั้นงานมีความหนาจริงเป็นปัญหาระนาบความเครียด การจำลองนั้นได้เลือกใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Superform2002 ค่าพารามิเตอร์ในสมการความเสียหายของลาไมเทีย สำหรับชั้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ $h=0.2$, $D_c=0.99$, $\epsilon_{PR}=0.195$, $\epsilon_{PD}=0.1$, $\sigma_u=500$ MPa [10]



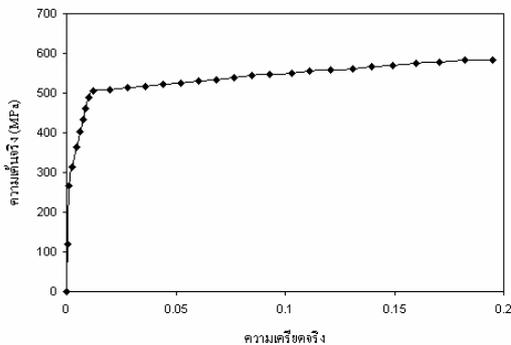
ก. ขนาดของชั้นงาน ข. แบบจำลองการแบ่งเอลิเมนต์

รูปที่ 8 ขนาดของชั้นงานและแบบจำลองการแบ่งเอลิเมนต์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในชั้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316

ในรูปที่ 9 ได้แสดงกราฟของความเครียดในช่วงพลาสติกกับค่าความเสียหายสัมพันธ์ D_{rel} (Relative Damage) จากรูปจะเห็นว่าค่าความเสียหายสัมพันธ์จะเริ่ม เมื่อความเครียดในช่วงพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0.1 นั่นคือการแสดงถึงค่า $\epsilon_{PD} = 0.1$ และเมื่อถึงไปเรื่อยๆ ค่าความเสียหายสัมพันธ์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 เมื่อค่าความเครียดในช่วงพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0.195 ($\epsilon_{PR} = 0.195$) นั่นคือถึงจุดที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักนั่นเอง

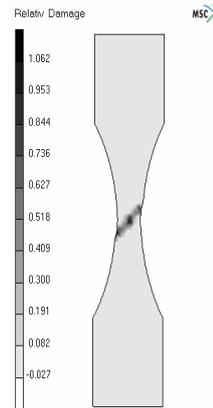


รูปที่ 9 ความเครียดในช่วงพลาสติกกับค่าความเสียหายสัมพันธ์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความเค้นจริงกับความเครียดจริง

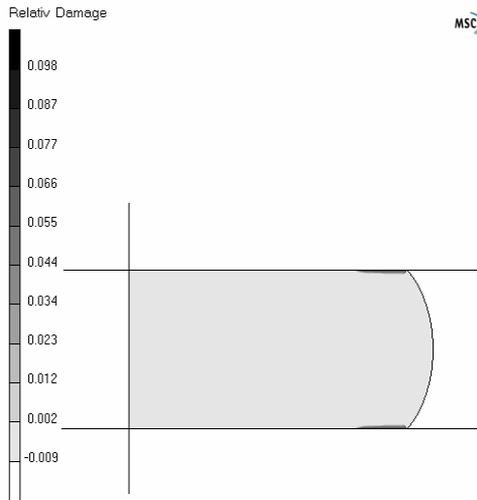
ในรูปที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นจริง กับความเครียดจริง ส่วนในรูปที่ 11 แสดงคอนทัวร์การกระจายค่าความเสียหายสัมพันธ์ที่ระยะการดึง 1.6 มิลลิเมตรโดยค่าความเสียหายสัมพันธ์จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเมื่อค่าความเสียหายสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 1 นั้นหมายถึงชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกัน



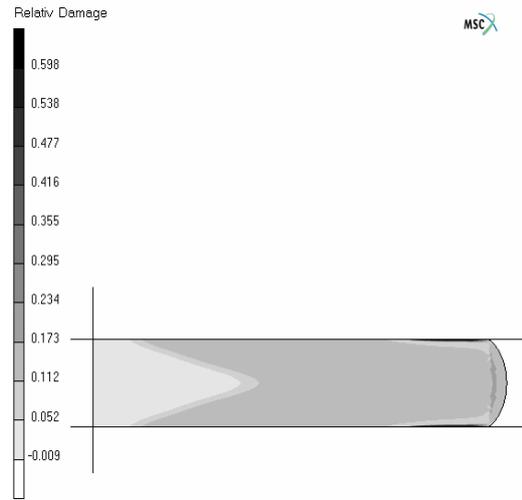
รูปที่ 11 คอนทัวร์การกระจายค่าความเสียหายสัมพันธ์ D_{rel} ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่ระยะการดึง 1.6 มิลลิเมตร

ส่วนที่สองนั้น จะเป็นการจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับปัญหาการตี ย่นขึ้นรูป โดยที่ชิ้นงานเป็นทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ทำการตี ย่นที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งในหัวข้อที่ 2 ที่ผ่านมามีได้กล่าวถึงการ วิเคราะห์ความเค้นกับความเครียดที่เกิดขึ้นไปแล้ว แต่ไม่ได้รวมความเสียหายที่จะเกิดกับชิ้นงานเข้าไปวิเคราะห์ด้วย ซึ่งสมการในหัวข้อที่ 2 จะ ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นกับความเครียด ได้แค่ถึงจุดก่อนการเกิดคอด คอต นั่นคือต่ำกว่าจุดความเค้นสูงสุดที่ทำให้การแตกหักนั่นเอง แต่ในความเป็นจริงในการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะนั้น จุดประสงค์หลักก็คือ ต้องการงานที่ขึ้นรูปแล้วปราศจากการแตกหักของชิ้นงาน ดังนั้นในหัวข้อ นี้จะมาดูถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานต่อไป โดยในหัวข้อนี้จะใช้ ความเค้นที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 2 มาใช้ในการคำนวณความเสียหายที่เกิดขึ้นในการตี ย่นขึ้นรูปชิ้นงาน ค่าพารามิเตอร์ของความเสียหายในสมการของลามไทย์สำหรับชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% จากการทดลองคือ $h = 0.6$, $D_c = 0.85$, $\epsilon_{PR} = 0.13$, $\epsilon_{PD} = 0.57$, $\sigma_u = 66 \text{ MPa}$ [10]

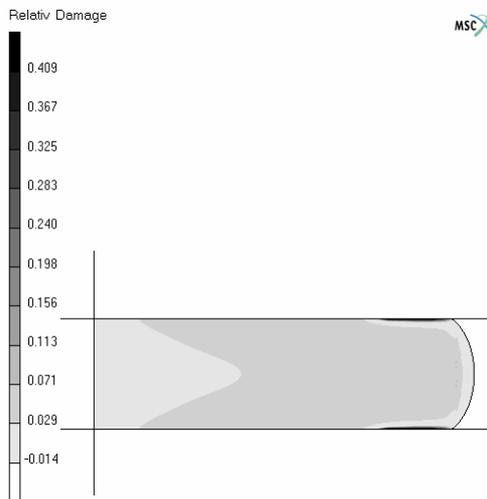
ในรูปที่ 12 ได้แสดงคอนทัวร์การกระจายความเสียหายสัมพันธ์ ชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ที่เปอร์เซ็นต์การตี ย่น 54, 68, 74 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ในการวิเคราะห์กลศาสตร์ความเสียหายนี้ จะทำให้ทราบ ถึงลักษณะชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูปโลหะแล้วว่า เกิดความเสียหาย จนแตกหักหรือไม่ และยังทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการ ขึ้นรูปโลหะว่าเกิดความเสียหายมากที่จุดไหน หรือเกิดความเสียหายจน แตกหักในขณะที่ทำการขึ้นรูปโลหะหรือไม่ ซึ่งถ้าวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 ที่ได้ทำการตี ย่นขึ้นรูปชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ไป 39.4 เปอร์เซ็นต์นั้น ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นถ้าดูจากค่าความเสียหายสัมพันธ์ จะยังไม่เกิดความเสียหายสัมพันธ์ขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยังไม่ เกิดความเสียหายจนเกิดการแตกหักขึ้น



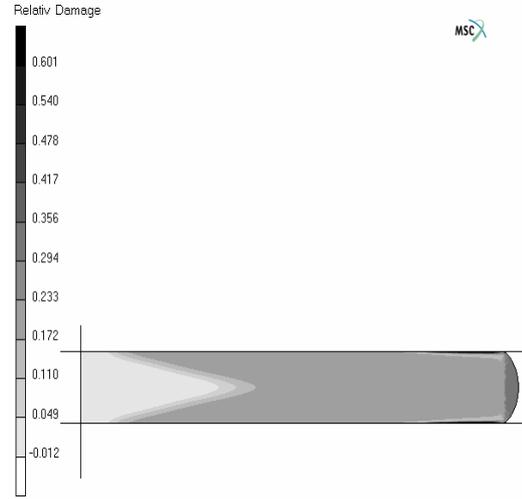
ก. การตี้น 54 เปอร์เซ็นต์



ค. การตี้น 74 เปอร์เซ็นต์



ข. การตี้น 68 เปอร์เซ็นต์



ง. การตี้น 79 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 12 คอนทัวร์ของการกระจายความเสียหายสัมพันธ์บนชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.9%

5. สรุป

การวิเคราะห์ปัญหาในการขึ้นรูปโลหะนั้น นอกจากการวิเคราะห์การแปลงรูปที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวไปแล้ว ยังจำต้องวิเคราะห์ถึงการแตกหักที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานทั้งในขณะที่ทำการขึ้นรูป และหลังการขึ้นด้วย เพราะคงไม่มีใครต้องการชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้แต่เกิดการแตกหักขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์การแตกหักก็มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน และจากการศึกษาค้นคว้าวิธีต่างๆ ในการวิเคราะห์การแตกหัก ได้ข้อสรุปมาอยู่ที่วิธีการวิเคราะห์การแตกหักด้วยสมการกลศาสตร์ความเสียหาย ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีอื่นก็คือมีการวิเคราะห์ลงไปถึงระดับจุลภาคทำให้ตัวสมการสามารถวิเคราะห์ผลการแตกหักได้แม่นยำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองนำมาใช้ในการทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นกับการตี้นชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และได้เลือกใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

ทางด้านเชิงพาณิชย์ชื่อโปรแกรม MSC.Superform2002 ในการจำลองการวิเคราะห์การแตกหักด้วยสมการกลศาสตร์ความเสียหายของลาไมเทีย โดยพิจารณากรณีสมมาตรรอบแกน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้รับจากการทำนายโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของค่าแรงที่ใช้ในการตีเมื่อเปรียบเทียบกับทดลองตีขึ้นรูปจริง ในช่วงระยะการตี้นตั้งแต่ 0 ถึง 10 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดประมาณ 23% ที่ระยะการตี้น 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งเห็นได้ว่าสามารถให้ผลลัพธ์การทำนายเป็นที่ยอมรับได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gouveia, B.P.P.A., Rodrigues, J.M.C. and Martins, P.A.F., “Fracture Predicting in Bulk Metal Forming”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, No. 4, 1995, pp. 361-372.
- [2] Chaboche, J.L., “Continuum Damage Mechanics : A Tool to Describe Phenomena before Crack Initiation” , *Nuclear Engineering and Design* 64, 1981, pp. 233-247.
- [3] Chaboche, J.L., “Continuum Damage Mechanics: Present State and Future Trends”, *Nuclear Engineering and Design* 105, 1987, pp. 19-33.
- [4] Chaboche, J.L. and Rousselier, G., “On Plastic and Viscoplastic Constitutive Equation, Part I: Rules Developed with Internal Variable Concept; Part II: Application of the Internal Variable Concept to 316 Stainless Steel”, *Journal of Pressure Vessel and Piping Technology*, Vol.150, 1983, pp. 153-170.
- [5] Chaboche, J.L. and Lemaitre J., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- [6] Dunne, F.P.E. and Hayhurst, D.R., “Continuum Damage Based Constitutive Equation for Copper under High-Temperature Creep and Cyclic Plasticity”, *Proc. R. Soc. Lond*, Vol. A437, 1992, pp. 545-56.
- [7] Behrens, A. and Just, H., “Extension of the Forming Limits in Cold and Warm Forging by the FE Based Fracture Analysis with the Integrated Damage Model of Effective Stresses”, *Journal of Materials Processing Technology* 125–126, 2002a, pp. 235–241.
- [8] Behrens, A. and Just, H., “Verification of the Damage Model of Effective Stresses in Cold and Warm Forging Operations by Experimental Testing and FE Simulations”, *Journal of Materials Processing Technology* 125–126, 2002b, pp. 295–301.
- [9] Hambli, R. and Badie-Levet, D., “Damage and Fracture Simulation during the Extrusion Processes”, *Computer Methods Apply Mechanical Engineering* 186, 2000, pp. 109-120.
- [10] Lemaitre, J., *A Course on Damage Mechanics*, 2nd ed., Springer, Munich, 1996.