กลศาสตร์การเกิดรอยร้าวขึ้นบนแผ่นวัตถุไอโซทรอปิคเชิงปฏิบัติการ

FRACTURE MECHANIC OF ISOTROPIC PLATE

โดย

นายกรรณ์ อัสสันตชัย รหัส 35104008

นายวิทูรย์ มมวัตสกุล รหัส 35104385

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โศภน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

วัน เดือน ปี 31 ก.ค. 2540

เลขทะเบียน 037012

เลขเรียกหนังสือ T 38105 ก1ท1 ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากลศาสตร์ของรอยแตกของโลหะไอโซทรอปิคเชิงปฏิบัติการ

ผู้จัดทำ

นาย กรรณ์ อัสสันตชัย รหัส 35104008

นาย วิฑูรย์ มฆวัตสกุล รหัส 35104385

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. สมชัย นวเศรษฐ์โศภน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

สิ่งสำคัญต่อกลไกการแตกคือคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งก็คือการเริ่มต้นของรอยแตก คุณสมบัติเช่นนี้จะเรียกว่า"ความแข็ง " และหาค่าได้จากขั้นตอนการทดลองที่ดี ตัวอย่างเช่นความแข็งของการเริ่มต้นรอยแตกที่มีความเค้นในระนาบ K_{ic} คือความต้านทานของวัสดุต่อการเริ่มต้นรอยแตก เมื่อตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ใช้งาน $K_I > K_{Ic}$ รอยแตกจะเริ่มเกิดขึ้นและขยายตัวในโครงสร้าง เพราะว่า K_I เป็นฟังก์ชั่นเส้นตรงกับโหลดที่ใช้ โหลดวิกฤตจึงเกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นรอยแตก

เรื่องถัดไปคือค่า r_p คือค่าที่วัดได้ของขนาดเขตพลาสติกตามแกน x นอกจากเกี่ยวข้องกับการแก้ไขค่า K_I แล้ว r_p ยังมีความสำคัญในการหาว่าวัตถุนั้นมีการคลากเป็นขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เมื่อ r_p มีขนาดเล็กโดยเทียบกับความยาวของส่วนที่ไม่เกิดรอยแตกวัตถุนั้นจะมีการคลากเป็นขนาดเล็ก ในสภาพนี้วัตถุตอบสนองเป็นความเครียดและการกระจัดแบบชนิดยืดหยุ่น ส่วนภายนอกเขตพลาสติกความเครียดและการกระจัดจะเปลี่ยนไปตามโหลดแบบเส้นตรง ในการคลากที่มีขนาดใหญ่ r_p จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับความยาวของส่วนที่ไม่เกิดการแตกหัก วัตถุจะไม่ตอบสนองเป็นแบบยืดหยุ่นเนื่องจากการกระจายความเค้นที่มากซึ่งเกิดขึ้นจากการคลากขนาดใหญ่

ต่อไปคืออัตราการปลดปล่อยพลังงาน G ซึ่งเกี่ยวข้องกับแหล่งปล่อยพลังงานทั้งหมดที่จำเป็นในการทำให้เกิดการขยายรอยแตกขึ้นเมื่อถึงสภาพวิกฤต หน่วยไร้มิติที่เหมาะสมคือพลังงานต่อพื้นที่รอยแตก ซึ่งก็คือพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่รอยแตกหนึ่งหน่วย เมื่อ G มีค่าถึงค่าวิกฤตซึ่งแทนด้วย G_c จะเกิดสภาวะไร้เสถียรภาพขึ้นและรอยแตกเกิดการแผ่ขยาย

ในโครงสร้างแบบง่าย (เช่น แผ่นขนาดใหญ่) การควบคุมรอยแตกจะเกี่ยวข้องกับสามตัวแปรคือ ขนาดของช่องโหว่ โหลด ความแข็งของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

The important aspect of fracture mechanics is the characterization of the material property that defines the onset of crack initation . This properety is termed "toughness" and it is determined using well-defined testing procedures. For example, the plane-stress crack initiation toughness K_{ic} defines the resistance of the material to crack initiation. When the applied stress intensity factor $K_I \geq K_{ic}$, the crack initiates and extends into the structure. Since K_I is a linear function of the applied load , the critical load associated with crack inition.

Next, the value of r_p is the measure of the size of plastic zone along the x axis. Apart from correcting the determination of K_I , r_p is important in establishing if the body is in a state of small-scale yielding or large-scale yielding.When r_p is small compared to the length of the uncracked ligament, the body is subjected to small-scale yielding.In this state it responds in nearly an elastic manner with strains and displacements, outside the small plastic enclave, varying linearlywith respect to load. In large-scale yielding, r_p is large compared to the length of the unbroken ligament. The body does not respond elastically due to the significant redistribution of stress caused by large-scale yielding.

Then , the energy release rate G is related to the source of total energy which is needed to cause crack extension once a critical situation is reached. Its proper dimensional units are energy per crack area , that is , the energy require to increase the crack by some unit area. When G reachs a critical value , usually denoted as G_c , an instability condition is reached and crack propagation occurs.

In a simple structure (e.g. a large plate) , fracture control is connected to the three elements , namely, flaw size , load , material toughness.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

ในปี ค.ศ. 1962 สะพานคิงส์(Kings Bridge) ในเมลเบิร์นพังทลายลง เนื่องจากการแตกหักแบบเปราะ เนื่องจากโครงสร้างและการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐานทำให้เกิดรอยแตกตลอดปีกของคาน(Flang)ก่อนที่จะมีการรับแรงใช้งาน แม้ว่าการพังทลายของสะพานนี้จะได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่วงการอุตสาหกรรมการก่อสร้างสะพานก็ไม่ได้ให้ความสนใจอย่างเจาะจงต่อโอกาสที่จะเกิดการแตกแบบเปราะในสะพาน จนกระทั่งปีค.ศ. 1967เกิดการพังทลายของสะพาน Point Pleaseant ที่ West Verginia ซึ่งการพังทลายโดยไม่มีสัณญาณบอกล่วงหน้านี้ทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 46 ราย

Bennett และ Mindlin ทำการศึกษาถึงการพังทลายของสะพานนี้ตามหลักกลไกการแตก และสรุปว่า

1. การแตกที่เกิดขึ้นใน lower limb ของ eye เนื่องจากการขยายตัวของช่องโหว่ซึ่งขยายจนถึงจุดวิกฤตของการแตก ภายใต้ความเค้นการทำงานปกติ

2. ช่องโหว่เริ่มต้นเกิดจากการแตกแบบสึกกร่อนของความเค้นจากพื้นผิวของหลุมใน eye โดยมีหลักฐานยืนยันว่า Hydrogen Sulfide เป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนแบบนี้

3. Composition และ Heat Treatment ของ eyebar ทำให้เกิดเหล็กกล้าที่มีความแข็งต่อการแตกต่ำที่อุณหภูมิล้มเหลว

กลไกของการแตกแสดงให้เห็นว่า เราไม่สามารถกำจัดการแตกแบบเปราะในโครงสร้างโดยใช้เพียงวัสดุที่ปรับปรุงความแข็งของรอยตัดรูปตัว V (Improve notch toughness) เพราะว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างวัสดุ การออกแบบ การสร้าง การรับแรง กลไกของรอยแตกจะทำให้ตัวแปรทางปริมาณสามตัวสมดุลกันคือ ความเค้น ความแข็งของวัสดุและขนาดของช่องโหว่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยแตกและการควบคุมรอยแตก

(Fracture and fracture control)

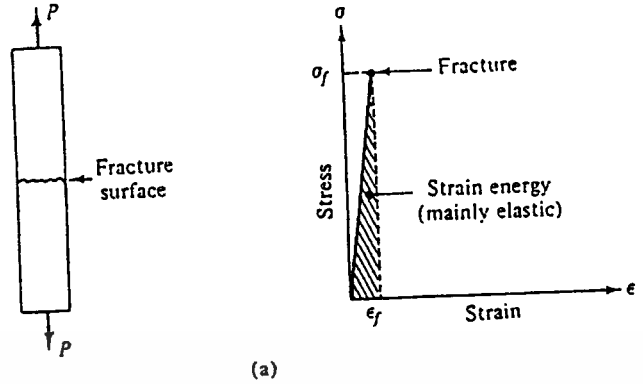
รอยแตกเป็นสิ่งที่พบเห็นได้ทั่วไป อาจจะเป็นสิ่งที่ต้องการหรือไม่ก็ตาม เป็นไปไม่ได้ที่เราจะผลิตวัตถุแข็งชนิดหนึ่งที่สมบูรณ์โดยไม่มีช่องโหว่ (flaw) หรือรอยแตก (crack) ฉะนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาคุณสมบัติของรอยแตกเพื่อป้องกันมิให้เกิดขึ้น

ทฤษฎี

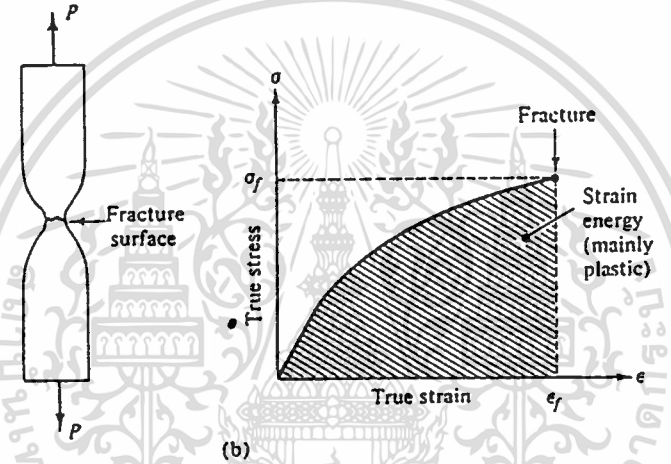
ชนิดของรอยแตก

โดยทั่วไปรอยแตกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เปราะ (brittle) และ เหนียว (ductile) ความเครียดมีส่วนสำคัญในรอยแตกทั้ง 2 ชนิด ถ้าเป็นชนิดเปราะ จะมีความเครียดน้อย เพราะมีการเสียรูป (deformation) ที่แน่นอน และเปลี่ยนรูปร่างได้น้อยมาก ของแข็งที่มีรอยแตกชนิดนี้ เช่น แก้ว เหล็กหล่อสีเทา ชิ้นส่วนที่แตกของของแข็งชนิดนี้ สามารถนำมาต่อกันใหม่ โดยที่รูปร่างโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าเป็นชนิดเหนียวจะมีความเครียดมาก และมีการเสียรูปแบบพลาสติก ก่อนที่จะเกิดการขาดอย่างแท้จริง ชิ้นส่วนที่ขาดของของแข็งชนิดนี้อาจจะต่อกันใหม่ได้ แต่รูปร่างโดยรวมจะแตกต่างจากเดิมมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

(c)

พฤติกรรมความเค้น-ความเครียด ของวัสดุเปราะ(รูปที่ 1) , วัสดุเหนียว (รูปที่ 2) , ชนิดของรอยแตก cup และcone (รูปที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1 เป็นการทดสอบโดยดึงเหล็กหล่อสีเทา หรือ แก้ว ภายใต้ความเค้นดึงแบบแกนเดียว จากผลการทดสอบ รูปร่างและพื้นที่ของวัสดุทดสอบไม่เปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ($\sigma-\varepsilon$)แสดงให้เห็นว่ามีการสะสมพลังงานความเครียดในวัสดุทดสอบ เมื่อเริ่มเกิดรอยแตก แม้ว่าของแข็งชนิดเปราะมีความเค้นในรอยแตก(σ_f)ค่อนข้างสูง แต่ค่าความเครียดของรอยแตก(ε_f)ที่น้อย ชี้ให้เห็นว่าพลังงานที่สะสม ก่อนถึงรอยแตกต้องมีค่าน้อย เพราะเหตุนี้ความล้มเหลว (failure) ของรอยแตกชนิดเปราะจึงใช้พลังงานน้อย

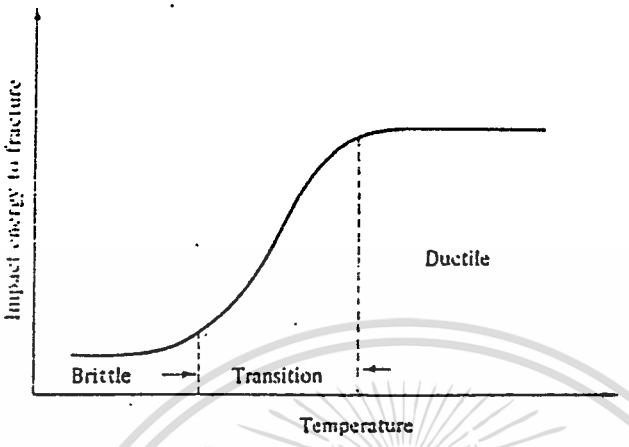
จากรูปที่ 2 เป็นการทดสอบวัสดุชนิดเหนียว เช่น ตะกั่ว อลูมิเนียม ในกรณีนี้ พื้นที่ของวัสดุลดลงมาก และมีการสะสมพลังงานความเครียดเป็นจำนวนมาก ก่อนที่จะเกิดรอยแตกอย่างแท้จริง

กลไกของรอยแตกแบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง

(Linear elastic fracture mechanics : LEFM)

เป็นที่ยอมรับกันว่าตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบรอยแตกชนิดเปราะคือ ขนาดรูปร่าง ตำแหน่งที่มีรอยร้าวมากที่สุด ขนาดของความเค้นดึงที่ใช้ และ คุณสมบัติของวัสดุที่เรียกว่าความแข็งแรงของรอยแตก (fracture toughness) ตัวแปรชนิดอื่นเช่น อุณหภูมิ อัตราความเครียด แม้จะมีความสำคัญอยู่บ้างแต่ก็เป็นเพียงตัวแปรลำดับสอง ปกติการเปรียบเทียบทางคุณภาพของวัสดุซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ทำให้เกิดรอยแตก จะใช้การทดสอบรอยแตกของ Charpy V (Charpy V Notch test : CVN) ข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากจากการทดลองนี้คือ การเปลี่ยนแปลงจากชนิดเหนียวสู่ชนิดเปราะซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างไรก็ตาม ค่าเชิงตัวเลขจากการทดลองไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์โดยตรงที่จะนำไปสู่การทำนายคุณภาพของวัสดุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 รูปร่างโดยทั่วไปของกราฟ Charpy

กลไกของรอยแตกแบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง จะใช้สมการในการบอกขนาดและ การกระจายความเค้นรอบ ๆ ส่วนปลายของรอยแตกเป็นฟังก์ชั่นของความเค้นที่ใช้ขนาด และ รูปร่างของรอยแตก และ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor : k) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงอิทธิพลของรอยร้าวต่อความเค้นรอบ ๆ ส่วนปลายของรอยแตก ค่า k บอกถึงสนามความเค้น (stress field) และ k_c คือ ค่าวิกฤตที่แสดงถึงการขยายตัวของรอยแตก ปกติจะมีการแยกของรอยแตกอยู่ 3 แบบ ซึ่งเรียกว่า แบบ I , II , III ดังแสดงในรูปที่ 5 และตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับ 3 แบบนี้แทนด้วย k_I, k_{II} ,k_{III} ส่วนใหญ่เราจะพบแบบที่ I มากกว่า แบบ II , III และการวิจัยส่วนมากจะศึกษาในแบบนี้จึงขอข้ามรายละเอียดของแบบที่ II , III ไป แบบที่ I ที่เราสนใจคือสภาพความเครียดในระนาบ (plane strain)ตัวแปรวิกฤตของแบบที่ I คือ k_{Ic} แสดงถึงสนามความเค้นของแบบที่ I คือ

$$\sigma_y = [k_I /(2\pi r)^{1/2}] \cos\theta/2 \, [1+\sin\theta/2\sin3\theta/2]$$

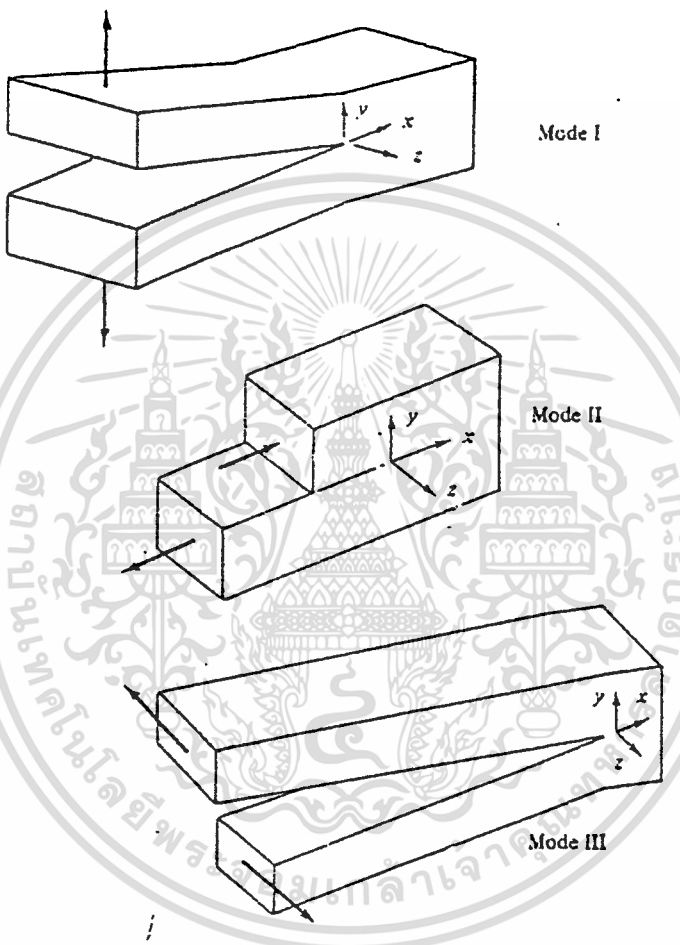
$$\sigma_x = [k_I /(2\pi r)^{1/2}] \cos\theta/2 \, [1-\sin\theta/2\sin3\theta/2]$$

$$\tau_{xy} = [k_I /(2\pi r)^{1/2}] \sin\theta/2\cos\theta/2\cos3\theta/2$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x+\sigma_x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

τ_{xy} ,τ_{xy} = 0



รูปที่ 5 การรับแรง 3 แบบที่ใช้ในการวิเคราะห์กลไกของรอยแตกแบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น

(stress intensity factors : k_I)

รอยแตกในวัตถุระนาบที่มีขนาดจำกัดเป็นสิ่งสำคัญ เพราะรอยแตกจะเป็นอันตรายต่อเสถียรภาพ และ ความปลอดภัยของโครงสร้างทั้งหมด จึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรูปร่างเฉพาะ และโหลดที่เกี่ยวข้องเพื่อประเมินค่าตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับแผ่นวัสดุที่มีรอยแตก

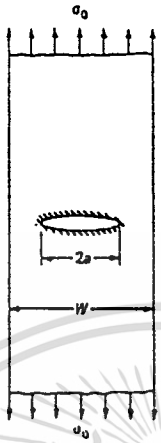
พิจารณาแผ่นวัสดุภายใต้ความเค้นที่มีรอยแตกอยู่กึ่งกลางดังแสดงในรูปที่ 6 สูตรประมาณค่า k_I คือ

$$k_I = (w/\pi a * \tau\alpha\nu\pi\alpha/w)^{1/2} (\pi a)^{1/2} \sigma_0$$

หรือเขียนอีกแบบได้ คือ $k_I = \alpha k_{I\alpha}$

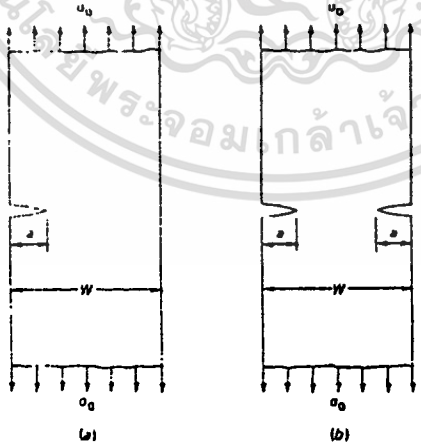
เมื่อ $\alpha = [w/(\pi a * \tan(\pi a/w)]^{1/2}$ และ $k_{I\alpha} = (a\pi)^{1/2} \sigma o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แผ่นวัสดุภายใต้ความเค้นที่มีรอยแตกอยู่กึ่งกลาง

ต่อไปพิจารณารอยแตกที่ขอบข้างเดียว และสองข้างในแผ่นภายใต้ความเค้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่7 แผ่นวัสดุภายใต้ความเค้นที่มีรอยแตกข้างเดียว (a) รอยแตกข้างเดียว (b)รอยแตกสองข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรอยแตกข้างเดียว (single- edge crack : SEC)

$$\alpha = 1.12 - 0.231\,(a/w) + 10.55(a/w)^2 - 21.71(a/w)^3 + 30.38(a/w)^4$$

สำหรับรอยแตกสองข้าง (double-edge crack :DEC)

$$\alpha = 1.12 - 0.429(a/w) - 4.78(a/w)^2 + 15.44(a/w)^3$$

ค่าของ α ที่อัตราส่วน a/w แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

a/w	SEC	DEC
0	1.12	1.12
0.1	1.18	1.13
0.2	1.37	1.14
0.3	1.66	1.24
0.4	2.10	1.52
0.45	2.42	1.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นพลาสติกที่ส่วนปลายของรอยแตก

(Crack-tip Plasticity)

ที่ส่วนปลายของรอยแตก และ บริเวณใกล้เคียงส่วนปลายรอยแตกวัสดุจะมีค่าความเค้นเกินกว่าค่ากำลังคลาก (yield strength) ของวัสดุทดลองในบริเวณนี้จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และเพราะว่าความเค้นถูกจำกัดด้วยการคลาก (yielding)ภาวะเอกฐานของความเค้นจึงไม่เกิดขึ้น บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกนี้เรียกว่า เขตพลาสติกที่ส่วนปลายรอยแตก (crack-tip plastic zone)ขนาดของเขตพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญ เพราะว่า การพัฒนากลไกของรอยแตกจะแน่นอนถ้าขนาดของเขตพลาสติกเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวของส่วนปลายรอยแตกถึงขอบที่ใกล้ที่สุด เพื่อศึกษาขนาดของเขตพลาสติก ก่อนอื่นต้องพิจารณาขนาดของ σ_{yy} ในแกน x ที่ $\theta = 0$ กำหนดให้ $\sigma_{yy} = \sigma_{ys}$, σ_y คือกำลังครากของวัสดุ

$$\sigma_{yy} = [(a)^{1/2}/2r^{*}_{p}]\,\sigma_0 = \sigma_{ys} \qquad (1)$$

เมื่อ r^{*}_{p} คือระยะที่ปรากฏ ตามแกน x ในเขตพลาสติก

$$v^{*}_{p} = a/2(\sigma_o/\sigma_{ys})^2 \qquad (2)$$

ระยะทางที่ปรากฏ r^{*}_{p} แสดงในรูปที่ 7 เมื่อมีการกระจาย σ_{yy} ตลอดแกน x พื้นที่แรเงาในรูปที่ 8 แสดงถึงการปล่อยโหลด P_s เนื่องจากการคลาก ดังนั้น

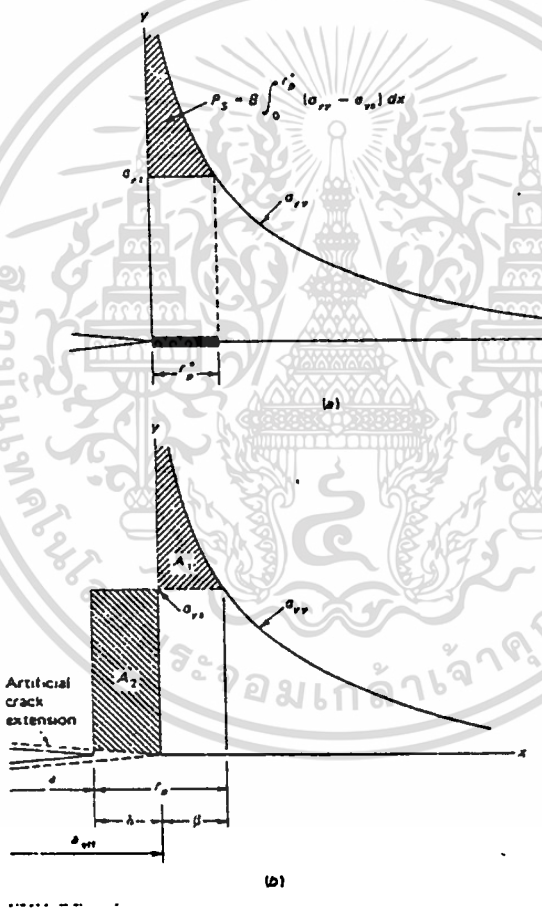
$$p_s = B\int_0^{r_p} (\sigma_{yy} - \sigma_{ys})\,dx \qquad (3)$$

ผลจากการปล่อยโหลดจะทำให้เพิ่มขนาดของเขตพลาสติก เพราะ วัสดุยังคงต้องรับ P_s รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของเขตพลาสติกที่ขยายรอยแตกเป็นระยะทาง δ ระบบ coordinate ถูกเปลี่ยนโดย δ สู่ ส่วนปลายของรอยแตกที่ขยายตัว และความเค้น แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

elastic σ_{yy} ถูกจำกัดด้วยความเค้นคลาก σ_{ys} พื้นที่ทั้ง A_1 และ A_2 แสดงในรูปที่ 8 พื้นที่ A_1 สัมพันธ์กับการปล่อยโหลดดังที่สมการที่ 3 อย่างไรก็ตาม พื้นที่ A_2 สัมพันธ์กับการสูญเสียโหลดเนื่องจากการขยายตัวของรอยแตก เพื่อรักษาความสมดุลพื้นที่ทั้งสองต้องเท่ากัน ดัดแปลงสมการ 1 เพื่อใช้กับการเปลี่ยนเนื่องจากการขยายตัวของส่วนปลายรอยแตก

$$\beta = (a+\delta)/2\ (\sigma_o/\sigma_{ys})^2 \qquad (4)$$



รูปที่ 8 (a) การคลากเกิดที่ส่วนปลายด้านหน้าของรอยแตก

(b) การขยายรอยแตกที่สร้างขึ้นโดยไม่สอดคล้องกับรูปแบบการคลากที่ปรับปรุงแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่า $\delta << a$ สมการที่ 4 แสดงว่า $\beta \approx r^*_p$ ความสมดุลที่ต้องการเพื่อให้ $A_1=A_2$ และจากสมการที่ 3 , 1 จะได้

$$\sigma_0 \int_0^{r_p} [(a+s)/2x]^{1/2} \, dx = \sigma_{ys} (r^*_p + s) \qquad (5)$$

อินทิเกรตและทำให้อยู่ในรูปที่ง่าย จะได้

$$(r^*_p + \delta)^2 = 2(a + \delta)(r^*_p)(\sigma_o/\sigma_{ys})^2 \qquad (6)$$

เพราะว่า δ เล็กเมื่อเทียบกับ ความยาวของรอยแตกเมื่อเริ่มต้น a จากสมการ (6) และ (2) จะได้

$$r^*_p + \delta = 2r^*_p \qquad (7)$$

ซึ่งจะได้ $r^*_p = \delta$ และความยาวจริง r^*_p ของเขตพลาสติกหน้ารอยแตก

$$r_p = \delta + \beta = 2r^*_p \qquad (8)$$

เพื่อแสดงผลของเขตพลาสติก ความยาวรอยแตกประสิทธิผล a_{eff} จะได้

$$a_{eff} = a + r^*_p \qquad (9)$$

ค่าของ a_{eff} ใช้เพื่อหาค่า k_I และจากสมการ $k_I = \pi a \sigma_o$ จะได้

$$k_I = [\pi a(1+(1/2)(\sigma_0/\sigma_{ys})^2]^{1/2} \sigma_o \qquad (10)$$

สังเกตว่า $r^*_p \approx \beta$ และจากสมการที่ (4) ได้

$$r^*_p = a/2 (\sigma_0/\sigma_{ys})^2 \qquad (11)$$

แทนค่าสมการ (11) ใน สมการ (10) จะได้ ค่า k_I ที่แก้ไขสำหรับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ส่วนปลายรอยแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_I = [\pi a(1+(1/2)(\sigma_0/\sigma_{ys})^2)]^{1/2}\,\sigma_0 \qquad (12)$$

ค่าของ r_p จะวัดจากขนาดของเขตพลาสติกตามแกน x นอกจากเพื่อการแก้ไขค่า k_I แล้ว r_pยังมีความสำคัญในการหาว่าวัสดุอยู่ในภาวะที่คลากเป็นขนาดที่น้อยหรือมาก

อัตราการปลดปล่อยพลังงานหรือแรงขยายตัวรอยแตก(G)

พิจารณากรณีที่วัสดุรับแรงเป็นชนิดแข็ง (rigid) และส่วนปลายทั้งสองยึดคงที่ เพราะว่าส่วนปลายทั้งสองถูกยึดคงที่จึงไม่มีงานเกิดขึ้น และพลังงานความเครียดที่สะสมในวัสดุจะลดลงเพราะการใช้พลังงาน w ในระหว่างการขยายตัว d_a สมการพลังงาน สำหรับกรณีส่วนปลายถูกยึดคงที่ คือ

$$\frac{d}{da}(u+w) = 0$$

$$\frac{dw}{da} = -\frac{du}{da}$$

$$G = -\frac{du}{da}$$

G คือ อัตราการปล่อยพลังงาน หรือ แรงขยายตัวรอยแตก

$$R = \frac{dw}{da}$$

R คือ แรงต้านการเติบโตของรอยแตก , สำหรับรอยแตกที่อยู่นิ่ง

$$G \leq R$$

สำหรับรอยแตกที่ไม่เสถียรภาพ ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นและขยายตัว

$$G > R$$

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงขยายตัวรอยแตก G และ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น k_I โดยพิจารณางานที่ปล่อยออกใกล้ส่วนปลายของรอยแตก ขณะที่รอยแตกขยายตัวเป็นระยะทางเล็ก ๆ δ ใช้วัสดุที่มีรอยแตกซึ่งส่วนที่ปลายยึดจับคงที่ และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวของรอยแตก a ใส่แรงที่ผิวหน้าของรอยแตกเป็นระยะทาง δ ซึ่งจะปิดรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 9 งานเนื่องจากแรงในการปิดใน limit

จะเท่ากับแรงขยายตัวของรอยแตก G

$$G = \lim_{\delta \to 0} 1/\delta \int_0^{\delta} \sigma_y \quad v \, dx \qquad (14)$$

สามารถพิสูจน์ได้ว่า รอยเปิดของรอยแตก v เท่ากับ

$$v = (2\sigma_0/E) * (a^2 - x^2)^{1/2} \qquad (15)$$

แทนค่า $k_I = (\pi a)^{1/2} \sigma_0$ ในสมการ 15

$$v = (2k_I/\sqrt{\pi}\, a)(a-(x^2/a))^{1/2} \qquad (16)$$

จากรูปที่ 9 o_I อยู่ที่ตำแหน่ง $x = a - \delta$

$$x = a - \delta + x_1$$

$$x = r + a - \delta \qquad (17)$$

แทนค่า จากสมการ 17 ในสมการ 16 และสังเกตว่า $r << a$

และ $\delta << a$ ถ้าตัดทิ้ง second-order

$$v = (2k_I/(\pi)^{1/2}E)[2(\sigma - r)]^{1/2} \qquad (18)$$

เมื่อ $\sigma_{yy} = k_I/(2pr)^{1/2} \qquad (19)$

แทนค่าสมการ 18 และ 19 ในสมการ 14

$$G = \lim_{\delta \to 0} (2k_I^2/\pi E\delta)^{1/2} \, dr \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรตแล้วจะได้

$$G_I = k_I^2/E \qquad (21)$$

เกณฑ์ของความไร้เสถียรภาพของรอยแตก

เกณฑ์ของความไร้เสถียรภาพของรอยแตกขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการเกิดการขยายตัวของรอยแตก สำหรับวัสดุที่เป็นยืดหยุ่น และเปราะโดยสมบูรณ์ ซึ่งจะไม่เกิดเขตพลาสติกที่ส่วนปลายของรอยแตก พลังงานที่เพิ่มขึ้น dw ที่จำเป็นในการทำให้เกิดพื้นผิวของรอยแตกใหม่ทั้งสองจะเกี่ยวข้องกับการขยายตัว da ของรอยแตก

$$\frac{dw}{da} = 2r = R \qquad (22)$$

เมื่อ r คือ พลังงานพื้นผิวของวัสดุ , สมการของความเค้นวิกฤต คือ

$$\sigma_c = (2rE/\pi a)^{1/2} \qquad (23)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า ความยาวของรอยแตก a จะยังคงมีเสถียรภาพ ถ้า $\sigma_o < \sigma_c$

และการเติบโตของรอยแตกโดยกลไกต่างๆ (เช่น การขยายตัวจากความล้า การแตกจากการสึกกร่อนของความเค้น) จะลดค่าความเค้นวิกฤต ในการเริ่มต้นของรอยแต

$$\frac{dw}{da} = 2r + \frac{dw}{da}p \qquad (24)$$

เมื่อค่าที่เพิ่ม $\frac{dw}{da}$ p เนื่องจากงานที่ต้องการในการก่อตัวของเขตพลาสติกหน้าส่วนปลายของรอยแตกระหว่างการขยายตัว แนวคิดนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อขนาดของเขตพลาสติกคงที่ขณะที่รอยแตกขยายตัว จากการทดลองทำให้รู้ว่าขนาดของเขตพลาสติกค่อนข้างคงที่ในวัสดุหลายชนิด ในสภาพที่วัสดุแผ่นเพลทมีความเครียดในระนาบ จากค่าคงที่เพราะความเครียดในระนาบ

$$\frac{dw}{da} = R = G_{IC} \qquad (25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ G_{Ic} คือ อัตราการปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤต ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ

แทนค่า 2r ด้วย G_{Ic} ในสมการ 23

$$\sigma_c = (EG_{IC}/\pi a)^{1/2} \qquad (26)$$

สังเกตว่า อัตราการปล่อยพลังงานความเครียดในรูปของตัวประกอบความเข้มของความเค้น k คือ

สำหรับความเค้นในระนาบ

$$G_I = k_I^2/E \qquad (21)$$

สำหรับความเครียดในระนาบ

$$G_I = (1 - \gamma^2)k_I^2/E \qquad (27)$$

แทนค่าสมการ 27 ในสมการ 26 จะได้

$$\sigma_C = k_{IC}\,[(1-\gamma^2)/\pi a]^{1/2}$$

เมื่อ k_{Ic} คือ ความแข็งเริ่มต้นของรอยแตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุโดยหาภายใต้สภาพการทดสอบความเครียดในระนาบ

เราอาจจะใช้ G_{Ic} หรือ k_{Ic} ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของรอยแตกเมื่อพิจารณาว่า ขนาดของเขตพลาสติกเล็ก $r_p << a$ สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติความแข็งเฉพาะ , G_{Ic} รูปที่ 10 จะแสดงถึงอิทธิพลของระดับความเค้นที่ใช้ σ_0 กราฟนี้แสดง G_I ของแผ่นกว้างที่มีรอยแตกที่กึ่งกลางยาว 2a โดย a เป็นตัวแปรอิสระ และแสดงค่าของ σ_0 4 ค่า จุดตัดของเส้น G_I - a กับเส้นค่าคงที่ G_{Ic} จะบอกความยาวรอยแตกวิกฤต a_{c1} ถึง a_{c4} สำหรับระดับค่าความเค้นที่ใช้แตกต่างกัน σ_o

กราฟของเกณฑ์เสถียรภาพอีกกราฟหนึ่ง สำหรับการคลากขนาดเล็กแสดงในรูปที่ 11 k_I แสดงในรูปฟังก์ชั่นของความเค้นของสนามที่ไกล (Far- field stress) σ_o กับความยาวของรอยแตก a จุดตัดของเส้น k_I - σ_o กับเส้นค่าคงที่ k_{Ic} จะบอกค่าความเค้นวิกฤต σ_{c1}- σ_{c3} ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการเพิ่มเริ่มเกิดรอยแตก สังเกตว่า เส้น a = 1 หน่วย ไม่ตัดกับเส้น k_{Ic} ก่อน $\sigma_o > \sigma_{ys}$ ซึ่งแสดงว่า แผ่นวัสดุจะคลากและขาดเพราะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่มากขณะที่รอยแตกยังคงที่

การควบคุมรอยแตก

ปกติโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ จะมีช่องโหว่อยู่จึงจำเป็นที่จะต้องมีขั้นตอนการควบคุมรอยแตกในการออกแบบ การสร้าง และการบำรุงรักษา สิ่งที่ควรรู้ในการควบคุมรอยแตก คือ วัสดุจะมีช่องโหว่เสมอ และต้องรักษาให้ช่องโหว่อยู่ในสภาวะเสถียรภาพ อธิบายได้จากสมการโดยพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างธรรมดา และเป็นแผ่นวัสดุขนาดใหญ่ ซึ่งตัวประกอบความเข้มของความเค้นหาได้จาก

$$k_I = (\pi a)^{1/2} \sigma_0$$

รอยแตกในโครงสร้างนี้จะมีเสถียรภาพถ้า

$$k_{Ic} > k_I$$

หรือ

$$(\pi a)^{1/2} \sigma_0 < k_{IC}$$

จากความสัมพันธ์ทางเสถียรภาพนี้จะเห็นว่ามีตัวแปร 3 ตัว ในขั้นตอนการควบคุมรอยแตก คือ

1. ขนาดของช่องโหว่ , a
2. โหลด หรือ ความเค้นที่ใช้ , σ_o
3. ความแข็งของวัสดุ , k_{Ic}

ปกติแผนการควบคุมรอยแตกโดยทั่วไปจะพิจารณาความต้านทานของวัสดุ (เช่น ความแข็งที่เริ่มต้นรอยแตก k_{Ic}) เป็นขั้นแรกในการรักษารอยแตกให้อยู่ในสภาวะเสถียรภาพ การเลือกวัสดุจะกำหนดค่าขีดจำกัดบนของ k_{Ic}

ขั้นที่สอง ในการควบคุมรอยแตก คือ การตรวจสอบ เพื่อหาขนาดของช่องโหว่ , a ซึ่งความยาวรอยแตกวิกฤต a หาได้จาก

$$a_{cr} = \frac{1}{\pi} (k_{Ic}/\sigma_0)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

037012

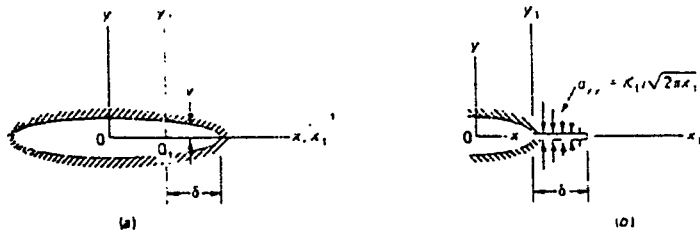
จะใช้รังสีเอ็กซเรย์ เซ็นเซอร์กระแสวน และอุลตร้าโซนิค ในการหาตำแหน่งของรอยแตก รอยแตกขนาดใหญ่ซึ่งมีความยาวใกล้เคียง หรือเกิน a_{cr} ต้องได้รับการแก้ไขอย่างไรก็ตาม รอยแตกขนาดเล็กซึ่งมีความยาว a_d ต่ำกว่าความยาวที่น้อยที่สุดที่ค้นหาได้ หรือความยาว a_r ต่ำกว่าขีดจำกัดที่ต้องแก้ไข

ยังคงมีอยู่ในโครงสร้าง รอยแตกเหล่านี้อาจจะเติบโตขึ้นระหว่างการใช้งาน ซึ่งจะลดความแข็งแรงของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 10 ช่วงเวลาเติบโตแสดงเวลาระหว่างรอยแตกที่ขยายตัวจาก a_r เป็น a_{cr} ปกติช่วงเวลานี้จะยาว และ ทำให้มีโอกาสในการตรวจสอบเป็นช่วง ๆ ระหว่างอายุการใช้งาน

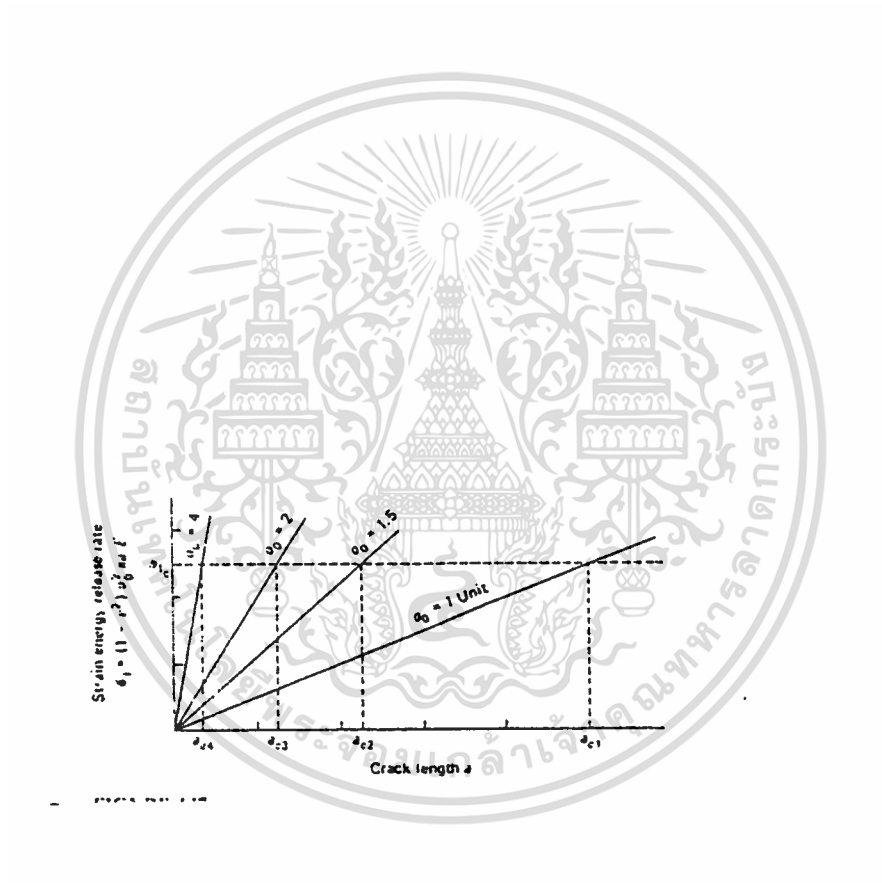
ขั้นที่สาม ในการควบคุมรอยแตก คือ การกำหนดความเค้นที่ใช้ σ_0 จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ความแข็งแรงของโครงสร้างที่เกิน σ_0 ทำให้ $a < a_{cr}$ เสถียรภาพของโครงสร้างจะเกิดขึ้นถ้ารักษาโหลด ให้ $\sigma \leq \sigma_0$

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

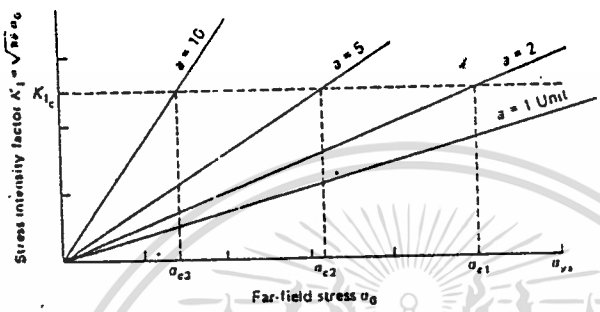


รูปที่ 9 การประยุกต์ใช้ของแรงที่กระจายเป็นอัตราส่วนกับ σ_{yy}ซึ่งปิดรอยแตกตลอดความยาว δ a) ระบบ coordinate Oxy และ $O_1x_1y_1$ และช่องเปิดของรอยแตก b) การปิดของรอยแตกตลอดความยาวที่เพิ่มขึ้น δ

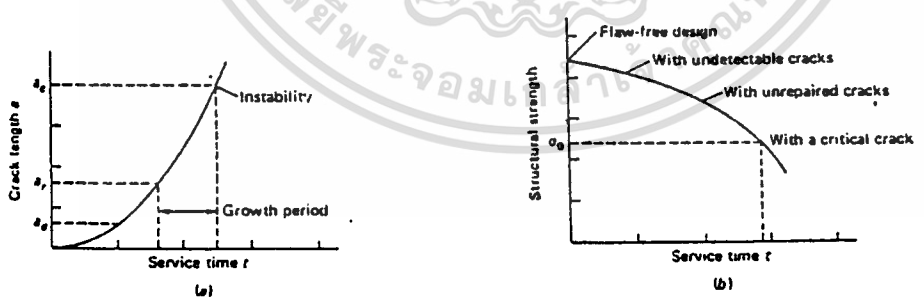


รูปที่ 10 กราฟแสดงความยาววิกฤตของรอยแตกต่อระดับความเค้นที่ใช้แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 ผลกระทบของความยาวรอยแตก a ต่อ far-field stress σ_0 ที่จำเป็นเพื่อเริ่มต้นรอยแตกในวัสดุที่มีค่าความแข็งที่เริ่มเกิดรอยแตก k_{Ic}



รูปที่ 12 a) การเติบโตของรอยแตกต่อเวลาเมื่อใช้งาน

b) การสูญเสียความแข็งแรงของโครงสร้างต่อเวลาและการเติบโตของรอยแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง UNIVERSAL TESTING AG– 10 TB

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติทางวัสดุศาสตร์ได้หลายประการ เช่น ความเค้น,ความเครียด ,brake point ฯลฯ โดยสามารถเลือกให้ load เป็นแรงดึงหรือแรงกดหรือแรงดึงสลับกับแรงกดก็ได้ ซึ่งเครื่อง AG–10TB นี้สามารถให้แรงได้ตั้งแต่ 1 kgf – 10,000 kgf

การควบคุมการทำงานทุกอย่างของเครื่อง การวัดค่าต่างๆรวมทั้งการประมวลผลข้อมูลทุกอย่างใช้คอมพิวเตอร์ 16 บิตเป็นตัวควบคุม ดังนั้นเครื่อง AG–10TB จึงให้ผลการทดสอบที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง โดยจะแสดงข้อมูลต่างๆรวมทั้งผลการทดสอบทางจอภาพ CRT และสามารถพล็อต load displacement diagram รวมทั้งข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลแล้วผ่านทาง printer ที่ติดตั้งอยู่ในตัวเครื่องได้

เนื่องจากการทำงานของเครื่อง AG–10TB ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม จึงจำเป็นต้องมีซอฟแวร์ที่ใช้ควบคุมระบบการทำงานมิฉะนั้นเครื่องก็ไม่อาจทำงานได้

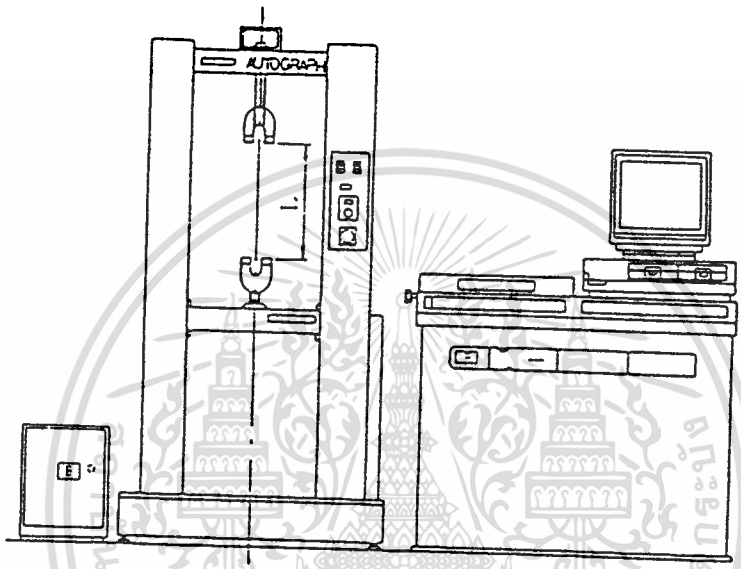
ในซอฟแวร์ควบคุมจะมีวิธีทดสอบอยู่ 4 วิธี คือ

1. SINGLE MODE (tension test , compression test , bending test)
2. CYCLE MODE (tension test , compression test , bending test)
3. INTERVAL MODE (creep test , relaxation test)
4. PEEL MODE (peel test , tear test)

แต่ในการทดสอบนี้ จะใช้เฉพาะวิธี SINGLE MODE TENSILE TEST เท่านั้น และผลที่เราจะได้จากเครื่องมีดังนี้

1. LOAD DISPLACEMENT DIAGRAM
2. ENERGY VALUE
3. ELASTIC MODULUS
4. YIELD POINT
5. YIELD STRENGTH
6. MAXIMUM LOAD POINT
7. BREAK POINT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Drive Power Supply

1. Yoke
2. Crosshead
3. Table
4. Column
5. Drive screw
6. Load cell
7. Universal joint
8. –

Loading Unit

9. Upper chuck
10. Lower chuck
11. Lower joint
12. Loading direction selector nut
13. Crosshead guide
14. Limit switch
15. Drive power supply panel
16. Crosshead control unit

Measuring & Control Unit

17. Control panel
18. CRT display
19. Recorder
20. Load amplifier
21. Control unit power switch
22. Keyboard
23. Personal computer body
24. Manual feed knob

Fig. 2 Exterior View of Shimadzu Autograph AG-500B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง WIRE CUT EDM

เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นมีขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย(หน่วยเป็น m.m.) จึงต้องใช้เครื่องมือตัดที่มีความละเอียดสูงสุด ซึ่งเครื่อง WIRE CUT นี้สามารถตัดชิ้นงานโดยให้ความละเอียดเป็น micron ชิ้นงานที่ได้จะมีความเรียบร้อย รอยตัดจะเรียบ คม มีความสวยงามกว่าชิ้นงานที่ได้จากการใช้เครื่องมือชนิดอื่น แต่จะมีข้อเสียตรงที่ต้องใช้เวลาในการทำงานมาก (ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเส้นลวดประมาณ 4 - 5 m.m./min แล้วแต่ความหนาและชนิดของชิ้นงาน)

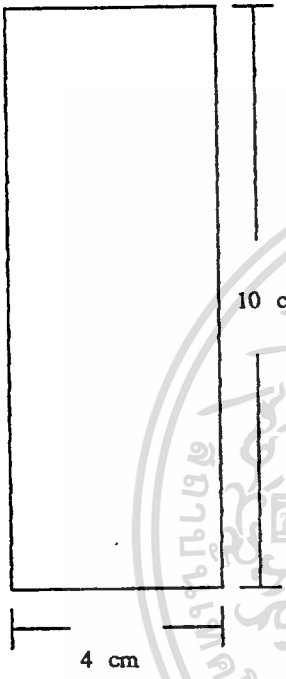
หลักการทำงานของเครื่อง wire cut

การตัดของเครื่อง wire cut เกิดขึ้นโดย กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านลวดโลหะ และเมื่อลวดโลหะเคลื่อนที่เข้าใกล้ชิ้นงานจะทำให้เกิดการอาร์คขึ้น เกิดความร้อน ทำให้ชิ้นงานหลอมละลายรอยตัดที่ได้จึงเรียบและสะอาด อนึ่งขณะเครื่อง wire cut กำลังทำงานจะมีการฉีดน้ำเพื่อหล่อเย็นชะล้างเศษโลหะ และจุดประสงค์หลักคือให้การอาร์คเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

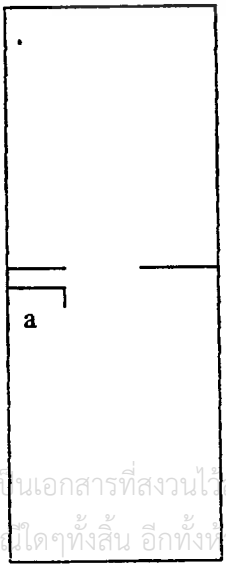
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

เป็นเหล็กแผ่นสีดำ ขนาด 4*10 cm^2 โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะถูกบากเป็นลักษณะรูปร่างต่างๆ แล้วนำไปทดสอบและวิเคราะห์เพื่อหาความแข็งแรง และศึกษาว่ารูปร่างของรอยบากและขนาดของวัสดุมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุอย่างไร

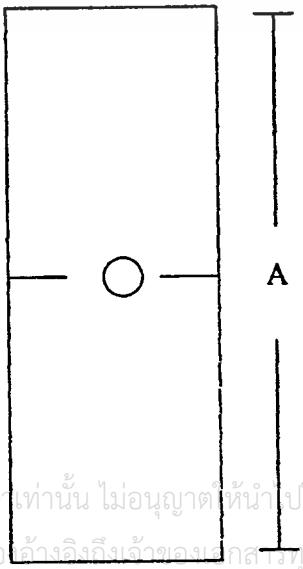


ลักษณะชิ้นงาน

แบบที่หนึ่ง

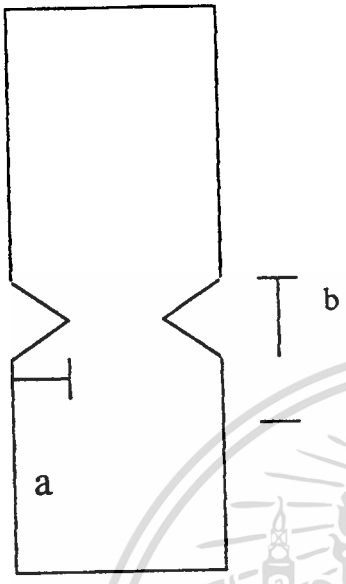


แบบที่สอง

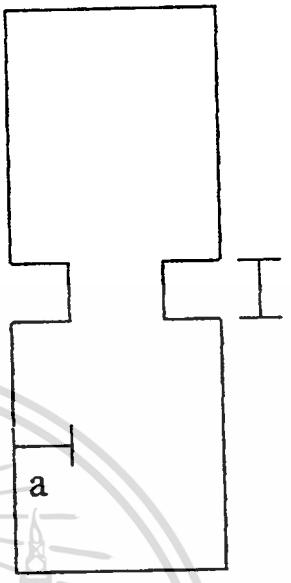


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

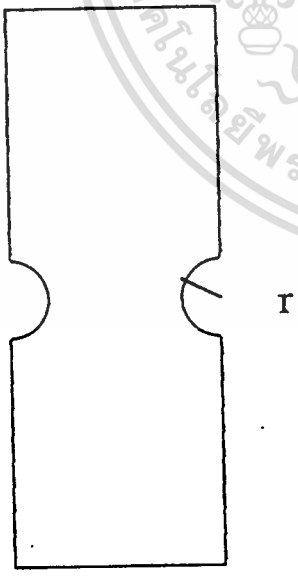
แบบที่สาม



แบบที่สี่



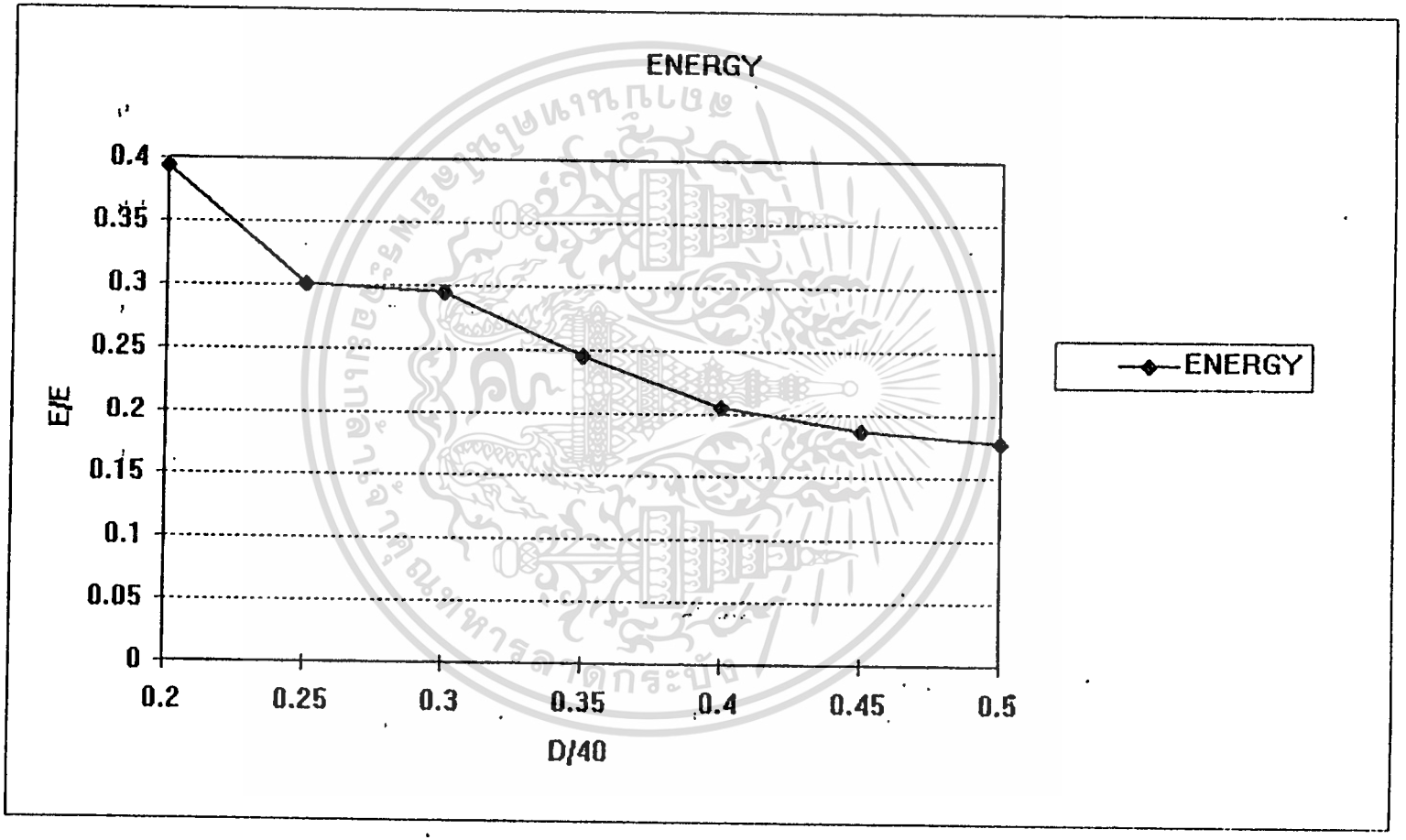
แบบที่ห้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
ENERGY	0.394	0.301	0.295	0.246	0.205	0.186	0.177



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปครึ่งวงกลมจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

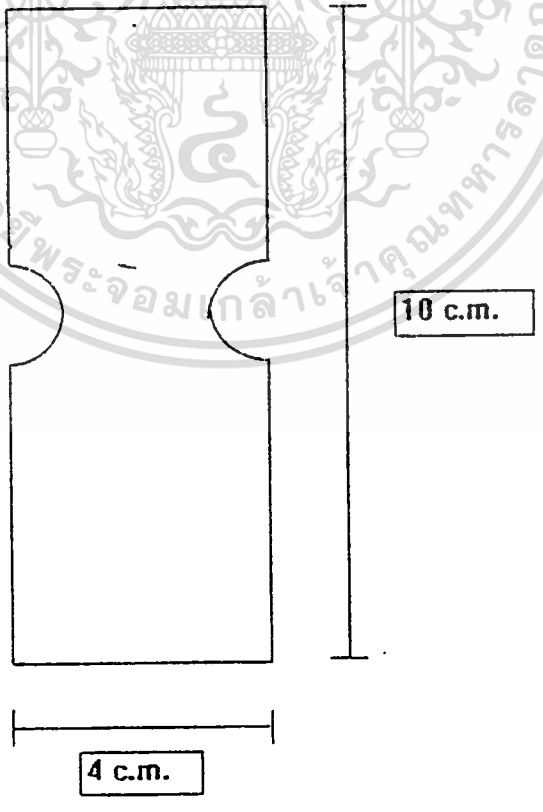
E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยบากเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาดก็จะลดลง

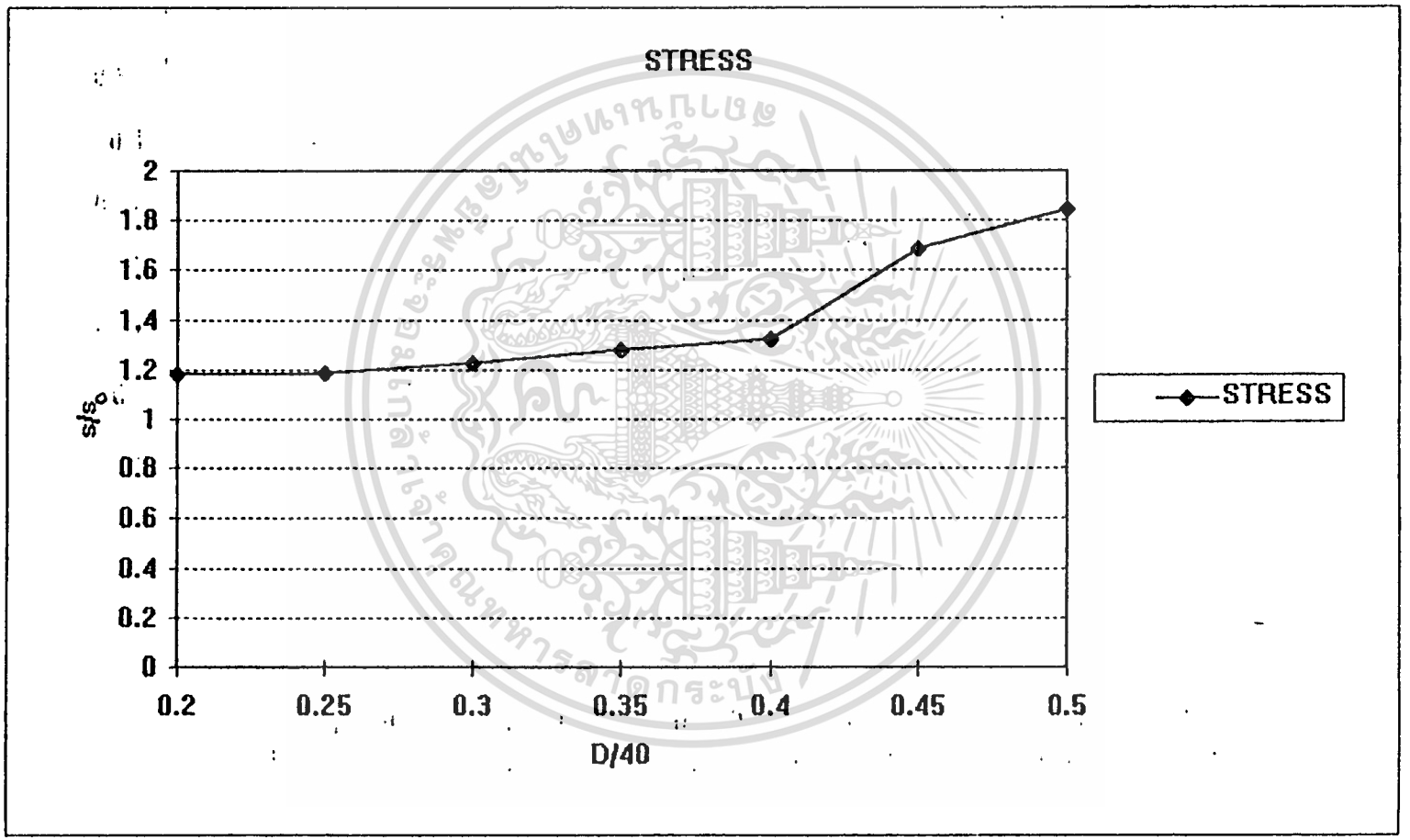
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อกลม

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
STRESS	1.184	1.186	1.226	1.278	1.324	1.686	1.845



S = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปครึ่งวงกลม
(แปรผันไปเรื่อยๆ)

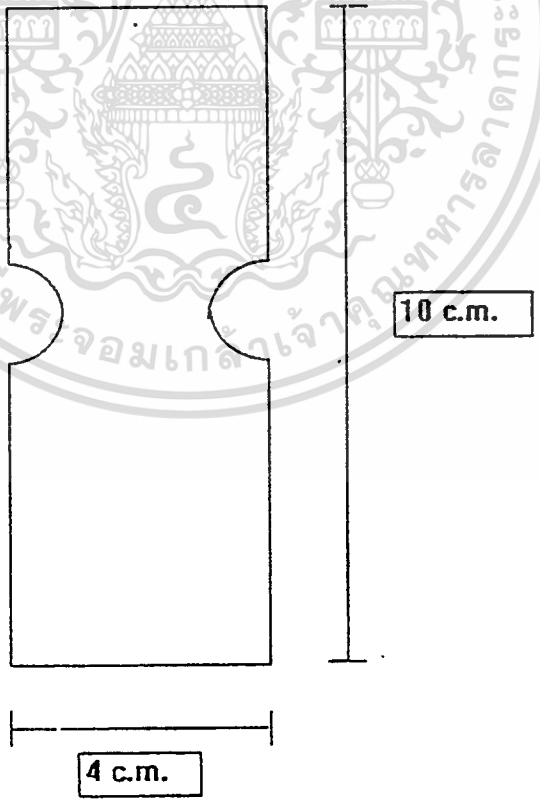
S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก(มีค่าคงที่)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางรอยบากมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความเค้นสูงขึ้น

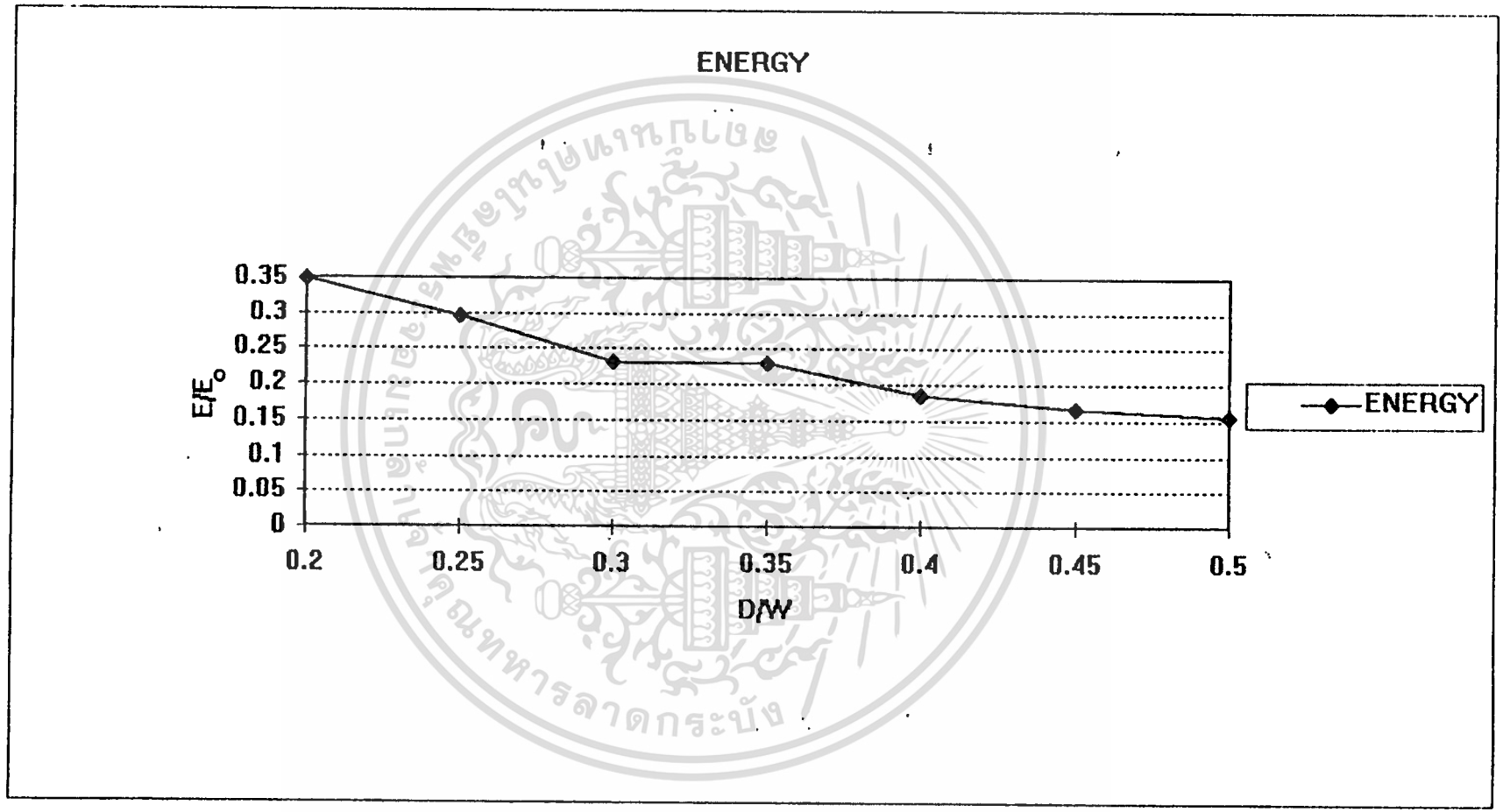
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยม

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
ENERGY	0.349	0.295	0.231	0.23	0.184	0.166	0.155



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

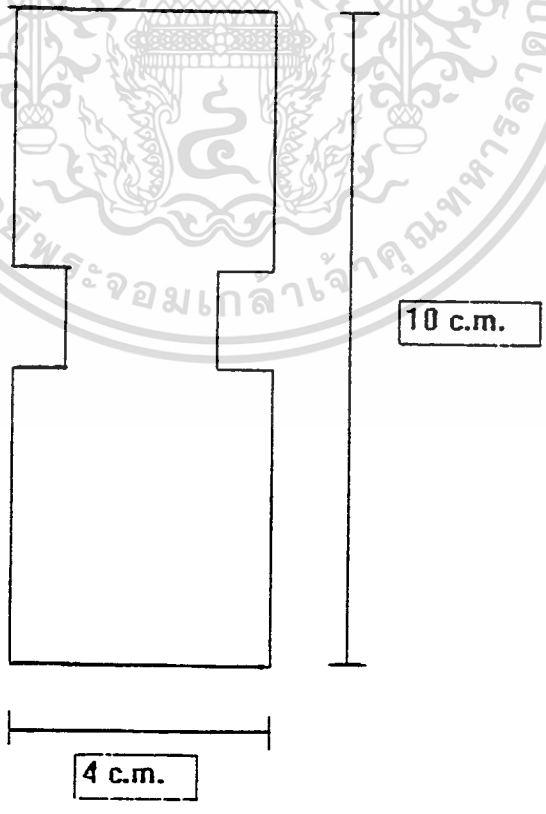
E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความยาวของรอยบากเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาดก็จะลดลง

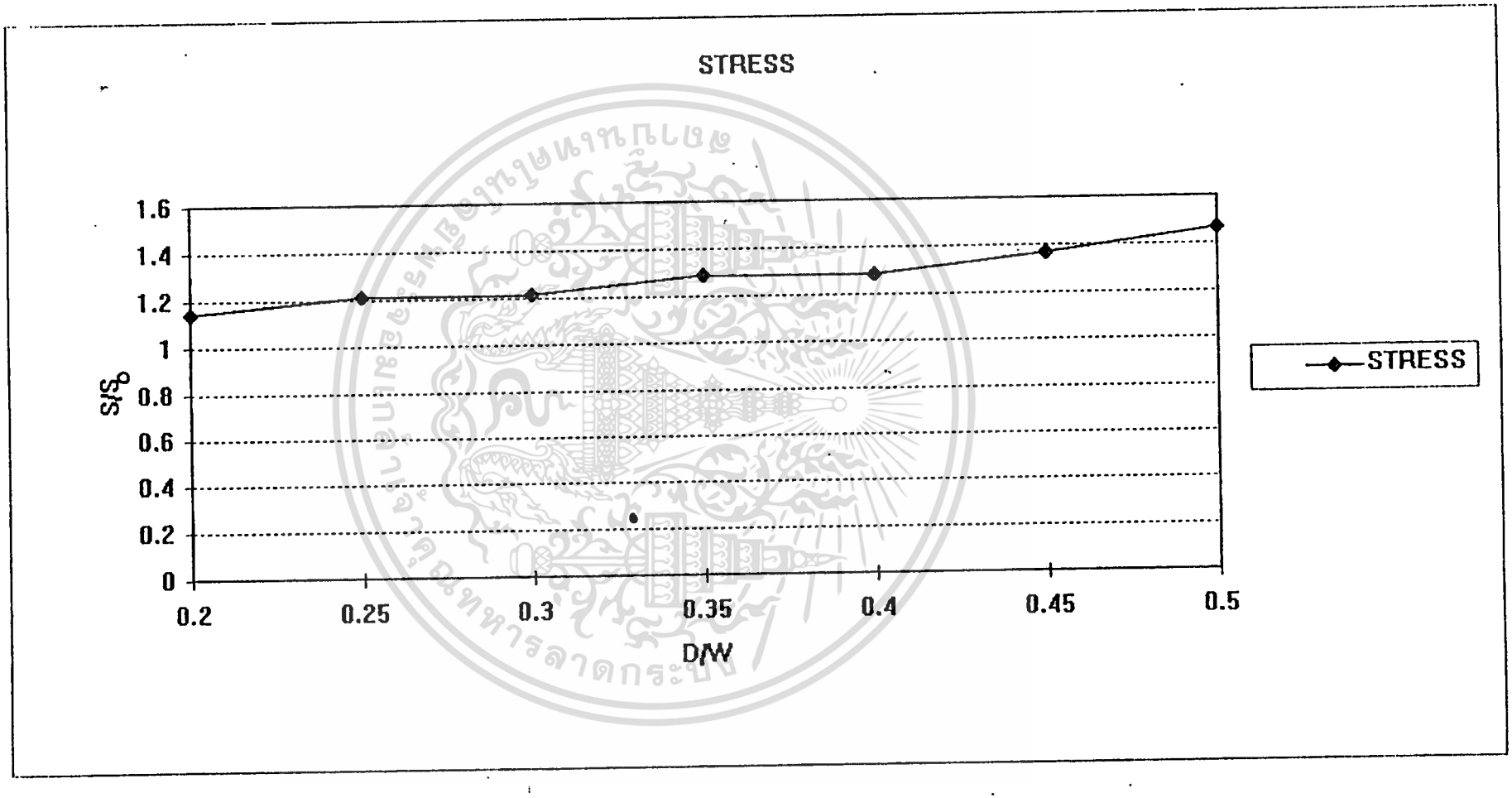
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยม

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
STRESS	1.141	1.212	1.215	1.285	1.283	1.366	1.468



S = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยม
(แปรผันไปเรื่อยๆ)

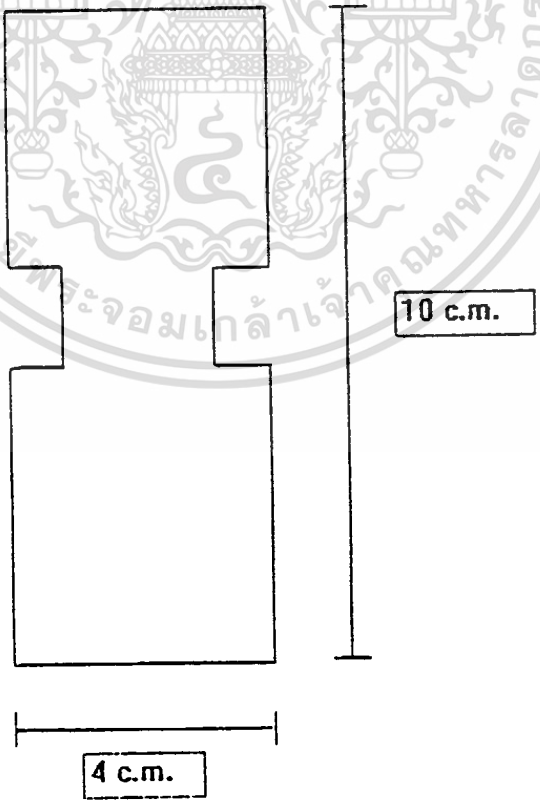
S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อรอยบากมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความเค้นสูงขึ้น

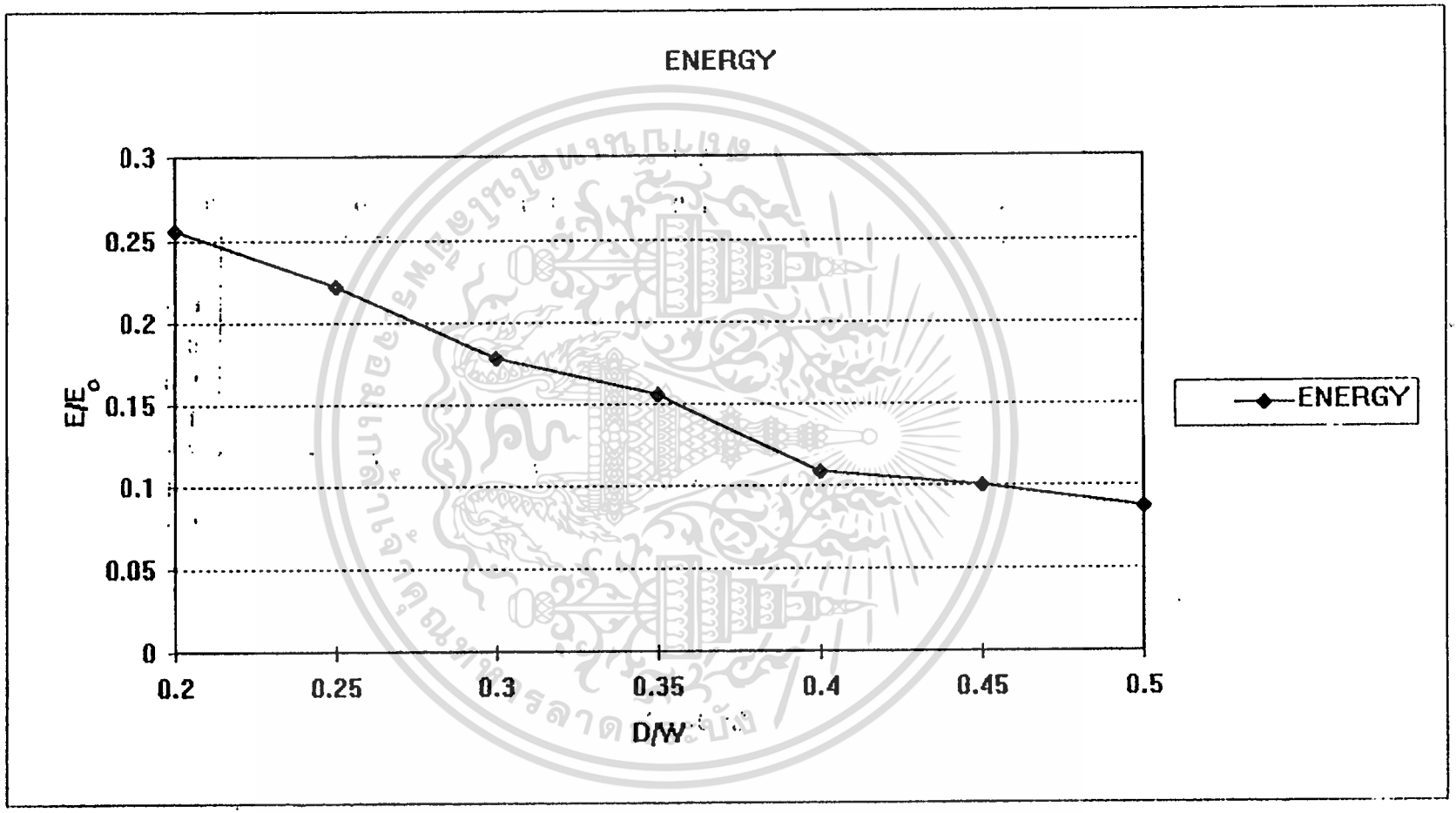
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยม

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
ENERGY	0.256	0.222	0.178	0.156	0.109	0.1	0.087



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปสามเหลี่ยมจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

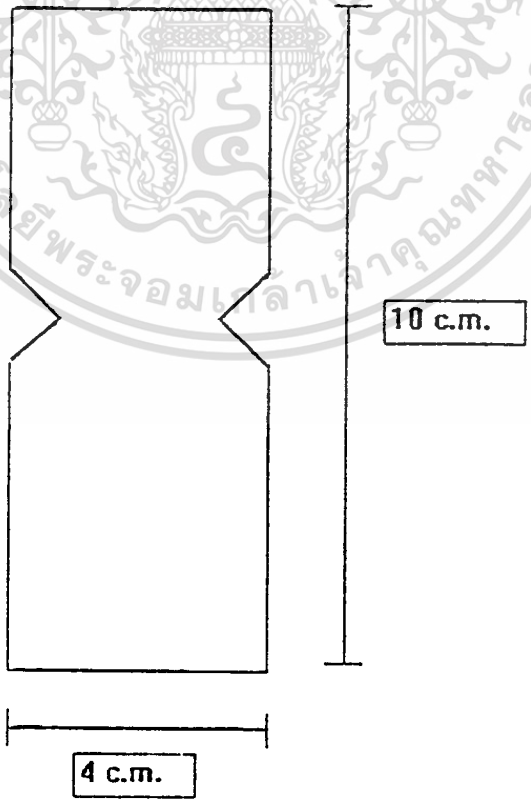
E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความยาวของรอยบากเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาดก็จะลดลง

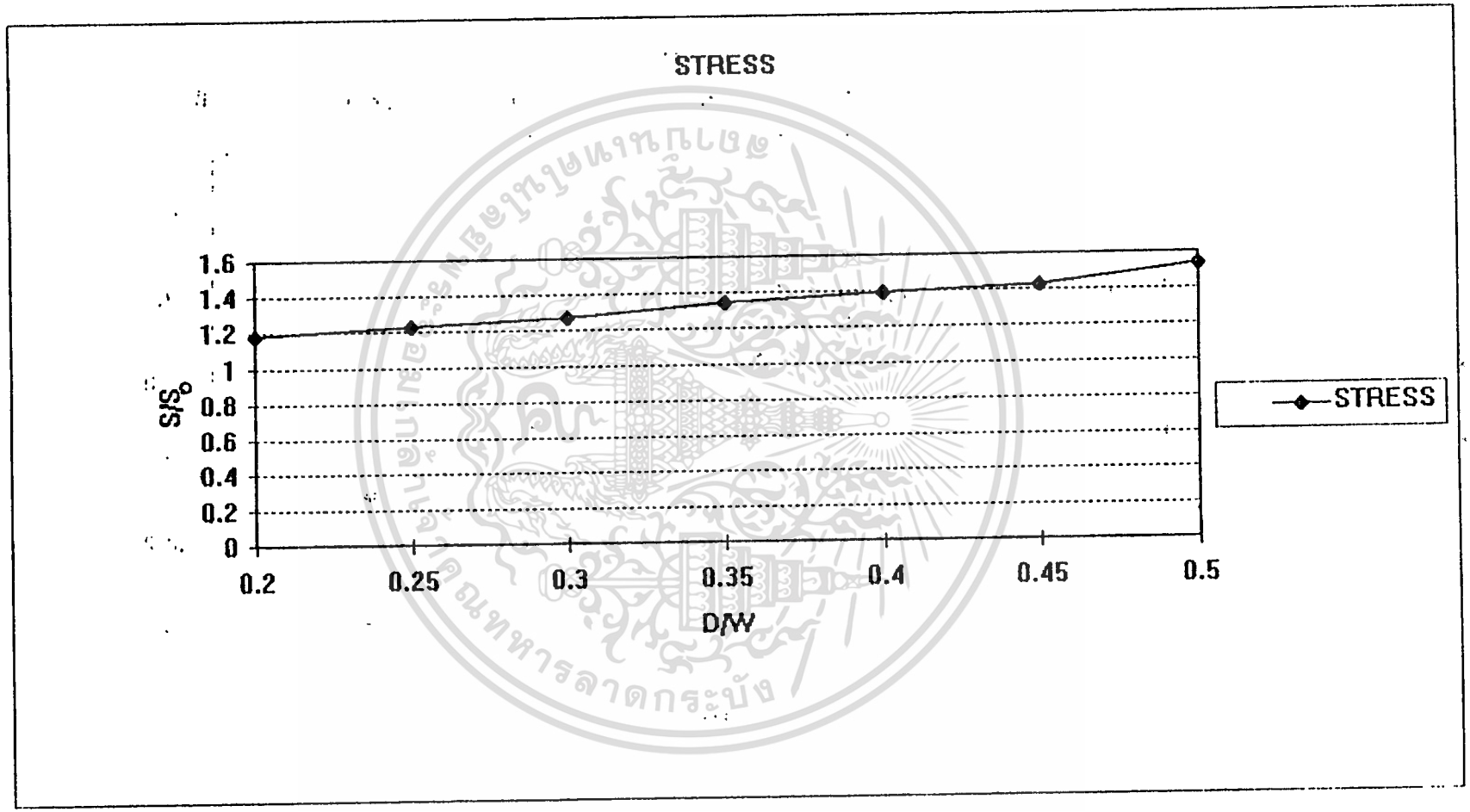
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยม

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
STRESS	1.179	1.226	1.267	1.342	1.388	1.425	1.54



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

S = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปสามเหลี่ยม
(แปรผันไปเรื่อยๆ)

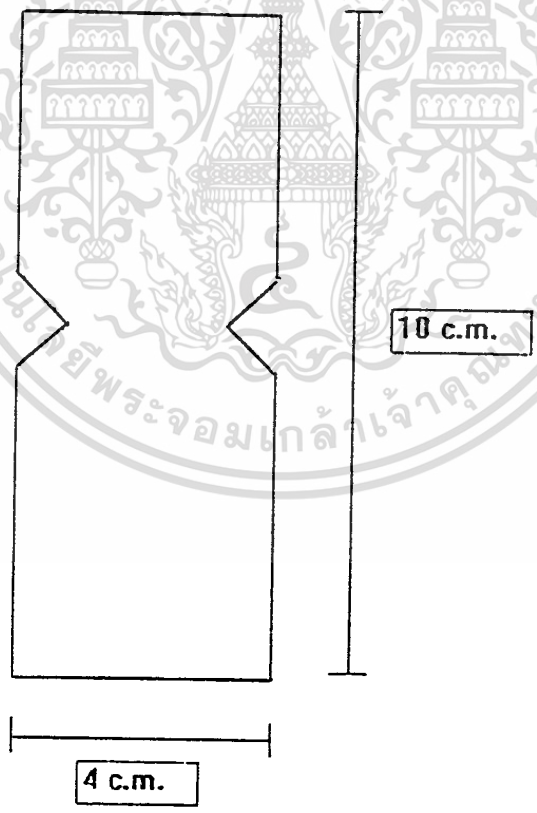
S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อรอยบากมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความเค้นสูงขึ้น

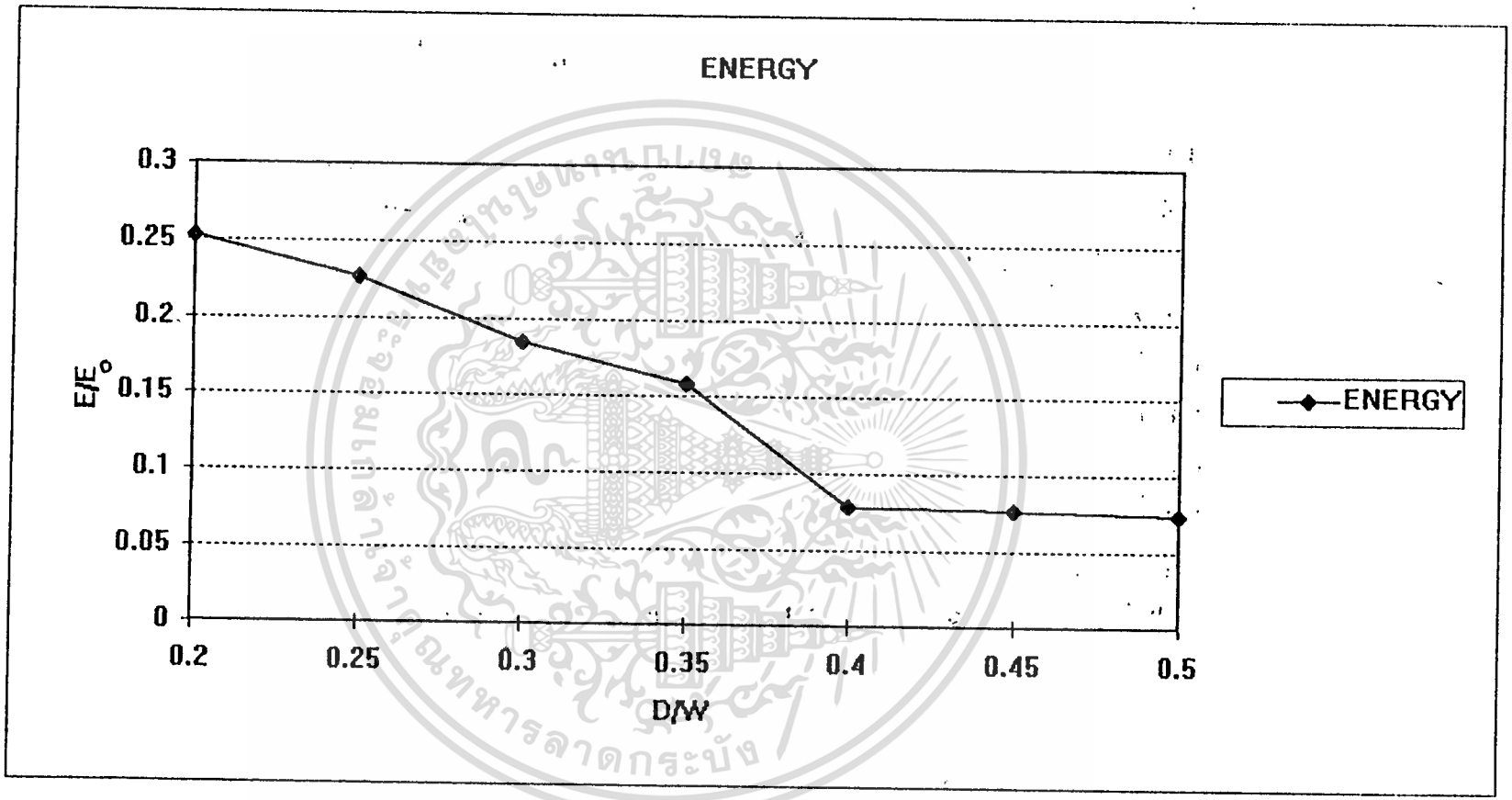
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นตรง

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
ENERGY	0.253	0.227	0.184	0.158	0.078	0.076	0.074



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

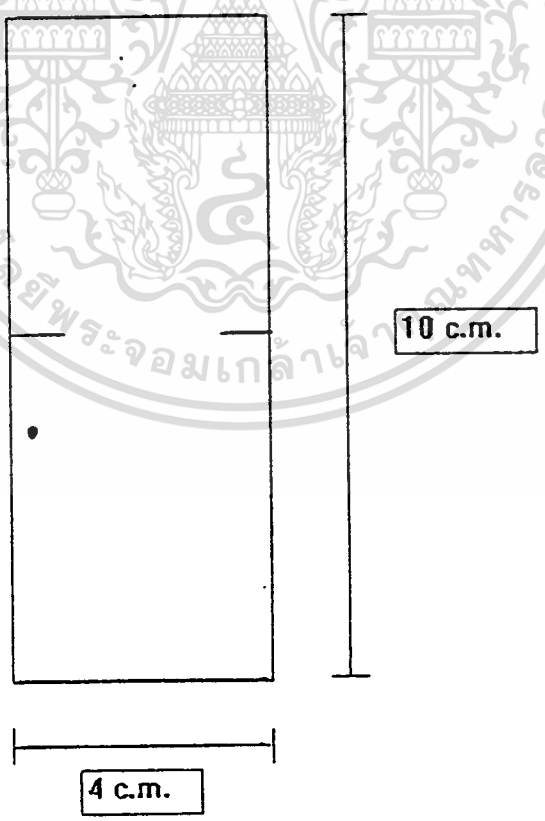
E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความยาวของรอยบากเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาดก็จะลดลง

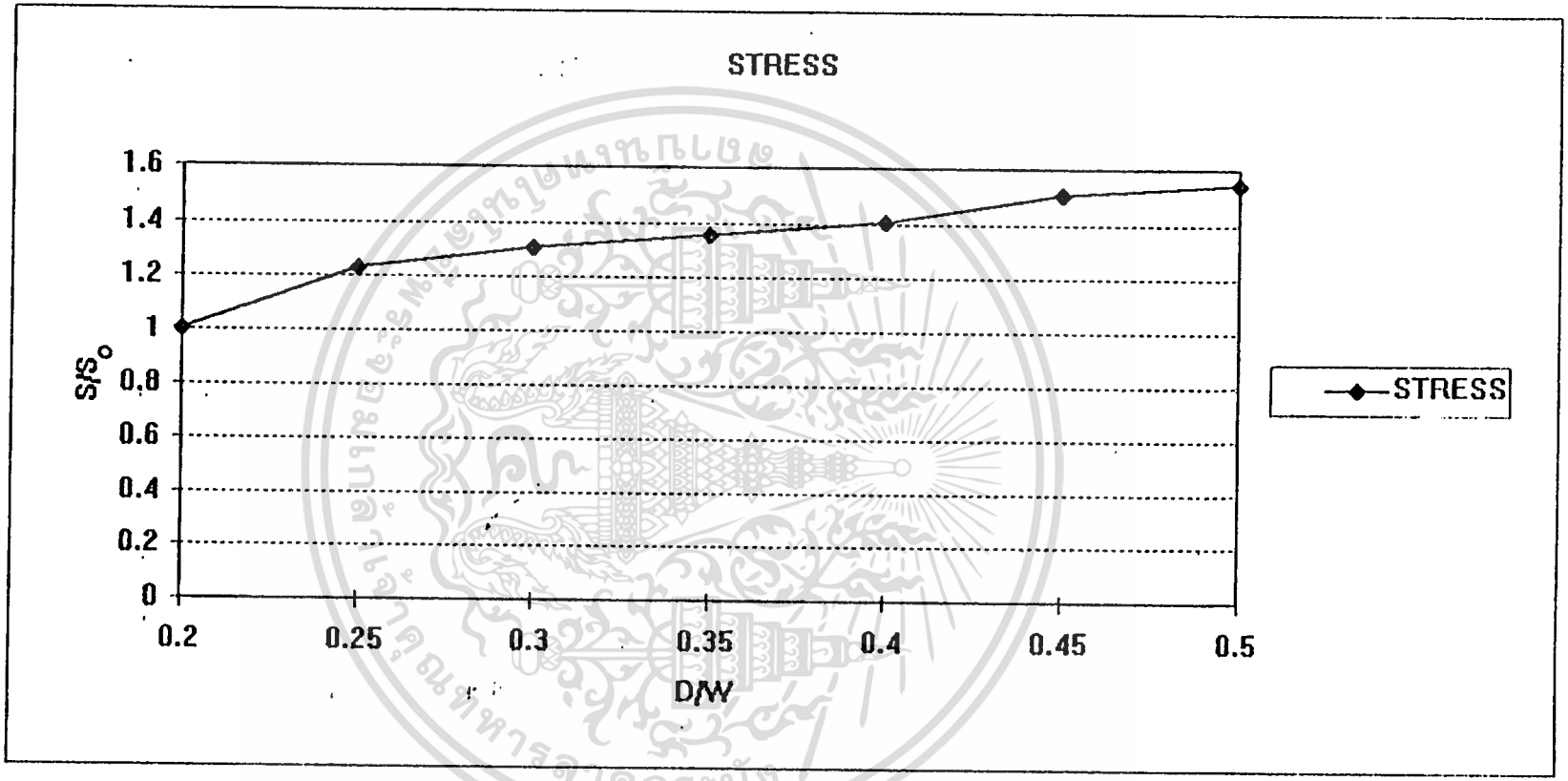
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นตรง

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
STRESS	1.004	1.231	1.308	1.358	1.406	1.51	1.545



S = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรง(แปรผันไปเรื่อยๆ)

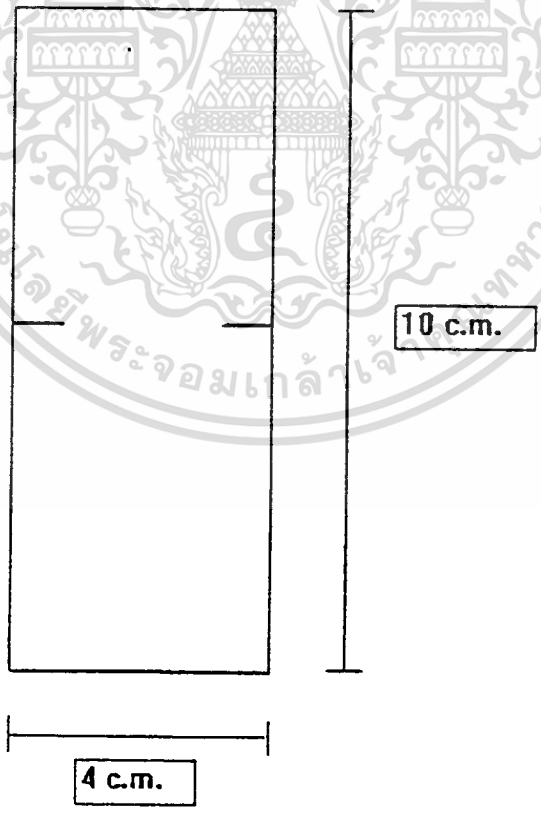
S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

W = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อรอยบากมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความเค้นสูงขึ้น

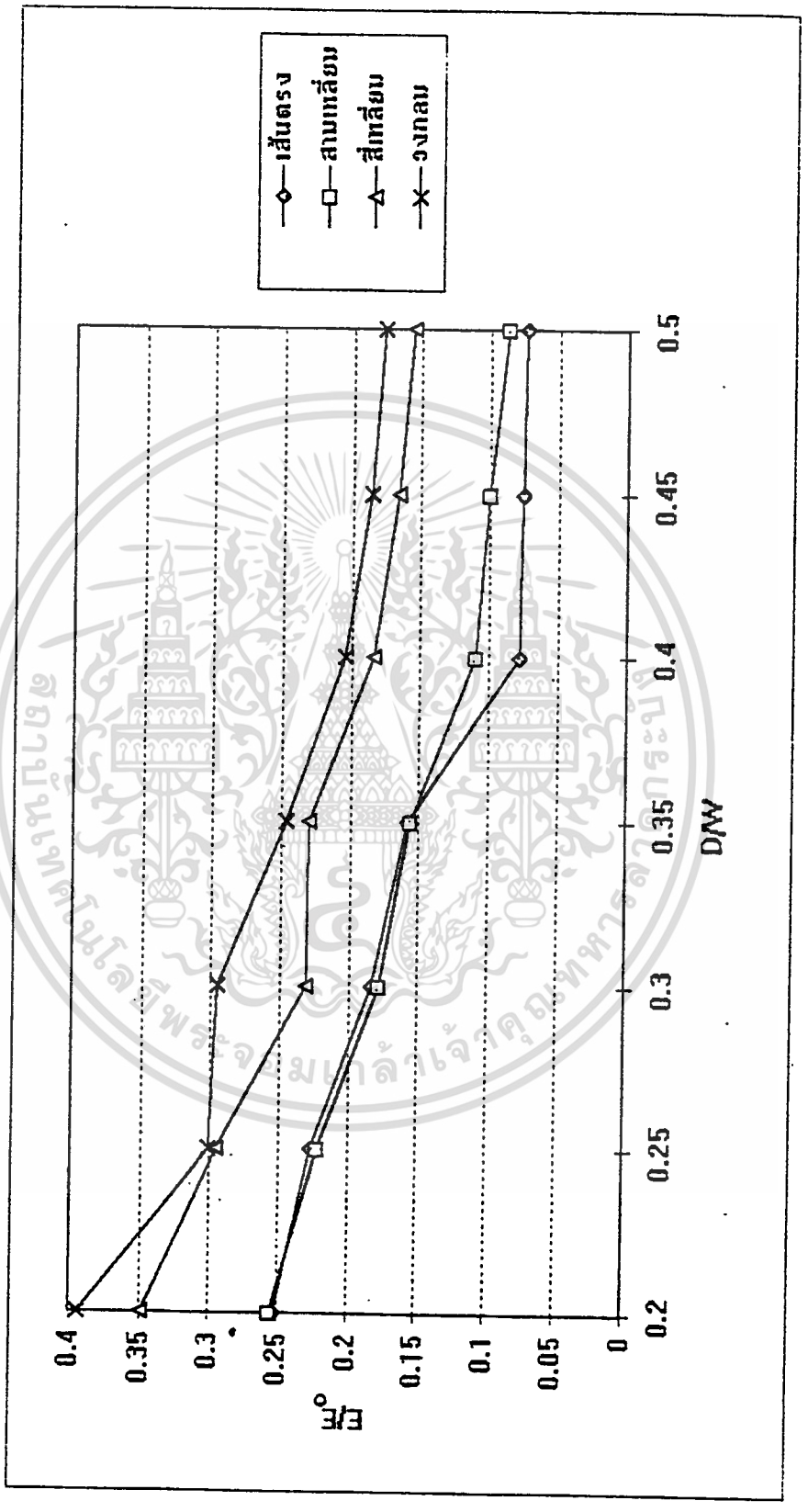
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
เส้นตรง	0.253	0.227	0.184	0.158	0.078	0.076	0.074
สามเหลี่ยม	0.256	0.222	0.178	0.156	0.109	0.1	0.087
สี่เหลี่ยม	0.349	0.295	0.231	0.23	0.184	0.166	0.155
วงกลม	0.394	0.301	0.295	0.246	0.205	0.186	0.177



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปร่างต่างจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ความยาวของรอยบาก

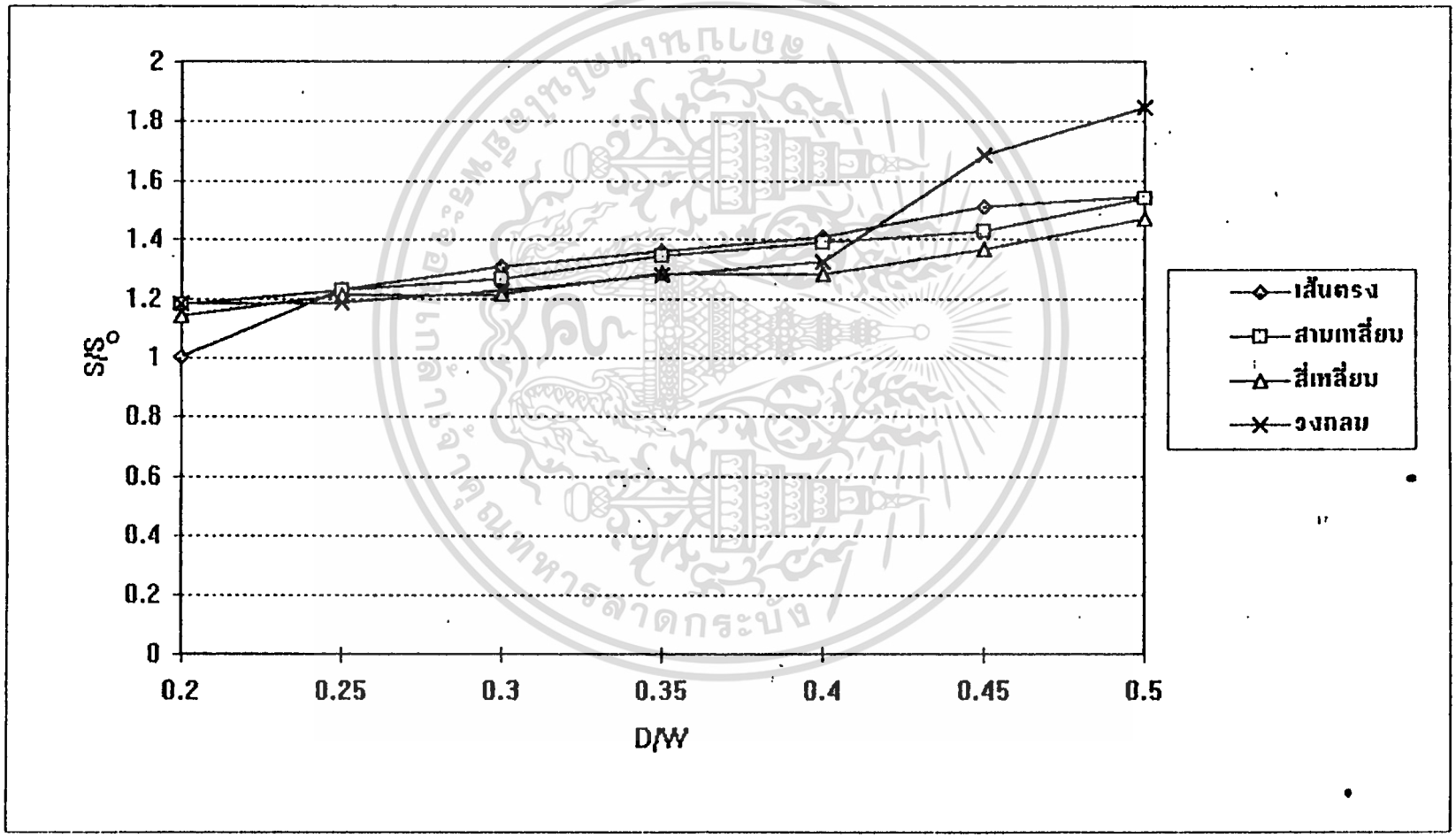
W = 40 ม.ม.

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากลักษณะต่างๆกัน ทำให้ทราบว่ารอยบากรูปครึ่งวงกลมต้องใช้พลังงานในการดึงจนขาดมากที่สุด ถัดมาจึงเป็นรอยบากรูปสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยมและเส้นตรงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRESS

	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
เส้นตรง	1.004	1.231	1.308	1.358	1.406	1.51	1.545
สามเหลี่ยม	1.179	1.226	1.267	1.342	1.388	1.425	1.54
สี่เหลี่ยม	1.141	1.212	1.215	1.285	1.283	1.366	1.468
วงกลม	1.184	1.186	1.226	1.278	1.324	1.686	1.845



S = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปร่างต่างๆ (แปรผันไปเรื่อยๆ)

S_0 = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก(มีค่าคงที่)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

W = 40 ม.ม.

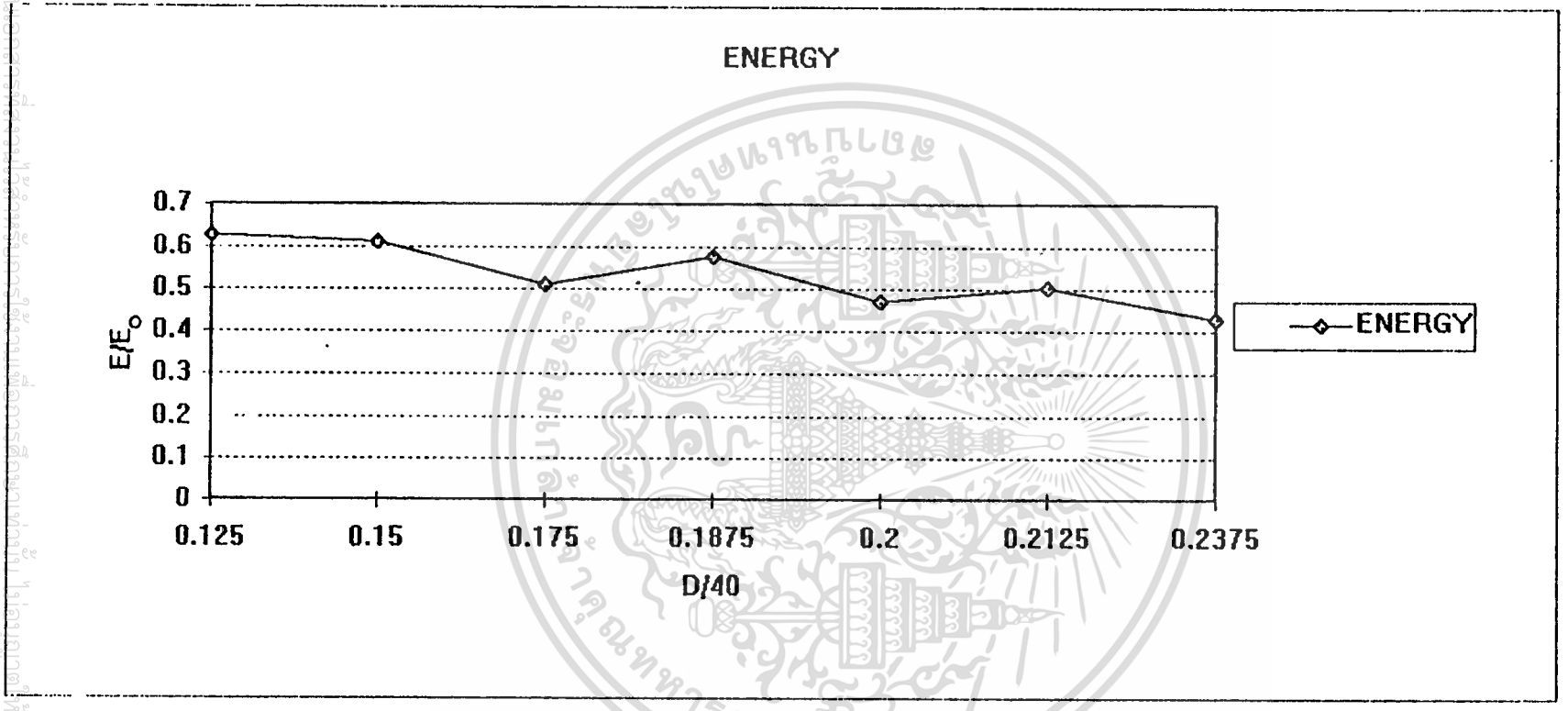
จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้น จะเห็นว่าชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงจะมีค่าความเค้นสูงสุด ถัดมาจึงเป็นชิ้นงานที่มีรอยบากรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม ตามลำดับแต่จะสังเกตได้ว่า รอยบากรูปเส้นตรงจะมีค่าความเค้นใกล้เคียงกับรอยบากรูปสามเหลี่ยม และรอยบากรูปครึ่งวงกลมจะมีค่าความเค้นใกล้เคียงกับรอยบากรูปสี่เหลี่ยม

ในกราฟจะเห็นสิ่งผิดปกติคือช่วงที่รอยบากมีความยาว 9 และ 10 ม.ม. รอยบากรูปครึ่งวงกลมจะมีค่าความเค้นสูงสุดซึ่งน่าจะมีผลมาจากความผิดพลาดในขั้นตอนการทดลองมากกว่าเหตุผลอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมเดี่ยว

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
ENERGY	0.628	0.612	0.511	0.577	0.471	0.504	0.429



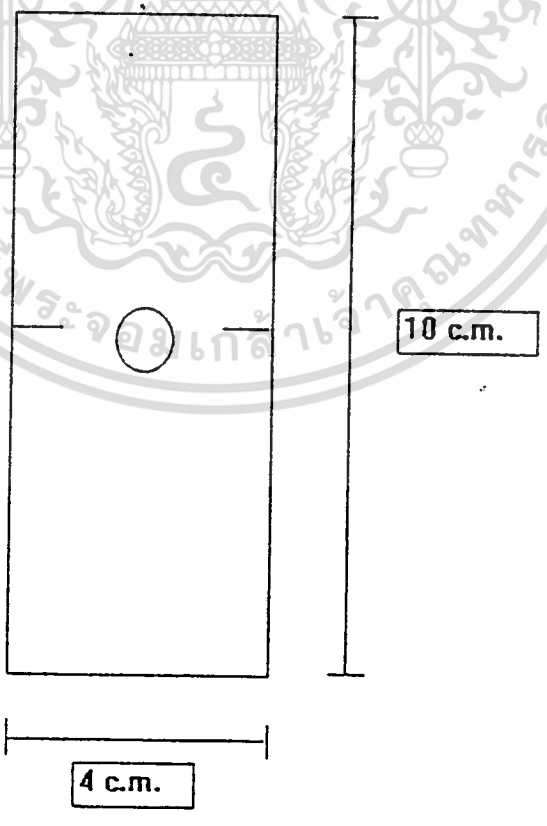
E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาด(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาดจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเพิ่มมากขึ้น

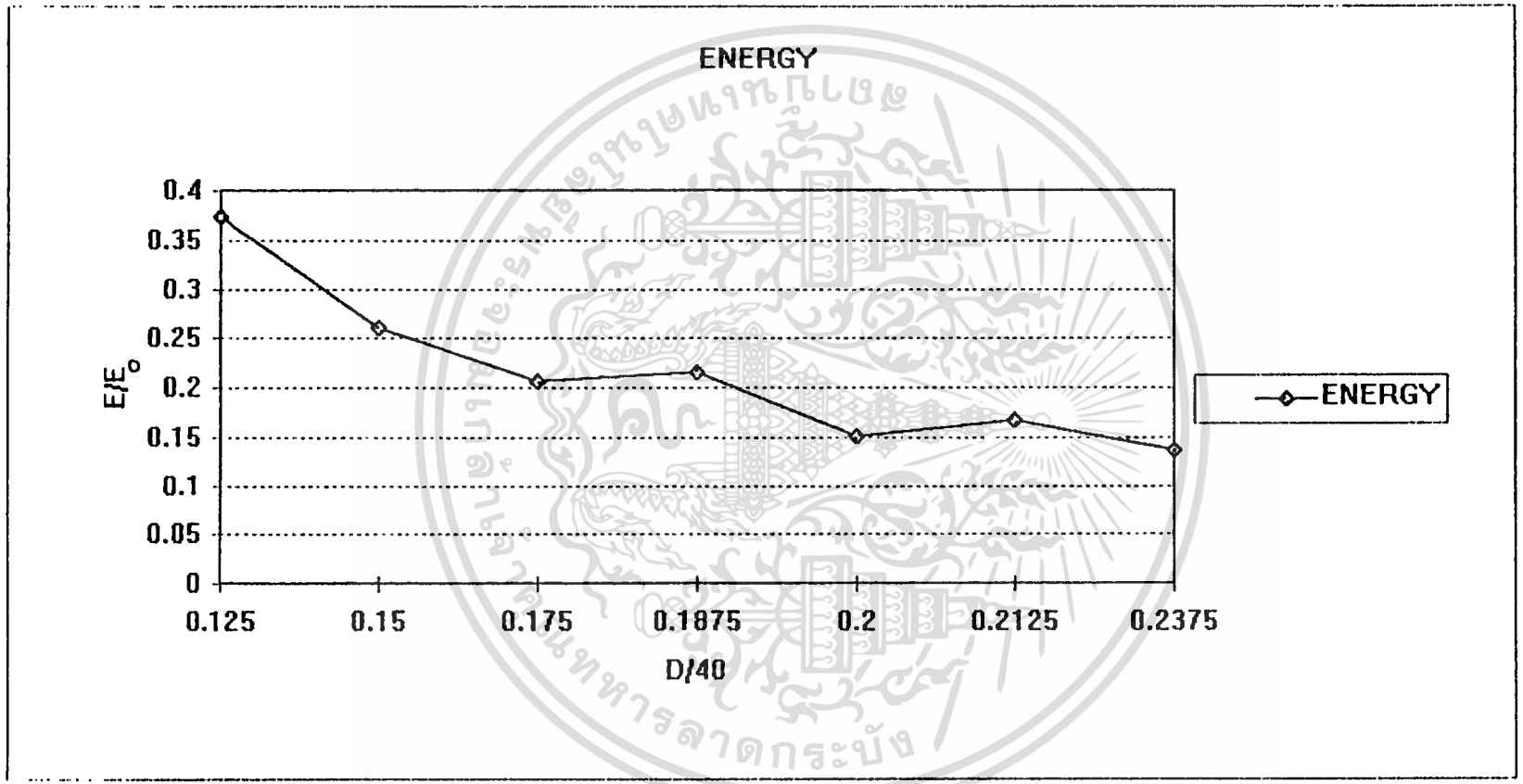
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมคู่

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
ENERGY	0.374	0.26	0.206	0.215	0.151	0.167	0.137



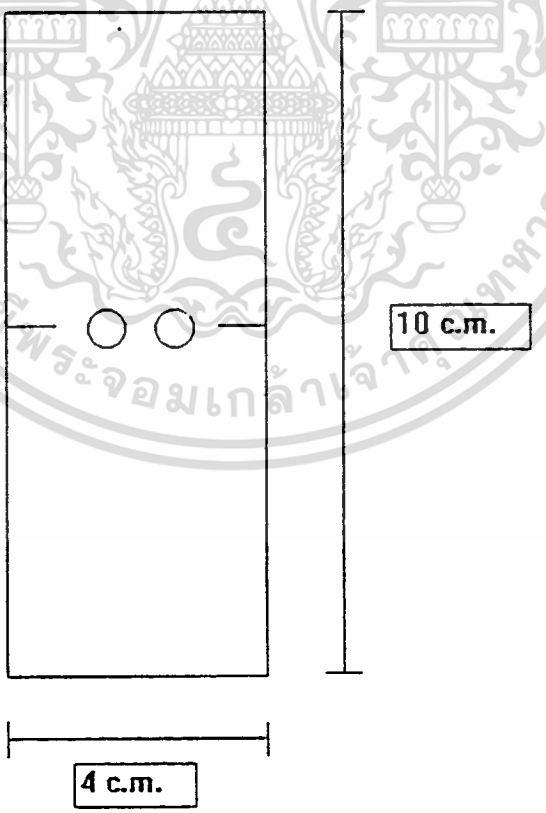
E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาด(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงจนขาด(มีค่าคงที่)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาดจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเพิ่มมากขึ้น

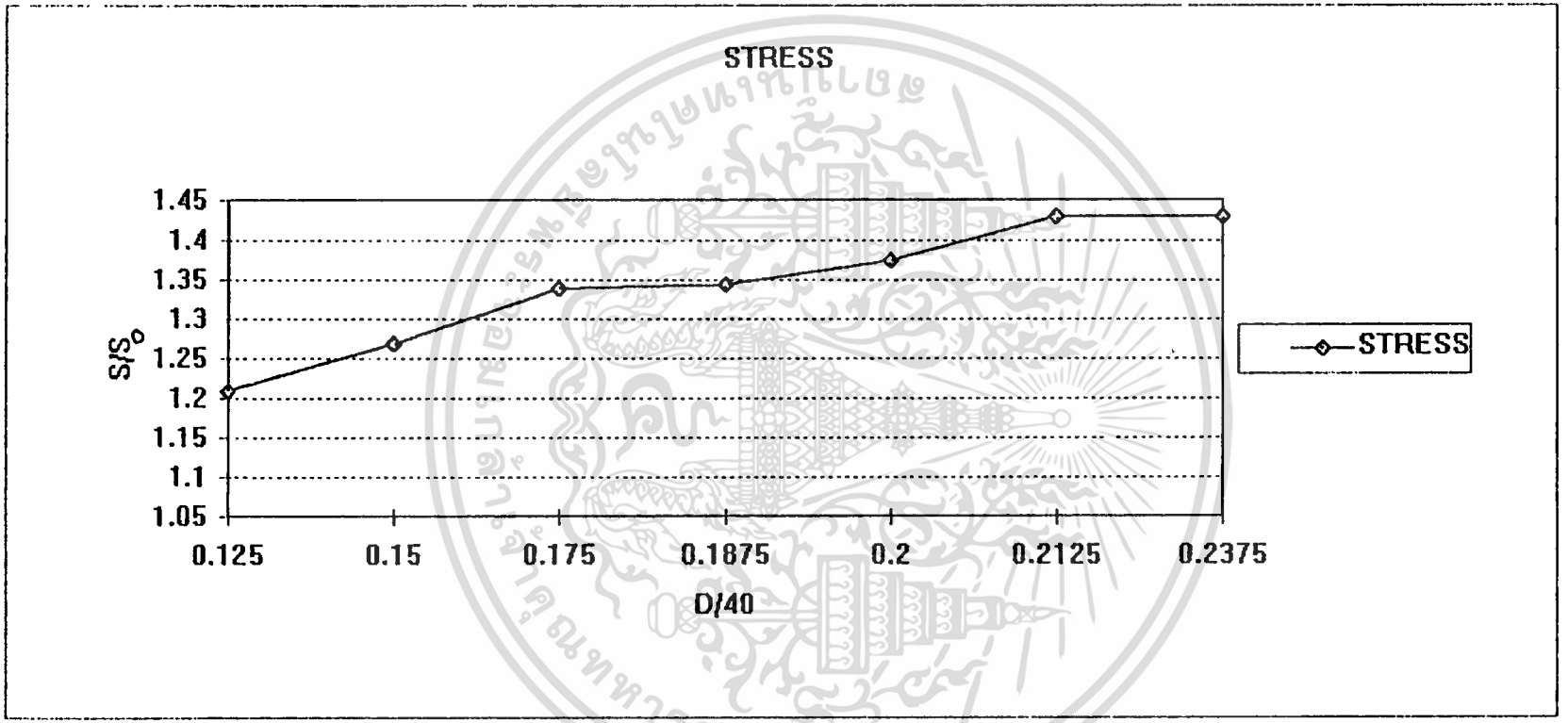
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมเดี่ยว

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
STRESS	1.209	1.268	1.339	1.343	1.374	1.429	1.429



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ห้ามนำไปใช้ในทางที่ผิดกฎหมาย

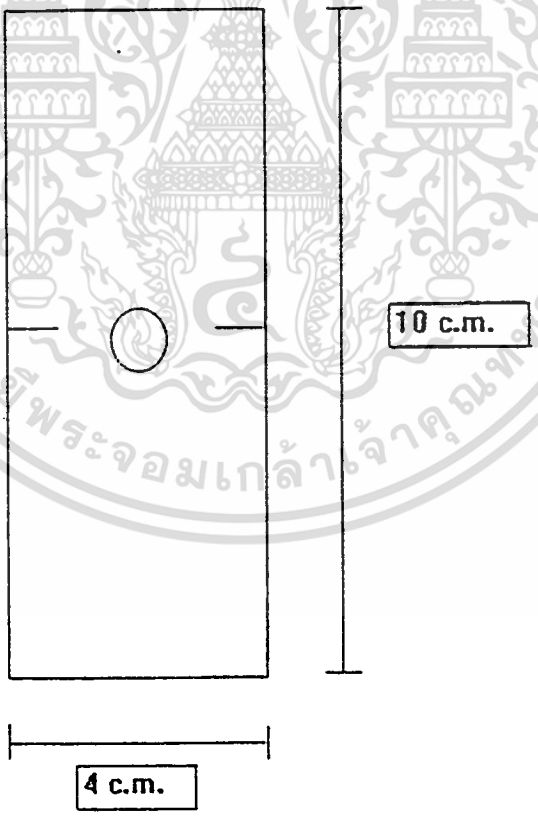
S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อยๆ)

S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรง(มีค่าคงที่)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นของชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

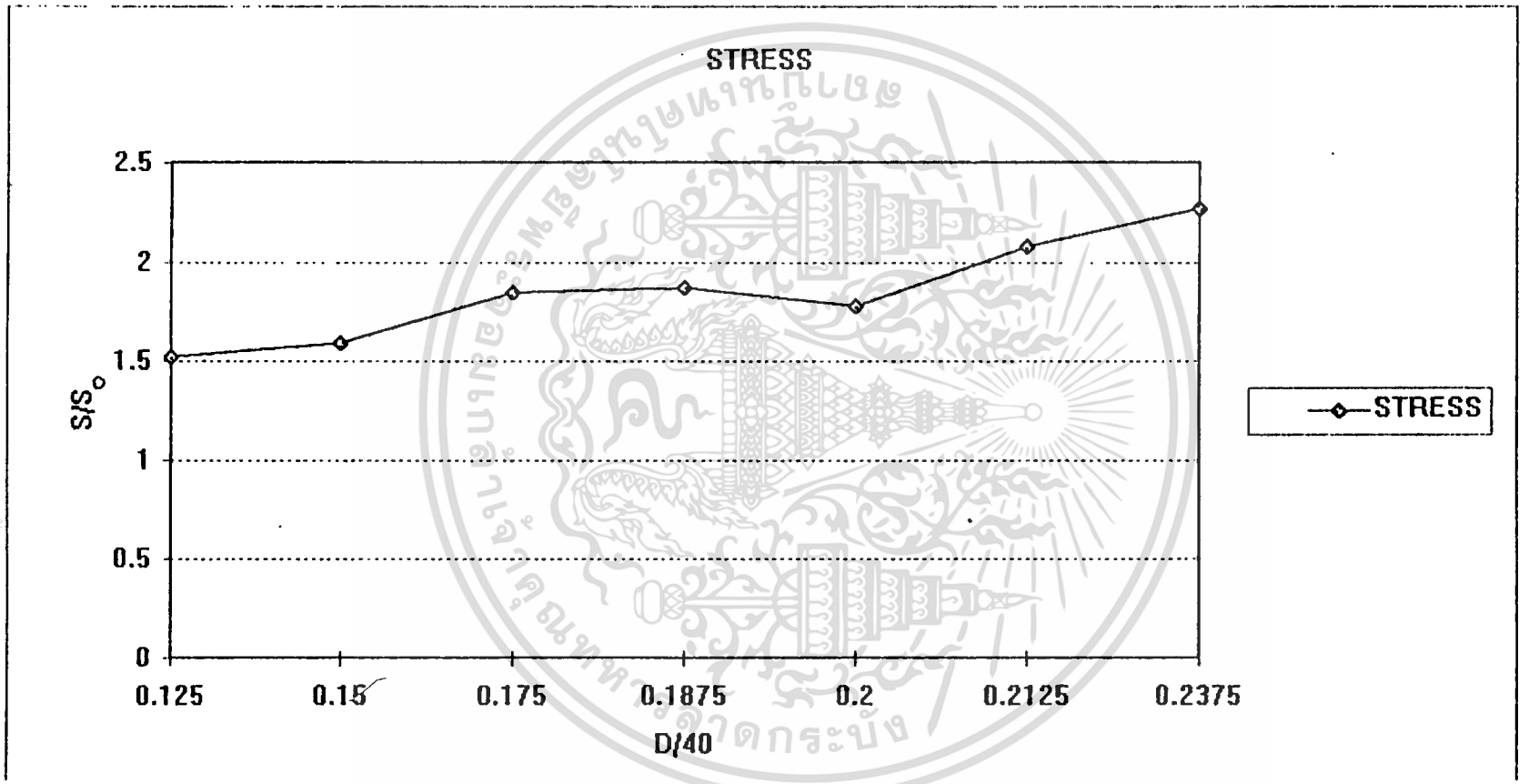
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมคู่

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
STRESS	1.522	1.592	1.844	1.868	1.778	2.078	2.268



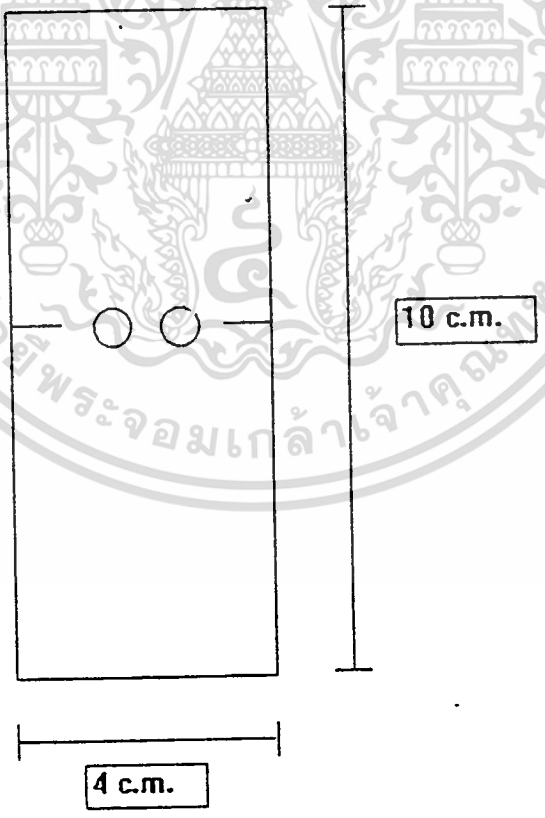
S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อยๆ)

S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรง(มีค่าคงที่)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นของชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

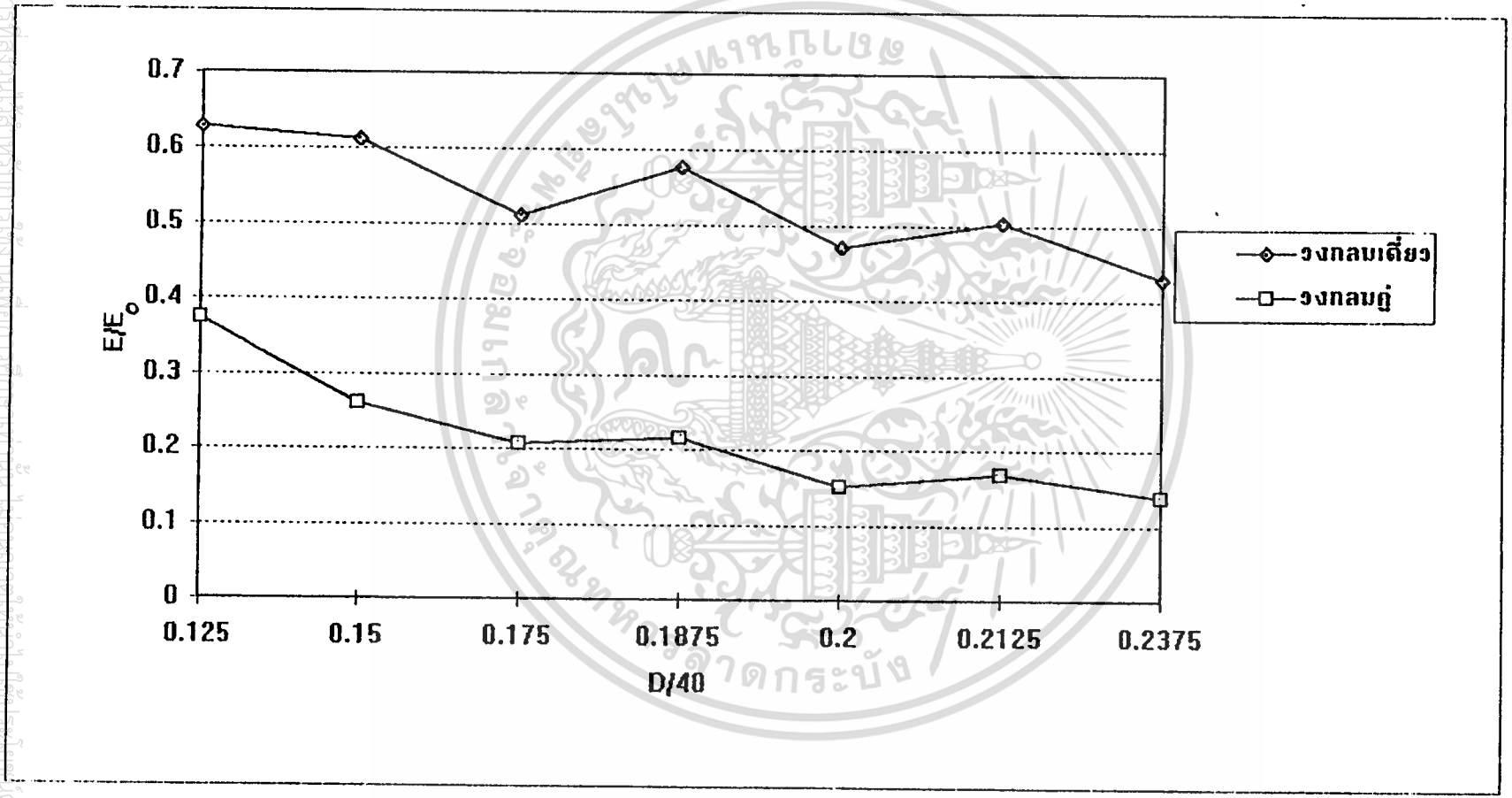
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
วงกลมเดี่ยว	0.628	0.612	0.511	0.577	0.471	0.504	0.429
วงกลมคู่	0.374	0.26	0.206	0.215	0.151	0.167	0.137



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาด(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงจนขาด(มีค่าคงที่)

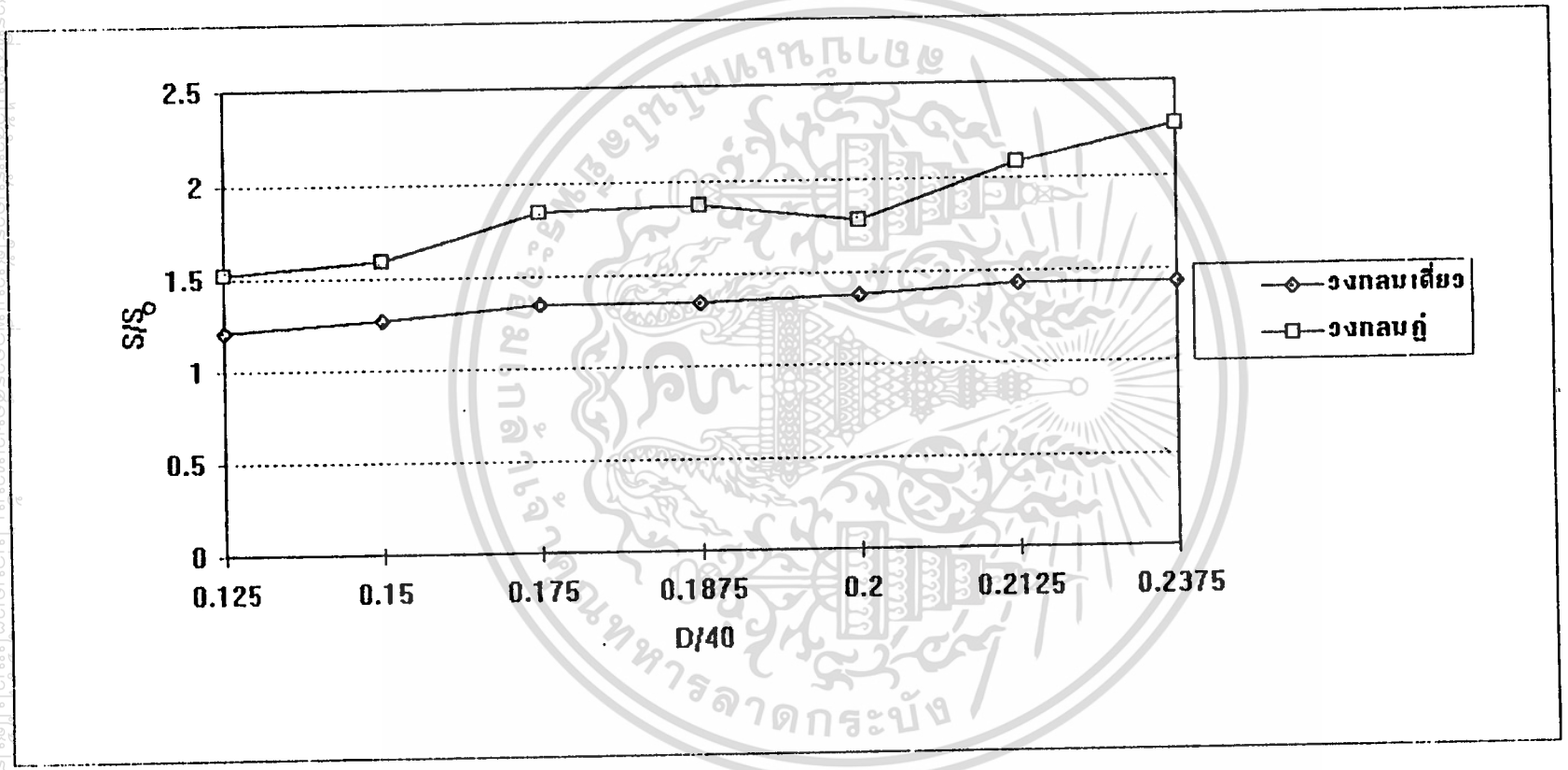
D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ชิ้นงานที่มีรูวงกลมวงเดียวจะใช้พลังงานในการดึงให้ขาดมากกว่าชิ้นงานที่มีรูวงกลมสองรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRESS

	0.125	0.15	0.175	0.1875	0.2	0.2125	0.2375
วงกลมเดี่ยว	1.209	1.268	1.339	1.343	1.374	1.429	1.429
วงกลมคู่	1.522	1.592	1.844	1.868	1.778	2.078	2.268



S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อยๆ)

S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรง(มีค่าคงที่)

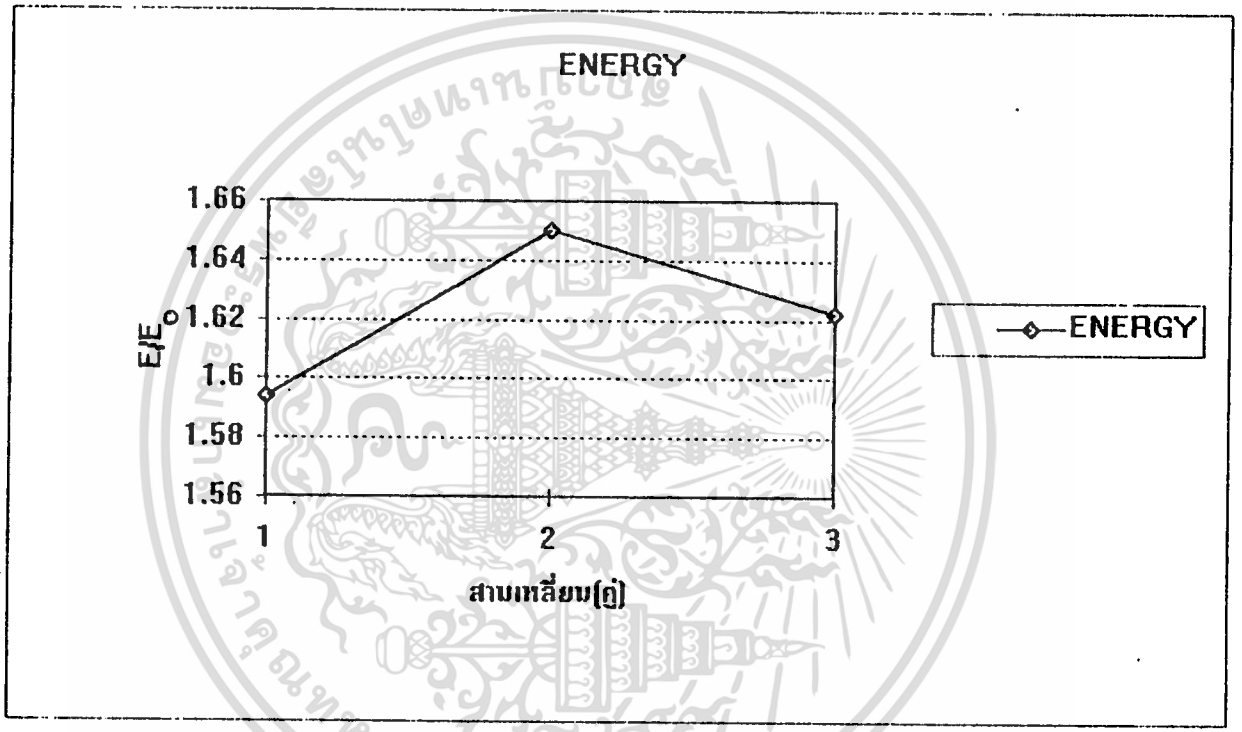
D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้น จะเห็นว่าชิ้นงานที่มีรูวงกลมคู่จะมีค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่มีรูวงกลมเดี่ยว (จะเห็นว่ากราฟของวงกลมเดี่ยวมีความสม่ำเสมอกว่ากราฟของวงกลมคู่ มีสาเหตุมาจากขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน ชิ้นงานวงกลมคู่จะเกิดการบิดเบี้ยว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนจำนวนสายเหลี่ยม

	1	2	3
ENERGY	1.594	1.65	1.622



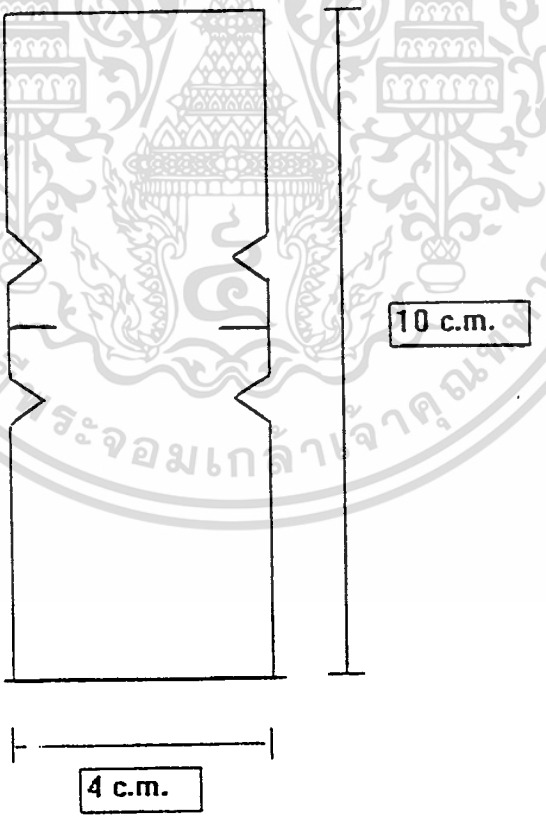
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรง ที่มีความยาว 5 ม.ม. และมี GAUGE LENGTH ยาว 40 ม.ม.จนขาด

จากกราฟแสดงให้เห็นแนวโน้มว่าเมื่อชิ้นงานมีรอยบากรูปสามเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้นพลังงานที่ใช้ดึงจนชิ้นงานขาดก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

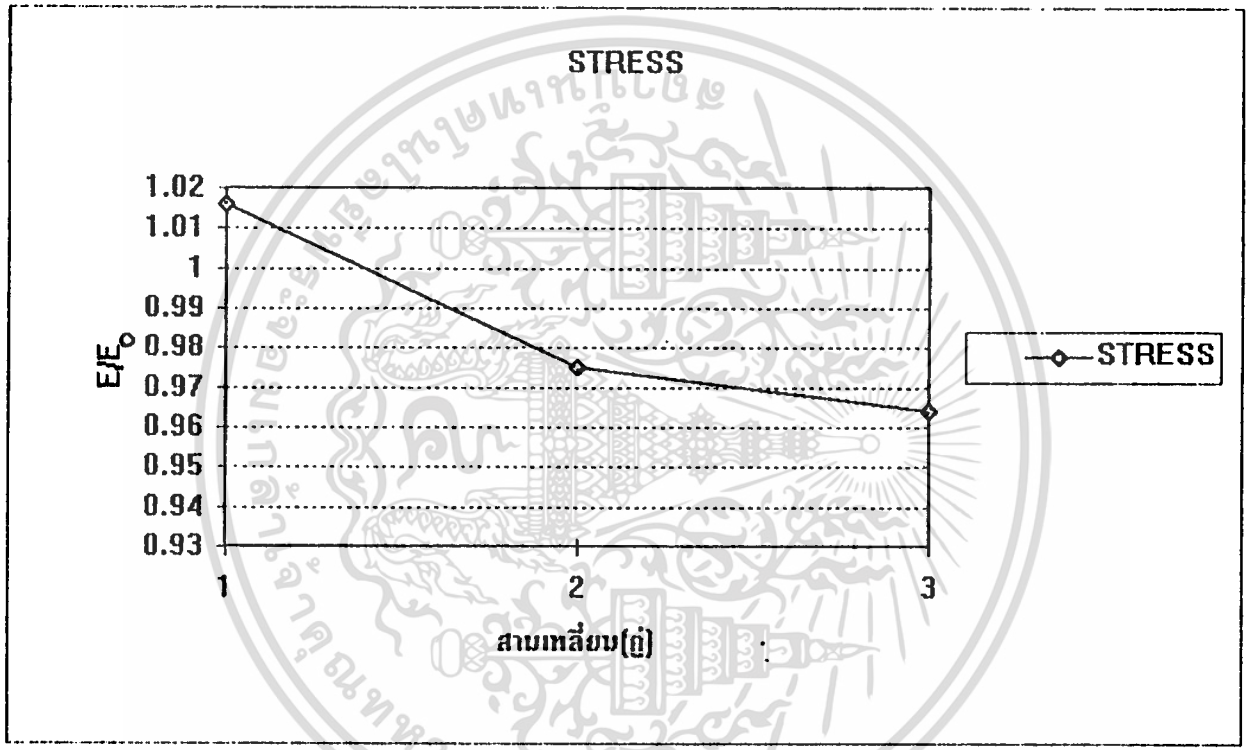
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนจำนวนสามเหลี่ยม

	1	2	3
STRESS	1.016	0.975	0.964

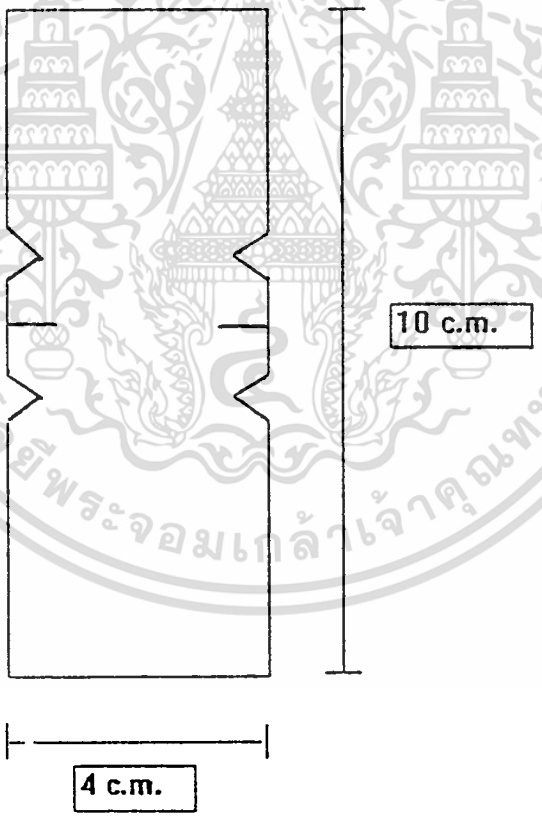


S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน

S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงยาว 5 ม.ม. และ GAUGE LENGTH 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปสามเหลี่ยมจำนวนมากจะมีค่าความเค้นน้อยกว่าชิ้นงานที่มีรอยบากรูปสามเหลี่ยมจำนวนน้อย

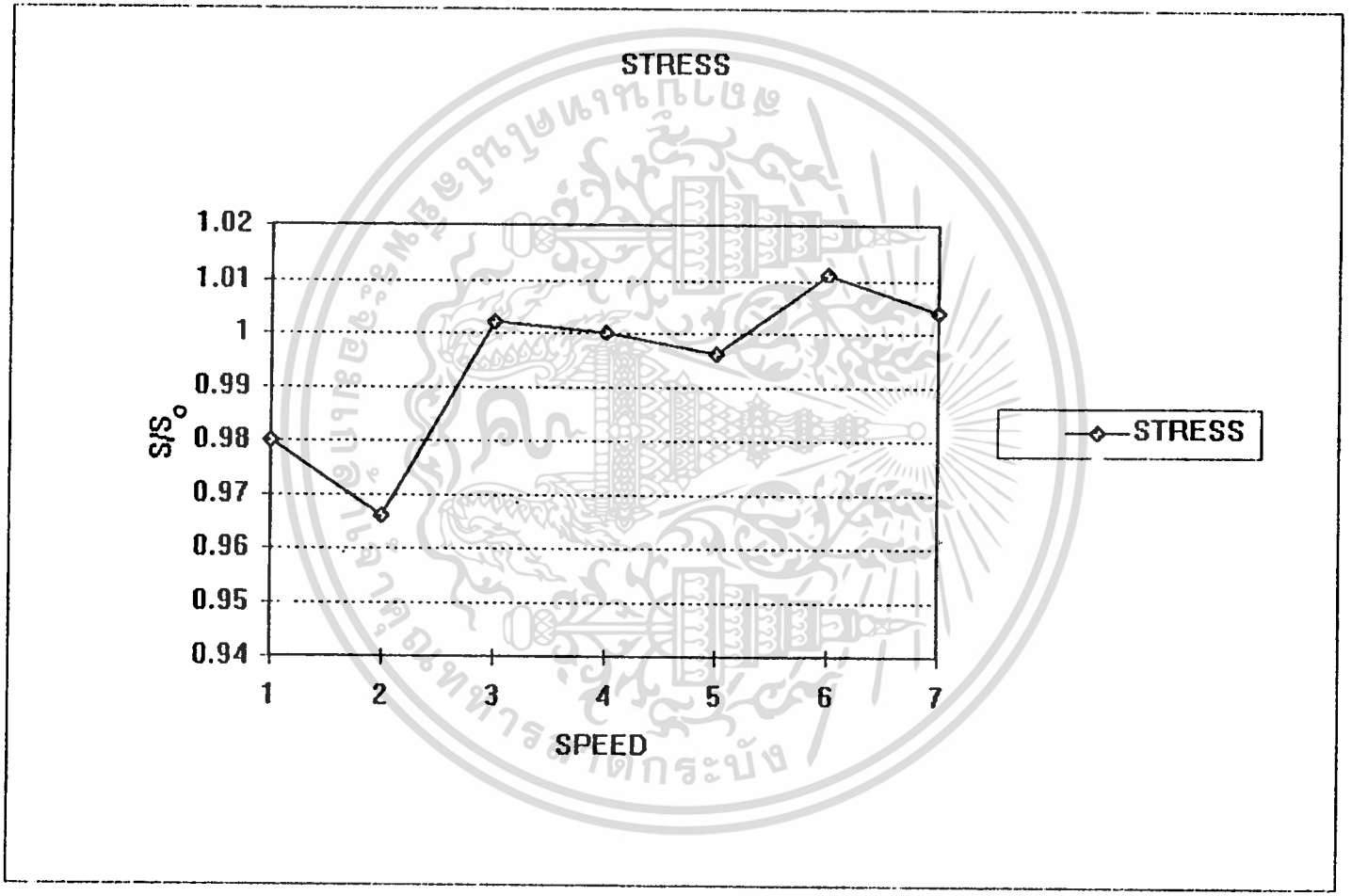
ลักษณะชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED

	1	2	3	4	5	6	7
STRESS	0.98	0.966	1.002	1	0.996	1.011	1.004

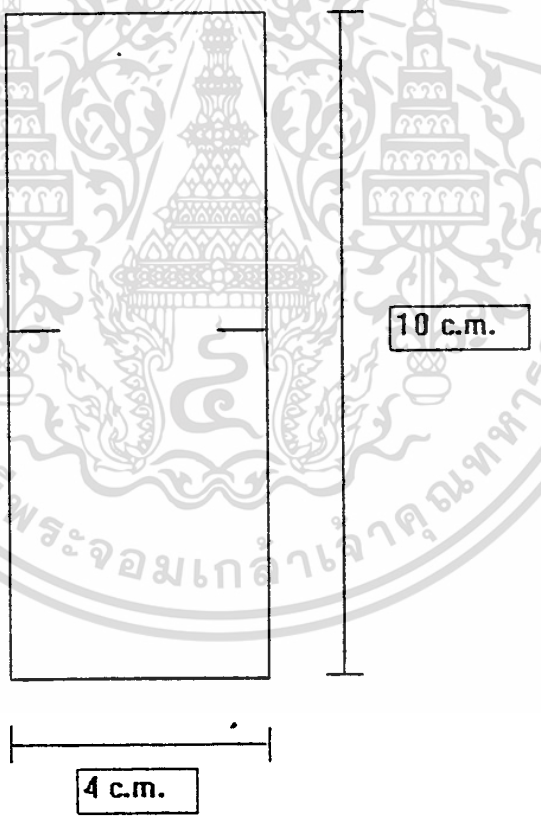


S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อยๆ)

S_o = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงที่มี ความยาว 5 ม.ม.(มีค่าคงที่)

กราฟความเค้นที่ได้มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอแต่ก็ทำให้ทราบแนวโน้มว่าชิ้นงานที่ถูกดึงด้วยความเร็วสูงจะมีค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่ถูกดึงด้วยความเร็วต่ำ

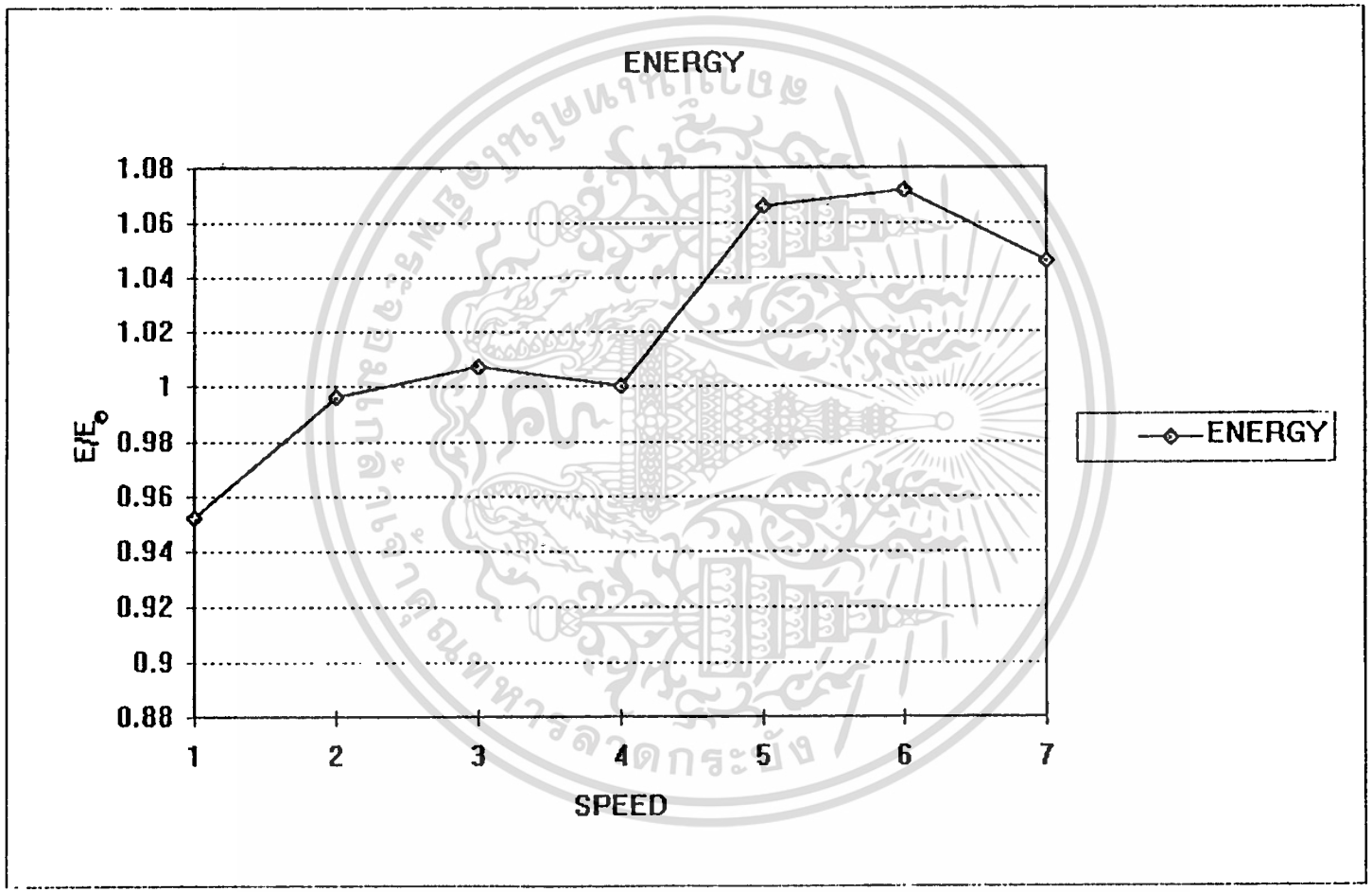
ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED

	1	2	3	4	5	6	7
ENERGY	0.952	0.996	1.007	1	1.066	1.072	1.046

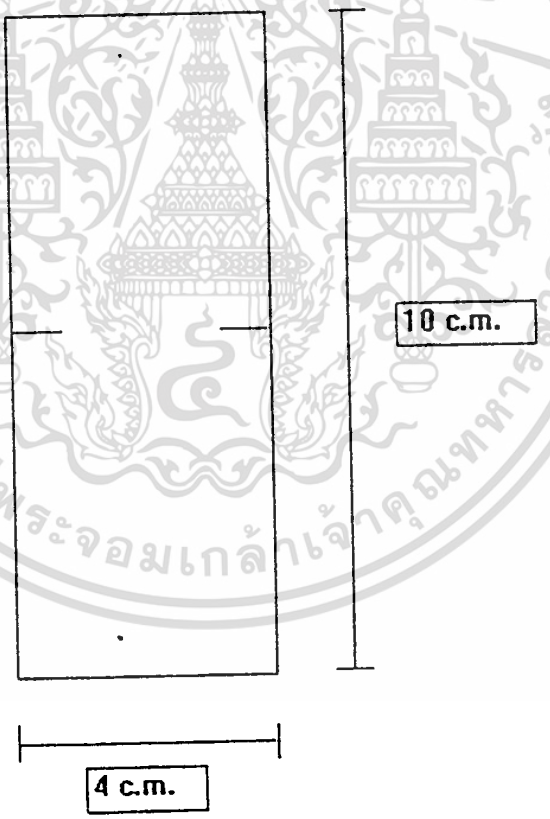


E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กจนขาด(มีค่าเปลี่ยนไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเหล็กที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงยาว 5 ม.ม. จนขาด(มีค่าคงที่)

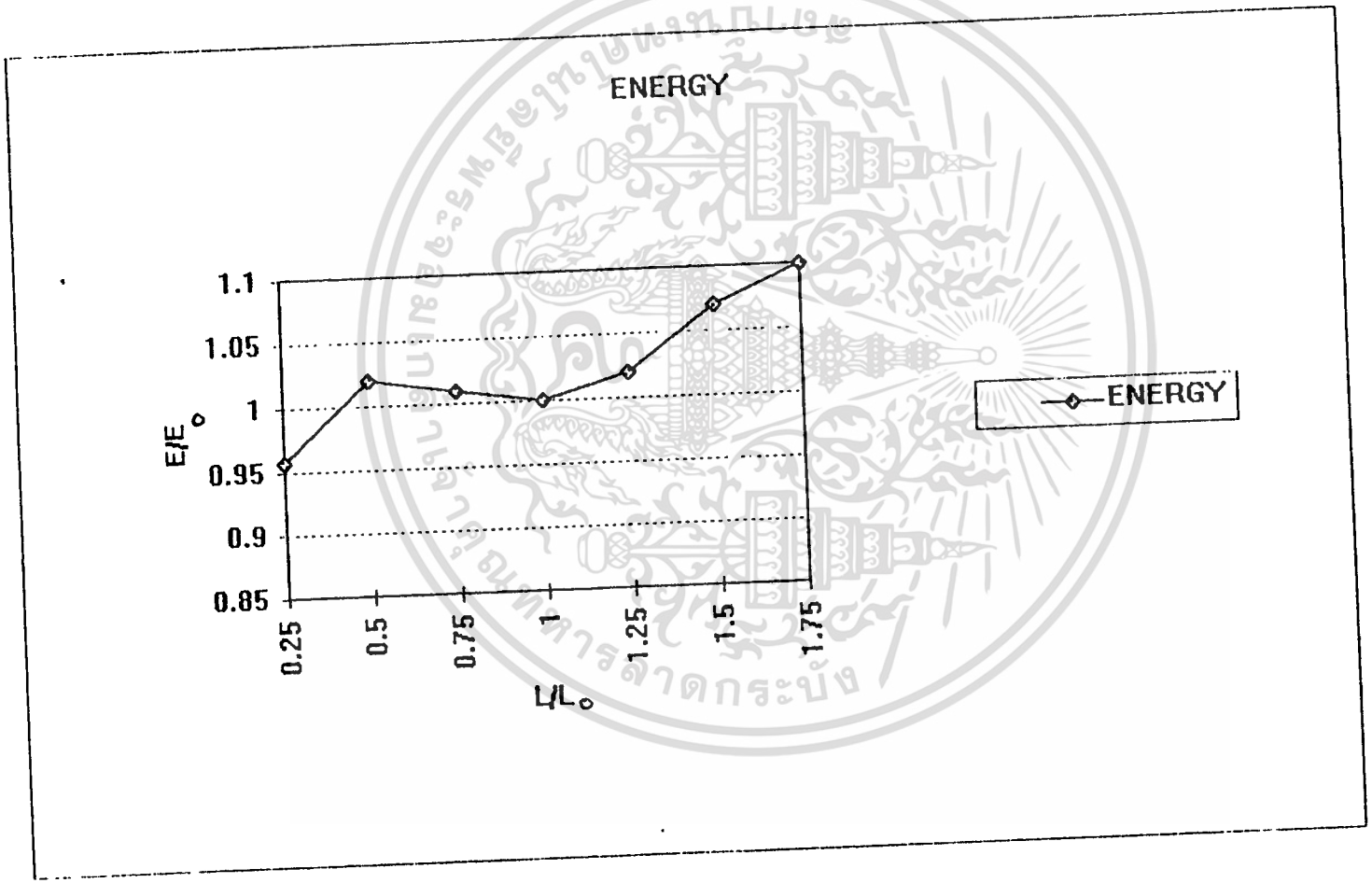
จะเห็นว่ากราฟจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ แต่ก็ทำให้ทราบแนวโน้มว่าเมื่อดึงชิ้นงานด้วยความเร็วเพิ่มมากขึ้น ก็ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นด้วย

ลักษณะของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GAUGE LENGTH	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
ENERGY	0.957	1.02	1.01	1	1.02	1.07	1.1



E = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด(แปรผันไปเรื่อยๆ)

E_o = ค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงที่มีความยาว 5 ม.ม. และมี GAUGE LENGTH ยาว 40 ม.ม.จนขาด

L = ความยาวของ GAUGE LENGTH ของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อย)

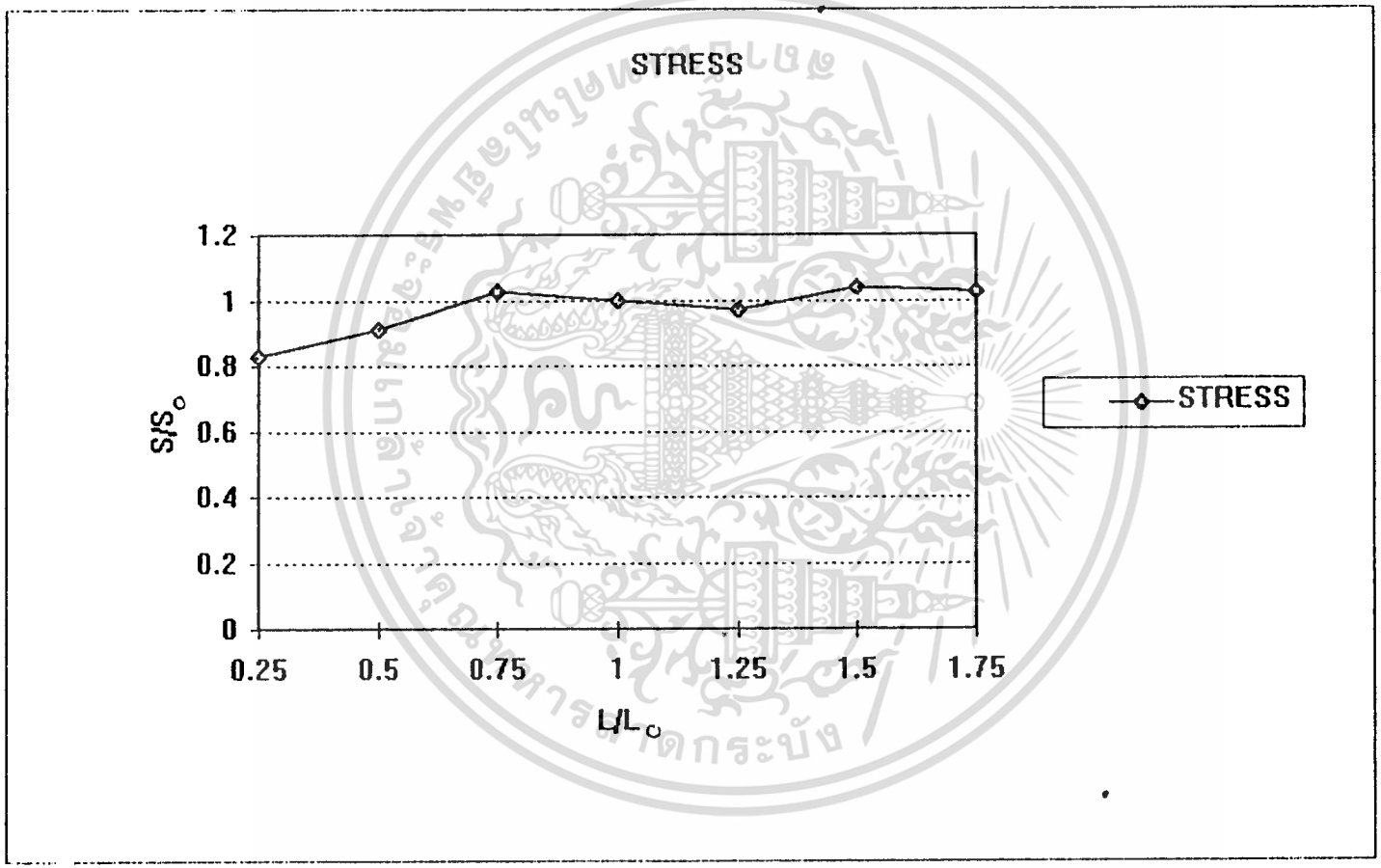
L_o = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่ายิ่งใช้ความเร็วในการดึงมากขึ้นยิ่งต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GAUGE LENGTH

	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
STRESS	0.828	0.911	1.027	1	0.971	1.04	1.027



S = ค่าความเค้นของชิ้นงาน

S_0 = ค่าความเค้นของชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นรูปเส้นตรงยาว 5 ม.ม. และ GAUGE LENGTH 40 ม.ม.

L = ความยาวของ GAUGE LENGTH ของชิ้นงาน(แปรผันไปเรื่อย)

L_0 = 40 ม.ม.

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อ GAUGE LENGTH มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นของชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่อัตราการเพิ่มไม่สูงนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRESS CONCENTRATION

ความไม่ต่อเนื่องของรูปร่างในการออกแบบ เช่น รู รอยบาก ทำให้เกิดความเค้นเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด ค่าตัวประกอบความเค้นเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด (stress concentration factor ; Kt) จะเป็นตัวกำหนดความเค้นเฉพาะจุด Kt = s/S s คือค่าความเค้นเฉพาะจุด และ S คือค่าความเค้นในนาม (nominal stress) ค่า Kt จะแ ตกต่าง กันในรูปร่างของรอยตัดต่างๆกัน

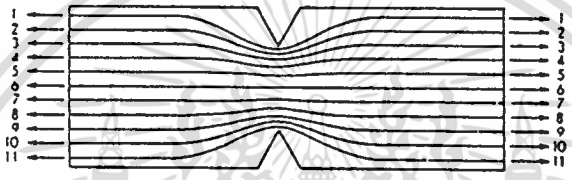
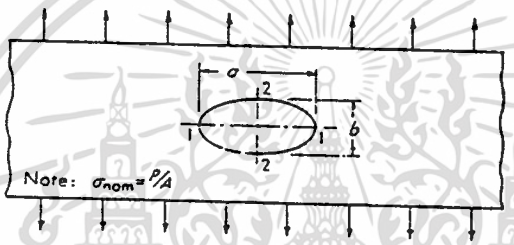


Fig. 13.1 Force-flow lines in notched tensile bar.

เราสามารถอธิบายถึง ความเข้มของความเค้น ได้จากรูป โดยจะเห็นว่าเส้นกระแสแรงที่ให้อย่างสม่ำเสมอจะเข้มขึ้นที่พื้นผิวขณะผ่านส่วนที่ถูกตัด โดยเส้นกระแสแรง 3 เส้นถูกบีบให้โค้งเข้าข้างในแ ต่เส้นกระแสแรงจะพยายามไหลเป็นเส้นตรง จึงทำให้มารวมกันที่ใกล้พื้นผิว เส้นกระแสแรงจะไหลผ่านอย่างทันทีทันใดในเกรนของวัสดุที่ติดกับพื้นผิวทำให้แกรนเกิดการขยายตัวอย่างมาก ซึ่งเป็นผลให้เกรนข้างเคียงขยายตัวด้วย จึงเป็นการช่วยรับโหลดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผลของความเข้มของความเค้นจะทำให้เกิดการยืดตัวเข้าข้างในจากพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นกรณีของวงรีในแผ่นเพลทขนาดใหญ่ภายใต้แรงดึง สมมุติว่าแผ่นเพลทมีขนาดใหญ่มากๆและการลดลงของของพื้นที่หน้าตัดเนื่องจากรู สามารถละทิ้งได้ เราสามารถหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นได้จากสมการ



$$K_t = 1 + 2(a/b)$$

จากสมการนี้เราสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี

1. เมื่อรอยแตกขนานกับทิศทางของโหลด a / b มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และ kt มีค่าเข้าใกล้ 1

2. เมื่อรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางของโหลด a / b มีค่าเข้าสู่อนันต์ และ kt มีค่าเข้าสู่อนันต์

3. เมื่อรอยแตกเป็นวงกลม a / b เท่ากับ 1 kt มีค่าเท่า 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของรอยตัดต่อความแข็งแรงของวัสดุ

รูปร่างของรอยตัดต่างๆกันจะมี Kt ต่างกัน รอยแตกจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเค้นเฉพาะจุดสูงถึงค่าความเค้นวิกฤต จากสมการ kt = 2 (w - d) t s o / Pi จะเห็นว่าเมื่อ d มากขึ้นจะทำให้ kt มีค่าลดน้อยลง ซึ่งก็คือเมื่อรอยตัดยาวมากขึ้นค่า kt ลดน้อยลงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น จากการทดลองจะเห็นว่ารอยตัดแบบเส้นตรงทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคือแบบสามเหลี่ยม วงกลม และสี่เหลี่ยมตามลำดับ

ความยาวของรอยตัดจะแปรผกผันกับค่าพลังงานความเครียดในวัสดุ จากการทดลองจจะเห็นว่ารอยตัดแบบวงกลมจะมีค่าพลังงานความเครียดมากกว่าแบบอื่นๆ รองลงมาคือแบบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และเส้นตรงตามลำดับ และเมื่อรอยตัดมีความยาวมากขึ้นค่าพลังงานความเครียดจะลดลง

การเสียรูปและการแตกแบบพลาสติกนั้นสามารถพิจาราณาได้จากพลังงานจลน์ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ 1. ช่วงเร่งเริ่มต้น 2. ช่วงหน่วง 3. ช่วงหยุดนิ่ง 4. ช่วงเร่งสุดท้าย ช่วงเร่งเริ่มต้นเป็นช่วงที่สั้นซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มโหลดจาก ศูนย์ถึง ค่าหนึ่งๆ และจะต่อด้วยช่วงหน่วงซึ่งโหลดจะค่อยๆลดลง ช่วงหยุดนิ่ง โหลดจะคงที่ ช่วงเร่งสุดท้ายซึ่งโหลดจะเพิ่มขึ้นจนเกิดการล้มเหลวของวัสดุ

พลังงานยืดหยุ่นที่สะสมอยู่ในวัสดุจะแปรผันโดยตรงกับความสามารถในการคลาก (YIELDABILITY) ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างระยะยืดกับโหลด วัสดุที่มีความสามารถในการคลากมากจะมีพลังงานมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CRACK PATHS

รอยแตกจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเค้นสูงสุด จากการทดลองอย่างง่ายจะเห็นว่ารอยแตกจะขยายตัวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นดึง ทิศทางของการขยายตัวของรอยแตกมีความสัมพันธ์กับระยะยืดและอัตราของงานที่เกิดขึ้น เพราะว่าการขยายตัวของรอยแตกเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของพลังงาน เกณฑ์ในการพิจารณาหาแนวของรอยแตกนั้นคือรอยแตกจะใช้เส้นทางที่สามารถลดพลังงานได้มากที่สุดและเร็วที่สุด ซึ่งก็คือเส้นทางที่สามารถดูดรับงานที่เกิดขึ้นในอัตราที่มากกว่าเส้นทางอื่น หรือเส้นทางที่มีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดได้มากที่สุด

แนวรอยแตกของรอยตัดแบบตรง สามเหลี่ยม และวงกลม จะเป็นแนวยาว ซึ่งรอยตัดแบบนี้จากทฤษฎีของเส้นกระแสแรงจะมีจุดที่มีความเค้นสูงสุดเพียงสองจุด โดยทั้งสองจุดอยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนรอยแตกแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวไม่มากจะมีแนวรอยแตกเป็นแนวเฉียง ซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือน ซึ่งต่างกับรอยแตกแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวมากโดยจะมีรอยแตกเป็นแนวยาวคล้ายกับการแตกของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากเนื่องจากเมื่ออัตราส่วนของความยาวรอยบากต่อความกว้างของชิ้นงานมีค่ามาก ชิ้นงานจะแตกเพราะความเค้นดึงก่อนที่ค่าความเค้นเฉือนจะถึงจุดวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยอื่นๆต่อความแข็งแรงของวัสดุ

ปัจจัยอื่นๆที่ได้จากการทดลองมีดังนี้คือ

1. gauge lengths
2. speeds of deformation

จากการทดลองเมื่อวัสดุมีความยาวมากขึ้น มีแนวโน้มจะทำให้ความแข็งแรงและค่าพลังงานของวัสดุมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วของการยืดมากขึ้นก็มีแนวโน้มดังนี้เช่นกัน

เมื่อความยาวของวัสดุมากขึ้นวัสดุจะมีปริมาตรพื้นผิวมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลให้มีเกรนที่แบ่งรับโหลดมากขึ้นและทำให้สามารถยืดได้มากขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มความเร็วของการยืดมากขึ้นทำให้พลังงานที่เกินซึ่งทำให้เกิดการไร้เสถียรภาพแปรเปลี่ยนเป็นงานในการยืดของวัสดุมีผลให้รอยแตกมีเสถียรภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมรอยแตก

การเพิ่มเสถียรภาพของรอยแตกจะทำได้โดยการเพิ่ม ค่า dR / dAให้มากที่สุดซึ่งหมายถึงการเพิ่มงานที่จำเป็นเพื่อให้รอยแตกขยายตัวมากกว่าปกติ และการลดค่า dJ / dA ให้น้อยที่สุด ซึ่งก็คือการดูดรับพลังงานส่วนเกินที่ทำให้รอยแตกขยายตัว ไร้เสถียรภาพ โดยการออกแบบรูปร่างของวัสดุให้เหมาะสม หรือ ใช้ external stabilizer

เราสามารถลดความเข้มของความเค้นโดยการออกแบบรูปร่างของวัสดุให้เหมาะสมกับกระแสแรง เช่น โดยการบากเป็นรูปสามเหลี่ยมหลายแห่งเพื่อให้กระแสแรงไหลได้ราบเรียบขึ้นหรือโดยการเจาะรู ที่สามารถลดค่า kt ได้ จากการทดลองจะเห็นว่าวัสดุที่มีรอยบากสามเหลี่ยมจะมีความแข็งแรงมากขึ้นแต่เมื่อมีรอยบากมากขึ้นความแข็งแรงจะลดลง ส่วนค่าพลังงานจะแปรผันตรงกับจำนวนรอยบากของวัสดุ

วัสดุที่เจาะวงกลมคู่จะแข็งแรงกว่าวงกลมเดี่ยวแต่ค่าพลังงานน้อยกว่าวงกลมเดี่ยว และรัศมีของวงกลมแปรผันกับความแข็งแรงของวัสดุแต่แปรผกผันกับค่าพลังงาน จากสมการของความเข้มของความเค้นของวัสดุ วงกลมจะมีค่าความเข้มของความเค้นน้อยกว่าแบบอื่นๆ และจากการทดลองของรอยตัดแบบต่างๆจะเห็นว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุลดลงค่าพลังงานความเครียดจะลดลงด้วย ดั้งนั้นรัศมีของวงกลมจึงแปรผันกับค่าพลังงานความเครียดของวัสดุ

ในกรณีที่เป็นรอยตัดแบบต่างๆก็ควรออกแบบให้มีความยาวและรูปร่างที่เหมาสม เพื่อให้สามารถรับแรงและมีความสามารถในการคลากมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์สมชัยในคำปรึกษา
ขอขอบคุณอาจารย์ทุกๆท่านในความช่วยเหลือ
ขอขอบคุณพี่มณฑาในคำแนะนำ
ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนในความหวังดี
ขอขอบคุณคู่โปรเจ็คในความอุตสาหะ
ขอขอบคุณผู้ที่ให้ความสนับสนุนซึ่งไม่ได้เอ่ยนาม
ขอขอบคุณกำลังใจทุกๆดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. Jame W. Dally and William F. Riely, Experimental stress analysis .
2. John M. Barson and Stanely T. Ralfe , Fracture and fatigue control structures .
3. Robert M. Caddel , Deformation and fracture of solids .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้