

การศึกษาผลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ

เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมต์ 6

The Study of Notch's Effect on Life Cycles under Axial Load for Material

AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6

อาณัติ หาททรัพย์¹ มงคล มงคลวงศ์โรจน์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Anat Hasap¹ Mongkol Mongkolwongroj²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of technology Ladkrabang,

Ladkrabang 10520, Thailand

E-mail: anat@tistr.or.th¹

: kmmongko@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ 3 กลุ่มคือ เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมต์ 6 โดยทำการทดลองเตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุดังกล่าวให้มีค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่างกันคือ 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 และ 6.0 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบรูปร่างของชิ้นทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณอายุการรับแรงตามแนวแกนโดยสมการ “อายุความเครียด” และสมการ “บาสควิน” กับอายุที่ได้จากการทดสอบการรับแรงจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินอายุของชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ทำจากกลุ่มวัสดุดังกล่าวได้

Abstract

This paper presents the comparative study of notch's effect on the life cycles under axial loading of material AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6. The experiment setup using specimens prepared from the AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6 with varying stress concentration factor of 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 and 6.0 respectively. The dimension of the specimens was determined using the Finite Element Method. The predicted life cycle under axial loading using the strain life equation and Basquin equation were compared with the life cycle from the test. The result from this experiment could be used for service life prediction of engineering components made of these materials.

1. บทนำ

ชิ้นส่วนประกอบทางวิศวกรรมสมัยใหม่โดยส่วนใหญ่จะรับภาระกรรมแบบแปรเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา การออกแบบเพื่อให้สามารถทนทานต่อภาระกรรมที่ไม่คงที่นี้ได้นั้นต้องคำนึงถึงผลของความล้าซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุต้องรับภาระกรรมซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีคุณลักษณะทนทานต่อความล้าแตกต่างกันไป กลไกของการเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้านี้มีลักษณะแบบสะสมตลอดระยะเวลาที่ชิ้นส่วนนั้นรับภาระกรรม [1] จนกระทั่งชิ้นส่วนนั้นถึงจุดที่ไม่สามารถรับภาระกรรมอีกต่อไปได้ก็จะเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ซึ่งเป็นการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอย่างฉับพลันโดยไม่มีอาการบอเหตุหรือเตือนภัยล่วงหน้าเช่น การยืดตัว (Yielding) เป็นต้น และอาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินหากเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย เช่น เครื่องบิน สะพาน โครงสร้างอาคาร รถยนต์ เป็นต้น.

ในบรรดาปัจจัย (factor) ที่มีผลกระทบต่อความเสียหายเนื่องจากความล้า รอยบาก (Notch) เป็นปัจจัยที่มีผลค่อนข้างมากแล้วแต่ระดับความรุนแรงของรอยบากซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบและกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วน รอยบากเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยากในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนวิศวกรรม จากการศึกษาพบว่าความเสียหายเนื่องจากความล้าจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นรอยบากเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเค้นสะสม (Stress concentration) สูงซึ่งรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue crack) จะเกิดขึ้นบริเวณนี้ ดังนั้นอายุการใช้งานของชิ้นส่วนวิศวกรรมจึงได้รับผลกระทบโดยตรงจากรอยบาก

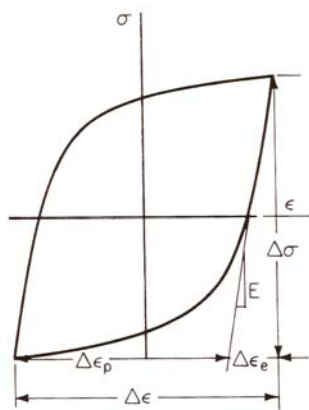
ในบทความนี้ได้ศึกษาผลกระทบของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนโดยจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของรอยบากที่มีต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนและความถูกต้องของการประเมิน

อายุของชิ้นส่วนโดยวิธี Strain based approach และยังศึกษาผลการใช้ค่าแฟกเตอร์ความเค้นสะสม (Stress concentration factor) และค่าแฟกเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength reduction factor) ในการประเมินอายุของชิ้นส่วนที่รับแรงแบบพลวัตร ทั้งนี้ได้เลือกทำการศึกษาวัด 3 ชนิดคือ เหล็กที่ใช้ทำอะไหล่ AISI 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 เหล็กอะไหล่ AISI 4140 หรือ SCM440 ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า “เหล็กหัวฟ้า” ซึ่งเป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลาง 0.38 ถึง 0.43 % เหล็กชนิดนี้มีความสามารถในการชุบแข็ง ความแข็งหลังชุบประมาณ 54 – 59 HRC สามารถชุบขึ้นรูปได้ดี และความสามารถในการตัดแต่งปานกลาง ความสามารถในการเชื่อมไม่ตึงเนื่องจากมีโอกาสแตกร้าวขณะเชื่อมได้ง่าย ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการทำเฟืองขนาดเล็ก สลักเกลียว ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และสลักเกลียวต่างๆที่ต้องการความแข็งแรงสูง เป็นต้น [2] อลูมิเนียม 7075 เป็นอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงสูงใช้ในชิ้นส่วนเครื่องจักร โครงสร้างและเครื่องบิน ส่วนโพลีเอไมด์ 6 เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึง แรงกระแทก และโมดูลัสสูง มีคุณสมบัติต้านทานการขีดข่วนได้ดี ใช้ทำเฟือง บูช ลูกกลิ้ง เป็นต้น

2. ทฤษฎี

2.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อภาระกรรมแบบซ้ำๆ ของวัสดุ

เมื่อวัสดุรับภาระกรรมแบบซ้ำๆ (Repeated load) หลายๆ ครั้ง หรือภาระกรรมแบบไม่คงที่ (Variable load) อยู่ตลอดเวลาอาจทำให้ชิ้นส่วนเกิดการล้าตัวจนเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้แม้ว่าชิ้นส่วนนั้นจะรับภาระกรรมในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) หรือต่ำกว่าจุดจำนน (Yielding point) ก็ตาม กลไกความเสียหายเนื่องจากความล้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ [2,3] คือ 1)ระยะเริ่มเกิดรอยแตก (Crack initiation) 2) ระยะที่รอยแตกขยายตัว (Crack propagation) 3) ระยะที่เกิดความเสียหายขั้นสุดท้าย (Final failure) เมื่อวัสดุรับภาระกรรมแบบพลวัตร ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจะมีลักษณะเป็นวงรอบ (Loop) ซ้ำๆ กันที่เรียกว่า Hysteresis loop ดังรูปที่ 1 [3]



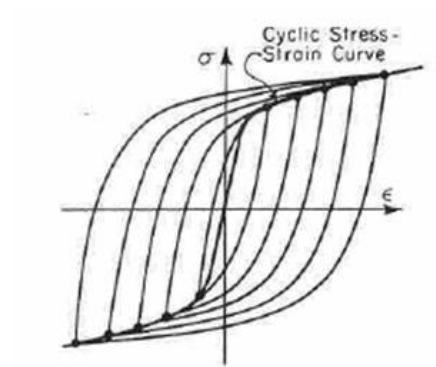
รูปที่ 1 Hysteresis loop

สมการ Hysteresis equation :

$$\Delta \epsilon = \Delta \sigma / E + 2(\Delta \sigma / 2K')^{1/n'} \quad (1)$$

โดยที่ K' คือ Cyclic strength coefficient n' คือ Cyclic strain hardening exponent $\Delta \sigma$ คือ Total stress range $\Delta \epsilon$ คือ Total strain range เมื่อนำ Hysteresis loop หลาย loop มา plot บนกราฟ

เดียวกันและเชื่อมต่อกันเข้าด้วยกันก็จะได้ Cyclic stress-strain curve ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2_Cyclic stress-strain curve

สมการ Cyclic stress strain curve :

$$\epsilon_t = \sigma / E + (\sigma / K')^{1/n'} \quad (2)$$

โดยที่ K' คือ Cyclic strength coefficient $K' = \sigma_t' / \epsilon_t'^{n'}$

n' คือ Cyclic strain hardening exponent ($n' = b/c$)

2.2 การคำนวณหา Local stress และ Local strain

เมื่อชิ้นส่วนรับภาระกรรม บริเวณที่มีความเค้นสูงสุดจะเป็นจุดวิกฤตของชิ้นส่วนนั้น กล่าวคือความเค้นและความเครียดตรงบริเวณดังกล่าวจะนำมาใช้ในการประเมินอายุของชิ้นส่วน โดยส่วนใหญ่แล้วจุดวิกฤตจะอยู่ตรงบริเวณที่มีความเค้นสะสม เช่นจุดที่มีการเปลี่ยนขนาด Fillet ดินรอยเชื่อม (Weld toe) ร่องลิ้น เป็นต้นบริเวณเหล่านี้ถือว่าเป็นรอยบากและจะเป็นจุดที่เริ่มเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า ถึงแม้ชิ้นส่วนจะรับภาระกรรมไม่สูงนักแต่ตรงจุดที่เป็นรอยบากเหล่านี้อาจมีความเค้นอยู่ในช่วง Plastic ได้หากรอยบากมีค่าแฟกเตอร์ความเค้นสะสมสูง เทคนิคที่มักใช้ในการหาแฟกเตอร์ความเค้นสะสม ได้แก่ 1)

Finite element 2) Strain gauge 3) Photo-elastic

Neuber ได้เสนอสมการที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความเค้นและความเครียดตรงบริเวณที่เป็นรอยบาก [3]

$$K_t^2 = K_\epsilon K_\sigma \quad (3)$$

$$K_t^2 S e = \sigma \epsilon \quad \text{หรือ} \quad K_t^2 \Delta S \Delta e = \Delta \sigma \Delta \epsilon$$

โดยที่ K_t คือ Theoretical stress concentration factor K_ϵ คือ True strain concentration factor K_σ คือ True stress concentration factor S คือ Nominal stress σ คือ Local (True) stress e คือ Nominal strain ϵ คือ Local (True) strain เมื่อรวมสมการ (3) กับสมการ (1) และ (2) จะได้

$$K_t^2 S e = \sigma [\sigma / E + (\sigma / K')^{1/n'}] \quad (4)$$

$$\text{หรือ} \quad K_t^2 \Delta S \Delta e = \Delta \sigma [\Delta \sigma / E + 2(\Delta \sigma / 2K')^{1/n'}] \quad (5)$$

2.3 การคำนวณค่าเฟดเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า

ถึงแม้ว่าบริเวณที่เป็นรอยบากจะทำให้ค่าความเค้นทางทฤษฎีเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลเฟดเตอร์ความเค้นสะสมก็ตาม วัสดุบางชนิดหรือรูปร่างของรอยบากบางลักษณะก็ไม่ sensitive ต่อรอยบากทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงต่ำกว่าความเค้นทางทฤษฎี หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าเฟดเตอร์ความเค้นสะสมสำหรับวัสดุบางชนิดหรือรูปร่างของรอยบากบางลักษณะต่ำกว่าเฟดเตอร์ความเค้นสะสมทางทฤษฎี ในกรณีนี้จะใช้ค่าเฟดเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength reduction factor) K_f แทน [4]

$K_f = \sigma_{\max}/\sigma_0$ โดย σ_0 คือ nominal stress
notch sensitivity factor : $q = (K_f - 1)/(K_t - 1)$

โดยที่ $0 \leq K_f \leq K_t$ และ $0 \leq q \leq 1$

สมการของ Peterson [5] :

$$q = 1 / (1 + a/r) \quad (6)$$

$$a = 0.0254 (2079 / S_{ut})^{1.8} \quad (7)$$

โดยที่ a คือ ค่าคงที่ของวัสดุ S_{ut} คือ Ultimate tensile strength (MPa)
 r คือ รัศมีรอยบาก (mm)

2.4 การคำนวณอายุของชิ้นส่วนรับภาระกรรมแบบไม่คงที่

สมการของบาสดวิน ซึ่งมีรูปทั่วไปว่า

$$\sigma_a = a(N)^b \quad (8)$$

สำหรับวัสดุกลุ่มเหล็กสมการค่าคงที่ a และ b หาได้จาก [4]

$$a = (0.9 S_{ut})^2 / S_e$$

$$b = -(1/3)\log(0.9 S_{ut}/S_e)$$

S_{ut} คือ Ultimate tensile strength S_e คือ Fatigue strength หาได้จาก

$$S_e = 0.504 S_{ut} \text{ สำหรับ } S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e = 1400 \text{ MPa สำหรับ } S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

ในปัจจุบันทฤษฎีที่สามารถอธิบายลักษณะของความเสียหาย

เนื่องจากความล้าได้ดีคือ ทฤษฎีที่มีพื้นฐานบน Strain based approach ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินอายุและความแข็งแรงต่อความล้าได้ด้วย วิธีนี้ได้รวมถึงผลของ Elastic strain และ Plastic strain สามารถใช้ได้กับทั้ง LCF และ HCF [1,4]

$$\Delta\epsilon/2 = (\sigma'_f / E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (9)$$

โดยที่ σ'_f คือ Fatigue strength coefficient : b คือ Fatigue strength exponent ϵ'_f คือ Fatigue ductility coefficient : c คือ Fatigue ductility exponent : N_f คือ จำนวนครั้งของการกลับทิศทางความเค้น (Reversal) N คือจำนวนรอบของการรับภาระกรรม = $2 N_f$

2.5 เทคนิคการประมาณค่าคุณสมบัติด้านความล้าแบบแกนเดียว (uni-axial fatigue properties)

Uni-axial fatigue properties ได้แก่ σ'_f , b , ϵ'_f และ c เป็นค่าคงที่ของวัสดุ สามารถหาได้จากการทดลองและยังสามารถประมาณได้จากค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงได้ด้วย เช่น ค่า Ultimate tensile strength S_{ut} , Young modulus E , Fracture ductility ϵ_f และ % Reduction in area (RA) เป็นต้น วิธีการประมาณค่าเหล่านี้มีหลายวิธี และพบว่าวิธีที่ให้ผลการประมาณที่ดีที่สุดคือวิธี Modified universal slope ของ Muralidharan และ Manson [6]

$$\sigma'_f = 0.623E(S_{ut} / E)^{0.832}$$

$$b = -0.09$$

$$\epsilon'_f = 0.0196\epsilon_f^{0.155} (S_{ut} / E)^{-0.53} \quad (10)$$

$$c = -0.56$$

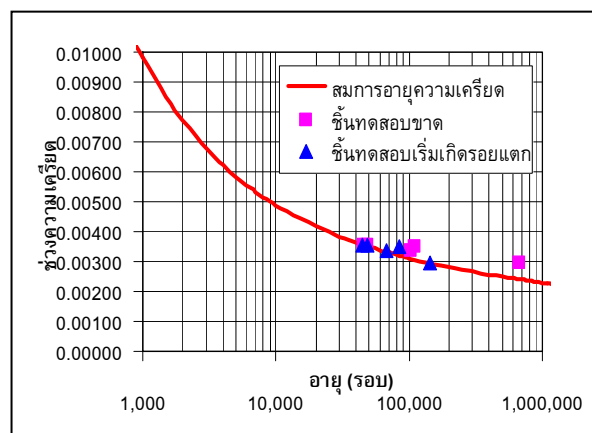
โดยที่ $\epsilon_f = \ln (1/(1-\%RA))$

3. การทดลอง

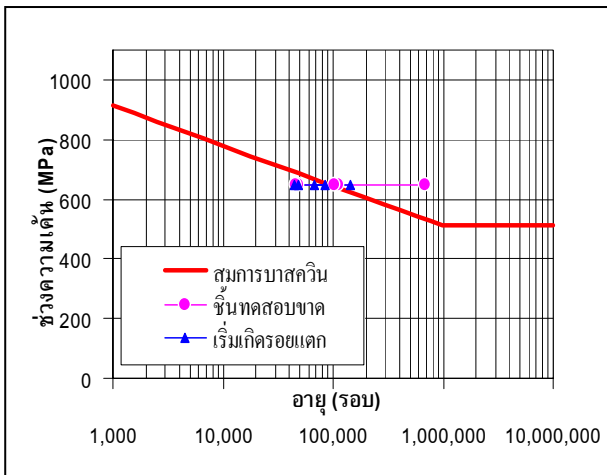
เตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงจากวัสดุ AISI 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 อย่างละ 3 ชิ้นให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E370 ทำการทดสอบความแข็งแรงและทดสอบแรงดึง นำข้อมูลจากการทดสอบไปใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบความล้าวัสดุละ 5 ชิ้น โดยออกแบบขนาดรอยบากให้มีค่า เฟดเตอร์ความเค้นสะสมต่างกันตั้งแต่ค่าต่ำประมาณ 1.2 จนถึงค่าสูงประมาณ 6.0 โดยใช้โปรแกรม Finite Element ANSYS 7.0 จำลองการรับแรงในแนวแกนหาค่าเฟดเตอร์ความเค้นสะสมที่รอยบากของชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบความล้าชิ้นทดสอบทั้ง 5 ชิ้นด้วยขนาดแรงตามแนวแกนให้เกิดความเค้นสูงสุดที่รอยบากของชิ้นวัสดุ AISI 4140 เท่ากับ 650 MPa วัสดุอลูมิเนียม 7075 เท่ากับ 360 MPa และวัสดุโพลีเอไมด์ 6 เท่ากับ 36 MPa โดยอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio : R) เท่ากับ -1 สำหรับวัสดุ AISI 4140 และ อลูมิเนียม 7075 ใช้ความเร็วในการทดสอบในช่วง 20 - 30 Hz บันทึกจำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบเริ่มมีรอยแตกและจำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบขาดแล้วเปรียบเทียบกับผลกับอายุที่ได้จากการคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเค้นและสมการบาสดวิน ในกรณีของวัสดุโพลีเอไมด์ 6 จะใช้ความเร็วในการทดสอบคงที่ 0.2 Hz และใช้การลดลงของค่า Stiffness 20 % เป็นเกณฑ์ในการหยุดทดสอบ

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 จากกราฟรูปที่ 3 และ 4 พบว่าการใช้สมการความเค้นและทำนายอายุของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุ AISI 4140 ได้ค่อนข้างแม่นยำและให้ค่าที่ปลอดภัย (Conservative) คืออายุที่คำนวณได้ต่ำกว่าอายุที่ได้จากการทดสอบ และทำนายอายุเมื่อเกิดรอยแตกได้ดีกว่าอายุเมื่อชิ้นงานขาดทั้งชิ้น ในขณะที่สมการบาสดวินทำนายอายุที่ค่อนข้างไม่ปลอดภัยที่เฟดเตอร์ความเค้นสะสมต่ำๆ แต่จะให้ค่าที่ปลอดภัยมากที่เฟดเตอร์ความเค้นสะสมสูงๆ

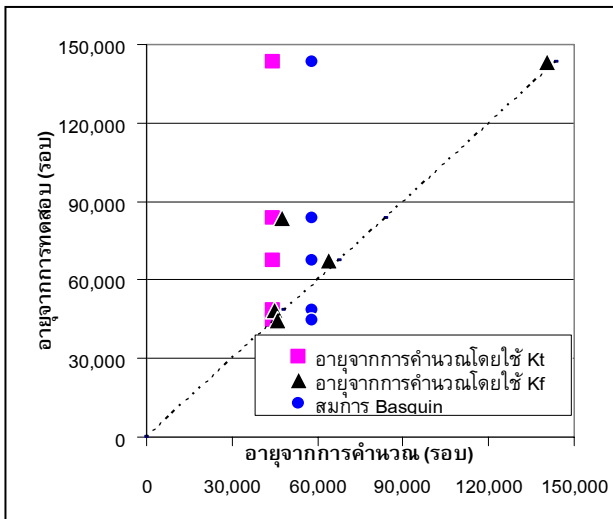


รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับสมการ อายุความเค้น

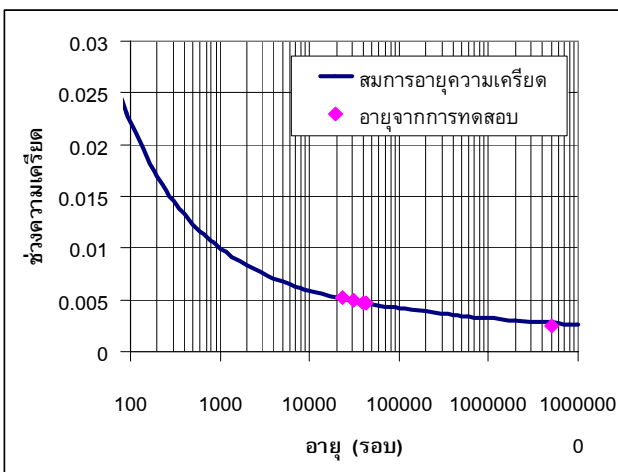


รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับสมการบาสควิน

4.2 จากกราฟรูปที่ 5 พบว่าที่เฟดเตอร์ความเค้นสะสมสูงๆ การใช้ค่า K_f ในการคำนวณอายุโดยสมการความเครียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด ในขณะที่การใช้ค่า K_t จะให้ผลการคำนวณอายุที่ปลอดภัยมาก เช่นเดียวกับการคำนวณโดยใช้สมการบาสควิน

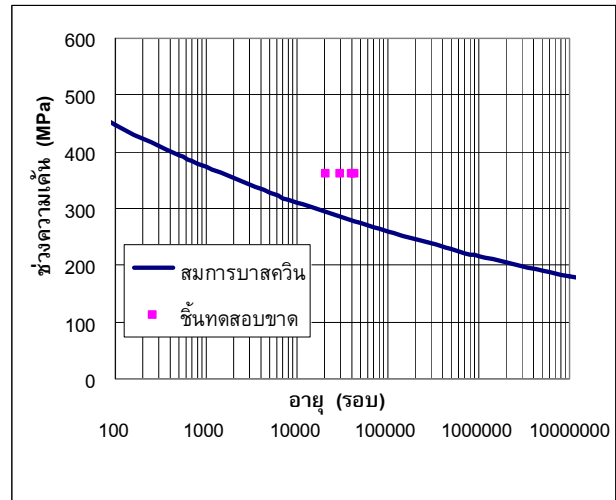


รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบอายุจากการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับอายุที่ได้จากการคำนวณ



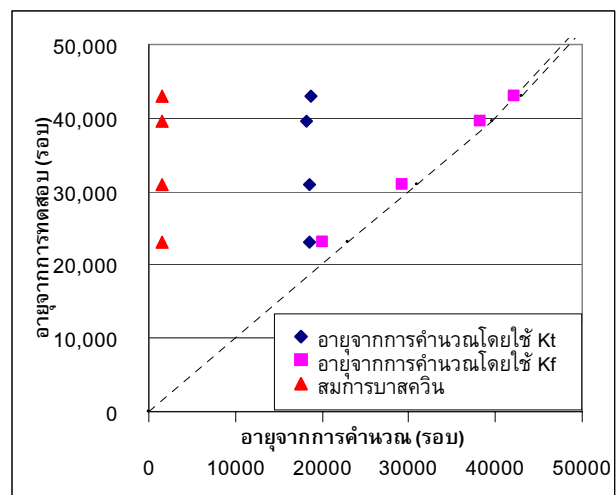
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับสมการความเครียด

4.3 จากกราฟรูปที่ 6 และ 7 พบว่าการใช้สมการความเครียดทำนายอายุของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม 7075 ได้ค่อนข้างแม่นยำและให้ค่าที่ปลอดภัย (Conservative) ในขณะที่สมการบาสควินทำนายอายุที่ปลอดภัยมาก



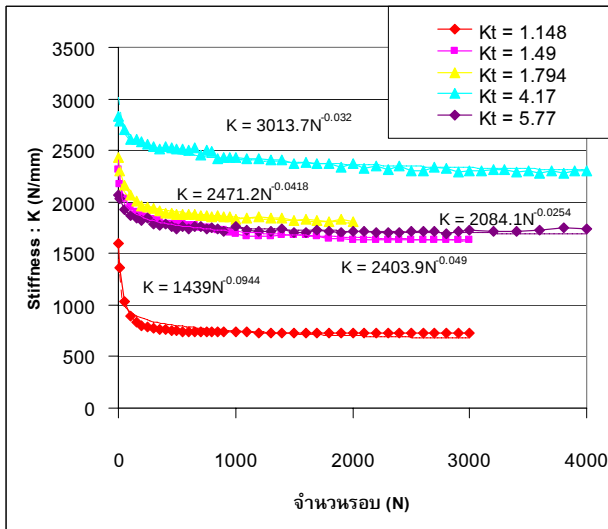
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับสมการบาสควิน

4.4 จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า การใช้ค่า K_f ในการคำนวณอายุชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม 7075 โดยใช้สมการความเครียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด ในขณะที่การใช้ค่า K_t จะให้ผลการคำนวณอายุที่ปลอดภัยมาก เช่นเดียวกับการคำนวณโดยใช้สมการบาสควิน และที่เฟดเตอร์ความเค้นสะสมต่างๆ การใช้ค่า K_t หรือ K_f ในการคำนวณอายุให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



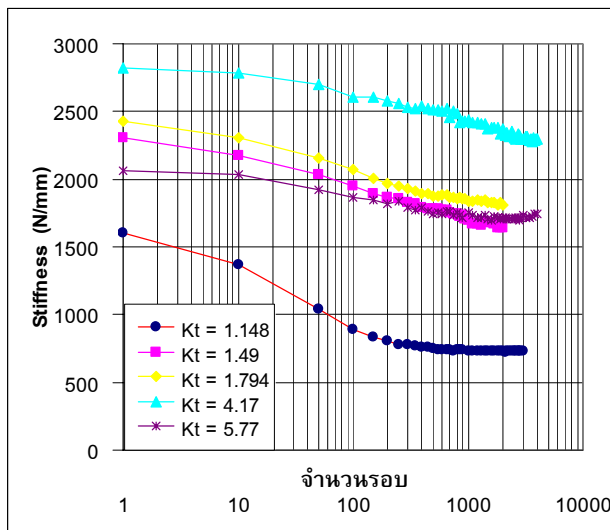
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบอายุจากการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับอายุที่ได้จากการคำนวณ

4.5 จากกราฟรูปที่ 9 และ 10 พบว่าชั้นทดสอบที่ทำจากวัสดุโพลิเอไมด์ 6 จะมี Stiffness ลดลงค่อนข้างมากในช่วงแรกๆของการรับแรงแล้วจะลดลงอย่างช้าๆจนเกือบจะคงที่หลังจาก 1000 - 3000 รอบของการรับแรงตามแนวแกนแบบซ้ำๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของการลด Stiffness เท่ากับ



รูปที่ 9 กราฟแสดงการสูญเสีย Stiffness กับอายุจากการทดสอบวัสดุโพลิเอไมด์ 6

0.04854 (N/mm) ต่อ รอบ และ ชั้นทดสอบที่มีค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำจะมีอัตราการลด Stiffness สูงกว่าชั้นทดสอบที่มีแฟคเตอร์ความเค้นสะสมสูง



รูปที่ 10 กราฟแสดงการลดลงของ Stiffness กับอายุจากการทดสอบวัสดุโพลิเอไมด์ 6

5. บทสรุป

จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่า

1. โดยทั่วไปการคำนวณอายุของชิ้นส่วนที่รับแรงแบบซ้ำๆโดยใช้สมการบาสคินจะให้ค่าอายุที่ปลอดภัยมาก แต่ในกรณีของวัสดุ AISI 4140 ที่ค่าความเค้นสะสมต่ำๆ อาจให้ค่าอายุที่ไม่ปลอดภัย

2. การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเครียดจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากและค่อนข้างปลอดภัย แต่ในกรณีที่มีค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำๆ การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเครียดจะให้ผลที่ปลอดภัยมากที่สุด
3. ที่ค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำๆ การใช้ค่า ความเค้นสะสมทางทฤษฎี หรือค่าแฟคเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลไม่ต่างกันมากนัก
4. ที่ค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมสูงๆ การใช้ค่าแฟคเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากที่สุด
5. วัสดุโพลิเอไมด์ 6 จะมี Stiffness ลดลงค่อนข้างมากในช่วงแรกๆของการรับแรงแล้วจะเกือบคงที่หลังจาก 1000 - 3000 รอบของการรับแรงตามแนวแกนแบบซ้ำๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของการลด Stiffness เท่ากับ 0.04854 (N/mm) ต่อ รอบ และ ชั้นทดสอบที่มีค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำจะมีอัตราการลด Stiffness สูงกว่าชั้นทดสอบที่มีแฟคเตอร์ความเค้นสะสมสูง

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทดสอบความล้าของวัสดุจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design", Second edition, John Wiley & Sons, 1993. pp 178.
- [2] วิมล อินทร์แก้ว และ วีรวัชร รักจิตต์, "คู่มือการเลือกใช้เหล็ก", บริษัท โอเรียนทอล สเปเชียลตีล จำกัด. หน้า 7.
- [3] "Fatigue Design Handbook", Third edition, SAE International, 1997. pp
- [4] J.Edward Shigley and C.R. Mischke, " Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill, Fifth edition, 1989. pp 217-218
- [5] R.E. Peterson, "Stress Concentration Factor", John Wiley & Sons , 1974. pp. 9 -11.
- [6] K.S. Kim, X.Chen, C.Han and H.W. Lee, "Estimation method for fatigue properties of steel under axial and torsional loading", International Journal of Fatigue, pp. 783-793.