

การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระที่มีต่อ อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า สำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ 4140

ผศ.ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล
จิรพงศ์ กลวิทย์อำนวย

บทคัดย่อ

วัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ 4140 ได้ถูกนำมาทดสอบภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่ ณ สภาวะของภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM E647-93 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า และเพื่อวิเคราะห์เงื่อนไขในการจำลองสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงมายังสภาวะของภาระทดสอบที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ และหาสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว

การทดสอบในช่วงค่าอัตราส่วนภาระตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.8 พบว่าพฤติกรรมของการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ นอกจากนี้ที่อัตราส่วนภาระเดียวกันการทดสอบที่ค่าภาระสูงสุดตั้งแต่ 1.600 ตัน ถึง 4.000 ตัน พบว่าพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับค่าภาระสูงสุด ทำให้สามารถใช้อัตราส่วนภาระเป็นพารามิเตอร์ในการเชื่อมโยงสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงกับชิ้นส่วนโครงสร้างมายังสภาวะทดสอบที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบได้ สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่ได้จากการทดสอบคือ $da/dN = 5.32 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.06}$

ความหมายของสัญลักษณ์

- a ระยะทางที่วัดจากกึ่งกลางรูเจาะบนชิ้นงานทดสอบถึงปลายรอยร้าว, mm
 R อัตราส่วนภาระ
 $\frac{da}{dN}$ อัตราการเติบโตของรอยร้าว, mm/cycle
 ΔK ค่าพิสัยของตัวประกอบความเข้มของความเค้น, MPa \sqrt{m}

1. บทนำ

ปัญหาความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างเนื่องจากความล้า นั้นจัดได้ว่าเป็นปัญหาใหญ่ที่วิศวกรต้องเผชิญ ทั้งนี้เนื่องจากในสภาพใช้งาน ชิ้นส่วนกล และโครงสร้างต่าง ๆ เกือบทั้งสิ้นจะถูกกระทำด้วยภาระเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแบบแอมพลิจูดไม่คงที่ (variable amplitude loading) หรือแบบแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude loading) ก็ได้ อย่างไรก็ตามก็การศึกษาปัญหาความล้าภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดไม่คงที่นั้นต้องการข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่ ทำให้การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาปัญหาความล้าภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนต่อไป

* หัวหน้าหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัญหาความล้าภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิฟูดงที่โดยอาศัยแนวทางของกลศาสตร์การแตกหัก(fracture mechanics) ในแนวทางของกลศาสตร์การแตกหักจะให้ความสนใจกับกับพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวซึ่งแตกต่างจากแนวทางในการเข้าถึงปัญหาความล้าแบบอื่น ๆ ทำให้สามารถใช้วิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อการประเมินอายุที่เหลือของชิ้นส่วนโครงสร้างได้ นอกจากนี้งานวิจัยยังทำการศึกษาเงื่อนไขในการกำหนดสภาวะทดสอบให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวในชิ้นส่วนโครงสร้างจริง ตลอดจนหาสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเพื่อใช้ในการคำนวณอายุความล้าด้วย

2. การทดสอบ

องค์ประกอบทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลของวัสดุเอ.ไอ.เอส.ไอ.4140 ที่นำมาทดสอบ แสดงอยู่ในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางโลหะวิทยาของวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140

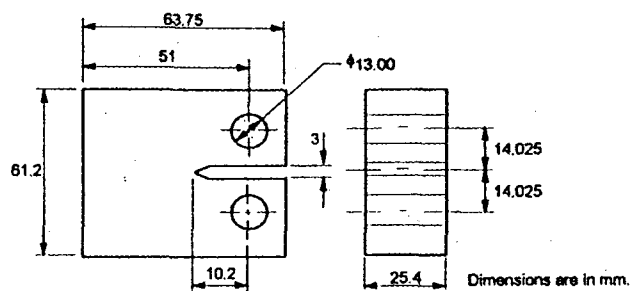
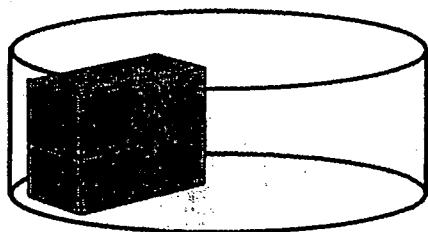
คาร์บอน(C)	ซิลิกอน(Si)	แมงกานีส(Mn)	โครเมียม(Cr)	โมลิบดีนัม(Mo)
0.42%	0.25%	0.75%	1.1%	0.2%

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กเพลลาขาว เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140

ความต้านแรงดึงความ(σ_t) MPa	ความแข็ง(HRC)
1210	30.5

ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ซึ่งมีการจัดวางตัวแบบ L-T (รูปที่ 1) ได้ถูกเลือกมาทำการทดสอบ การเตรียมชิ้นงานทดสอบเริ่มจากการตัดเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. ออกเป็นท่อนยาว 62 มม. จากนั้นจึงนำท่อนเหล็กดังกล่าวไปทำการไสจนมีรูปร่าง และขนาดตามที่ต้องการ ก่อนจะนำไปบากร่องด้วยกรรมวิธีการตัดด้วยเส้นลวด และขัดผิวให้เรียบเงาตามลำดับ มิติของชิ้นงานทดสอบที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2

สภาวะทดสอบกำหนดขึ้นโดยอาศัยตัวแปร 2 ตัวคือ ภาระสูงสุด และอัตราส่วนภาระ ด้วยเหตุผลที่ว่าภาระสูงสุดนั้นเป็นตัวแปรที่กำหนดขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติก และอัตราส่วนภาระเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับสภาวะของภาระทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจัดวางตัวแบบ L-T

รูปที่ 2 แสดงรูปร่าง และมิติของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงลักษณะของภาวะทดสอบที่ใช้ทดสอบ

รูปคลื่น	ความถี่(เฮิรตซ์)
คลื่นรูปไซน์	20 หรือ 30

ตารางที่ 4 แสดงสภาวะทดสอบที่ทำการศึกษา

ภาวะสูงสุด(ตัน)		1.600	2.000	2.353	2.667	3.333	4.000
R	ภาวะเฉลี่ย	1.040				2.166*	
	แอมพลิจูดภาวะ	0.560				1.167*	
0.5	ภาวะเฉลี่ย	1.200	1.500		2.000	2.500	3.000*
	แอมพลิจูดภาวะ	0.400	0.500		0.667	0.833	1.000*
0.7	ภาวะเฉลี่ย	1.360		2.000		2.833	
	แอมพลิจูดภาวะ	0.240		0.353		0.500	
0.8	ภาวะเฉลี่ย	1.440				3.000	
	แอมพลิจูดภาวะ	0.160				0.333	

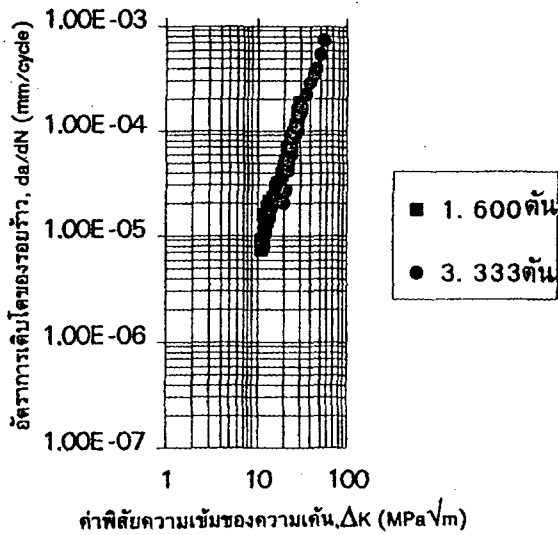
* การทดสอบกระทำที่ความถี่ของภาวะทดสอบเท่ากับ 20 Hz

3. ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์

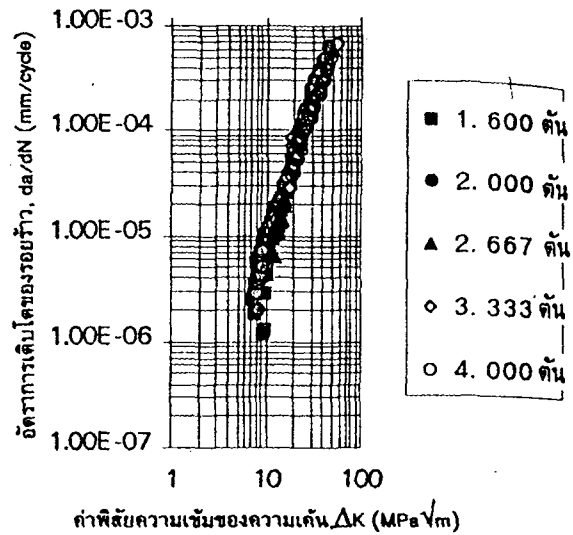
3.1 ผลของภาวะสูงสุด

จากการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ขนาดของภาวะสูงสุดต่าง ๆ กันตั้งแต่ 1.600 ตันถึง 4.000 ตัน พบว่า ณ อัตราส่วนภาวะหนึ่ง ๆ ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.8 (รูปที่ 3ก - 3ง) จุดข้อมูลพฤติ

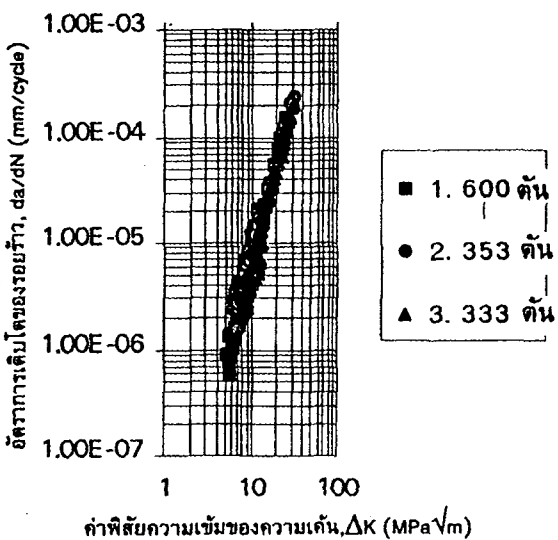
กรรมการเติบโตของรอยร้าวอยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกัน โดยเมื่อภาระสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตำแหน่งของจุดข้อมูลจะเลื่อนไปอยู่ในบริเวณที่มีค่าพิสัยความเข้มของความเค้นสูงขึ้น



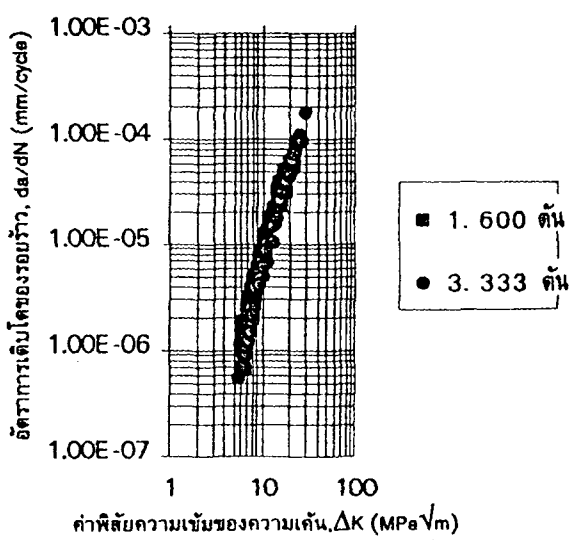
ก) R = 0.3



ข) R = 0.5



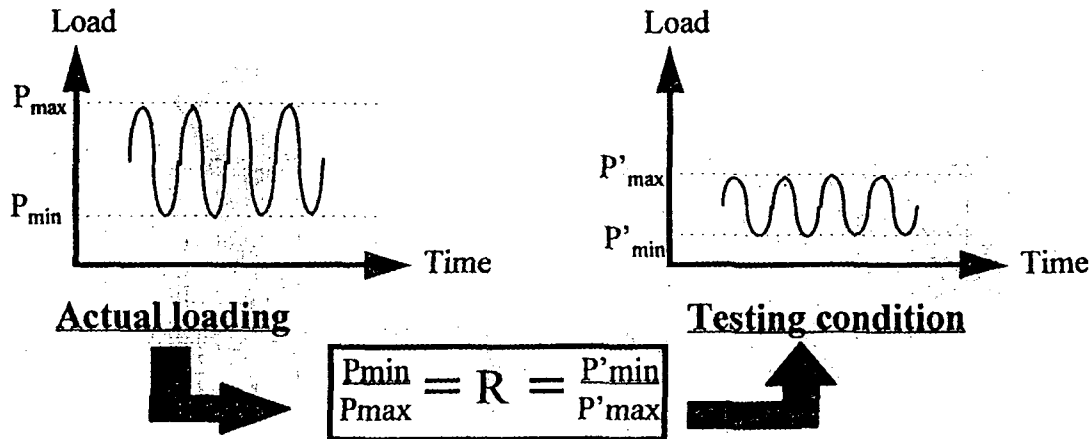
ค) R = 0.7



ง) R = 0.8

รูปที่ 3 แสดงผลของภาระสูงสุดที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส. ไอ 4140 ที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหากทำการทดสอบที่สภาวะของภาระทดสอบซึ่งมีค่าอัตราส่วนภาระเดียวกันกับค่าอัตราส่วนภาระของภาระที่เกิดขึ้นจริงจะสามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบไปประยุกต์กับสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสามารถใช้อัตราส่วนภาระเป็นพารามิเตอร์ในการจำลองสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงมายังสภาวะของภาระทดสอบที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบได้(รูปที่ 4)



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการใช้อัตราส่วนภาระเป็นพารามิเตอร์ในการจำลองสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นส่วนโครงสร้างมายังสภาวะของภาระทดสอบ

ผลที่ได้ในเชิงของการทดสอบก็คือ การกำหนดสภาวะทดสอบภายใต้เงื่อนไขของอัตราส่วนภาระเพียงเงื่อนไขเดียวทำให้การทดสอบสามารถกระทำที่ภาระทดสอบใด ๆ ที่มีความเหมาะสมกับขีดความสามารถของเครื่องทดสอบ ขนาดของชิ้นงานทดสอบ และอยู่ในขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักยึดหยุ่นเชิงเส้นได้

3.2 ผลของอัตราส่วนภาระ

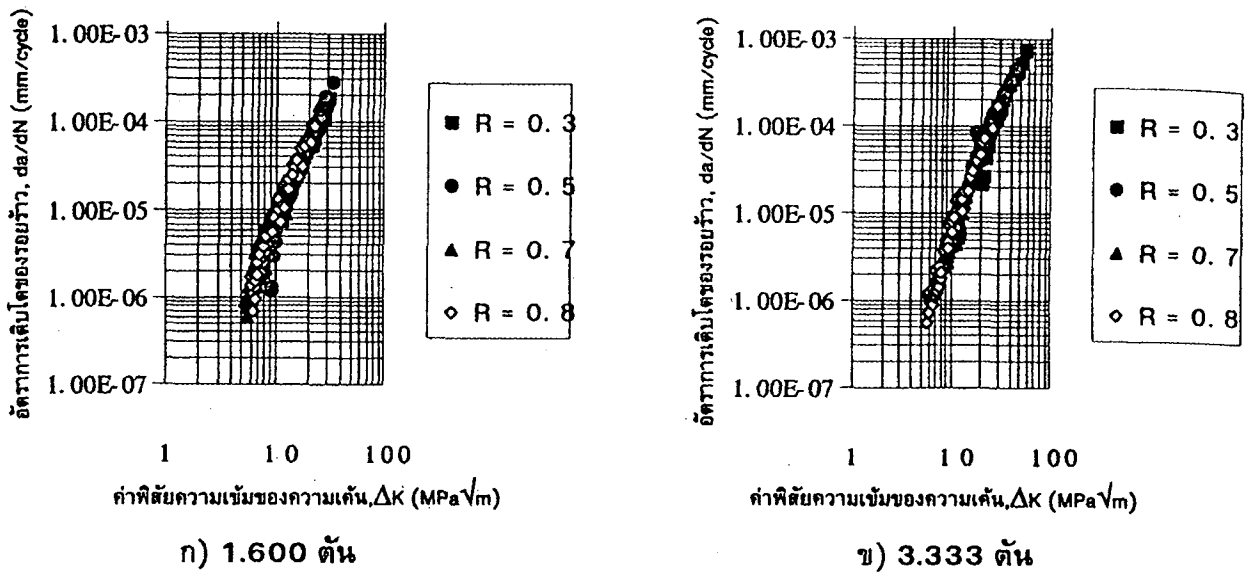
จากผลการทดสอบในช่วงอัตราส่วนภาระตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.8 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ ทั้งจากการทดสอบที่ขนาดของภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(รูปที่ 5ก) และ 3.333 ตัน(รูปที่ 5 ข)

3.3 สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว

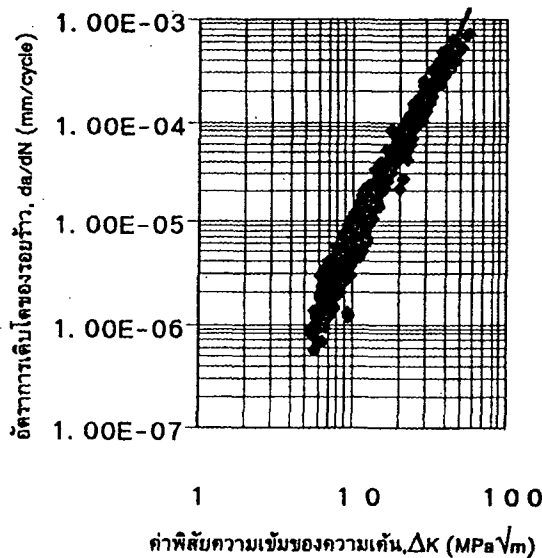
จากการที่พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ และภาระสูงสุด ทำให้จุดข้อมูลของทุก ๆ สภาวะทดสอบถูกนำมาแสดงบนแกนเดียวกัน(รูปที่ 6) และโดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดจะได้สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าเขียนได้อยู่ในรูป

$$da/dN = 5.32 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.06}$$

และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.98



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ 4140 ณ ค่าภาระสูงสุดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 6 แสดงจุดข้อมูลทดสอบของทุกสภาวะทดสอบ

เนื่องจากเส้นขอบเขตบน และเส้นขอบเขตล่างของจุดข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวมีความแตกต่างจากเส้นตรงอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดราว 2 เท่า ทำให้การนำเอาสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้ไปใช้คำนวณหาอายุความล้านั้นจำเป็นต้องชดเชยความไม่แน่นอนเนื่องจากความกระจัดกระจายของข้อมูลด้วยตัวประกอบความปลอดภัยประมาณ 2 อย่างไรก็ตามการคำนึงถึงความไม่แน่นอนของตัวแปรอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ภาระที่เกิดขึ้นจริง สมบัติวัสดุ หรือแม้แต่สภาพแวดล้อมทำงาน ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่เลือกใช้ควรมีค่ามากกว่า 2

บทสรุป

พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. ไม่ขึ้นกับภาระสูงสุดและอัตราส่วนภาระ นอกจากนี้เงื่อนไขของการกำหนดสภาวะทดสอบคือ มีอัตราส่วนภาระเท่ากับค่าอัตราส่วนภาระที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างจริง สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่ได้จากการทดสอบคือ $da/dN = 5.32(\Delta K)^{3.06}$ อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาถึงการกระจายของจุดข้อมูลทดสอบ และความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะใช้งานทำให้อายุความล้าที่คำนวณได้ควรถูกชดเชยด้วยตัวประกอบความปลอดภัยตั้งแต่ 2 ขึ้นไป

i. เอกสารอ้างอิง

- ASTM E 616-89. Standard Terminology Relating to Fracture Testing. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
- ASTM E 647-93. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
- Anderson, T.L. Fracture mechanics : Fundamentals and application. Boston : CRC Press Inc., 1991.
- Jowling, N.E. Mechanical behavior of engineering materials : Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. New Jersey: Prentice-Hall International Inc., 1993.
- Hudson, C.M. A root-mean square approach for predicting fatigue crack growth under random loading. In J.B. Wheeler, H.H. Hoersch, H.P. Mahy, and A.S. Kleinberg (eds) , Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading, ASTM STP 748, pp. 41-52. Philadelphia : American society for testing materials, 1981
- Salivar, G.C. Fatigue crack growth life prediction for a bolthole specimen under constant amplitude loading. Journal of Testing and Evaluation 12 No. 5 (1984) : 324-327
- Suresh, S. Fatigue of materials. UK. : Cambridge University Press, 1994.