# AMM062

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

# ผลกระทบของอัตราส่วนความเค้นต่อการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซึเรซิน Effect of stress ratio on fatigue crack growth of epoxy resin

อัมพรพล ธรรมฤาชุ และ ชาวสวน กาญจโนมัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12121 โทร 0-25643001-9 ต่อ 3150 โทรสาร 0-2564-3010 อีเมล์ kchao@engr.tu.ac.th

# บทคัดย่อ

ผลกระทบของคำอัตราส่วนความเค้น (*R*=σ<sub>min</sub>/σ<sub>max</sub>) ต่อการ ขยายตัวของรอยร้าวล้า (*da/dN*) ของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซิน ได้ถูก ศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่ *R*=0.1 และ *R*=0.4 เกิดภายใต้สภาพการครากขนาดเล็ก (small scale yielding) โดยปราศจากการสัมผัสของพื้นผิวรอยร้าว (crack closure) ∆*K* และ ∆*J* สามารถใช้อธิบาย *da/dN* ได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ∆*K da/dN* และ ∆*J* - *da/dN* ได้รับผลกระทบจาก *R* เนื่องจากพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบขึ้นกับเวลาของอิพอกซีเรซิน โดย *K<sub>max</sub>* เป็น พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักที่เหมาะสมในการอธิบาย *da/dN* โดย ไม่แสดงผลกระทบของ *R* 

#### Abstract

The influences of stress ratio (*R*-ratio) on FCG of thermoset epoxy resin with polyamine hardener were investigated. The fatigue crack growth rates (*da/dN*) were characterized by both linear elastic fracture mechanic parameter ( $\Delta K$ ) and elastic-plastic fracture mechanic parameter ( $\Delta J$ ). FCG at *R*=0.1 and *R*=0.4 were under small scale yielding condition without any crack closure.  $\Delta K$  and  $\Delta J$  could be used to characterize the *da/dN*, i.e. the FCG curve followed Paris's law. However, the effect of *R* level on FCG was observed. A time-dependent deformation behavior of epoxy resin was the cause of *R* effect. Under time-dependent deformation behavior,  $K_{max}$  was more appropriate fracture mechanic parameter to characterize *da/dN* for FCG of epoxy resin at *R*=0.1 and *R*=0.4, no *R* effect occurred.

# 1. บทนำ

อิพอกซีเรซินเป็นวัสดุที่มีการหดดัวน้อยภายหลังการบ่ม ดูดกลืน ความชิ้นน้อย ช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง (-25 ถึง 150°C) จึงถูกนำมาใช้ เป็นวัสดุหลักของวัสดุผสมพอลิเมอร์ [1-3] ในการใช้งานทั่วไปพอลิ-เมอร์วิศวกรรมอาจรับภาระวงรอบ (cyclic loading) โดยที่มีความไม่ ต่อเนื่องในชิ้นส่วนนั้น อาจทำให้เกิดรอยร้าวล้า และเกิดการขยายตัว ของรอยร้าวล้า เมื่อรอยร้าวล้าขยายตัวไปถึงจุดวิกฤต ชิ้นส่วน เครื่องจักรนั้นจะแตกหักทันที ความไม่ต่อเนื่องนี้อาจเกิดจากสิ่งเจือปน ระหว่างการผลิต รอยร้าวจากการใช้งาน หรือเป็นรูปทรงที่มีความ ซับซ้อน กราฟการขยายตัวของรอยร้าวล้า (fatigue crack growth, FCG) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก และ อัตราการขยายตัวของรอยร้าว (*da/dN*) สามารถนำมาใช้ทำนายอายุ การใช้งานชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่รับภาระวงรอบได้ ในกรณีวัสดุ ยึดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic material) ค่าพารามิเตอร์ตัวประกอบ ความเข้มข้นของความเค้น (stress intensity factor range, *ΔK*) สามารถใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า และในกรณีวัสดุที่มี พฤติกรรมยึดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic material) ค่าอัตรา การปล่อยพลังงานความเครียด (range of strain energy release rate, *ΔJ*) สามารถอธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า [4]

Ramsteiner และ Armbrust [5] ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าว ล้าของพอลิเมอร์ ABS (acrylonitrile butadiene styrene) และ PMMA (polymethyl methacrylate) โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบดึง (CT) และชิ้น ทดสอบแบบกดดัด (SENB) ด้วยอัตราส่วนความเค้น (stress ratio,  $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) 0.1 การขยายตัวของรอยร้าวล้าของพอลิเมอร์ทั้งสอง สามารถอธิบายด้วยค่า ⊿K และพบว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้าไม่ ขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นทดสอบ (CT และ SENB) หรือความถี่ (1 และ 10 Hz) Sadananda และ Vasudevan [6] ศึกษาการขยายตัวของรอย ร้าวล้าของพอลิเมอร์ PMMA และ polycast PMMA ภายใต้ค่า ้อัตราส่วนความเค้นต่างๆ พบว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้าเพิ่มขึ้นตาม ้ค่า K\_may เนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการของการคืบ โดย polycast PMMA แสดงความเสียหายจากกระบวนการของการล้ามากกว่า และมี ผลของกระบวนการของการคืบน้อยกว่าวัสดุ PMMA เนื่องจาก polycast PMMA มีความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวาง (crosslink density) สูง Fang และคณะ [7] ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัวของรอย ร้าวล้าของวัสดุผสมระหว่าง polycarbonate กับ ABS พบว่า ความสัมพันธ์ของ ⊿ห กับ da/dN ในช่วงระหว่างอัตราการขยายตัวของ รอยร้าวจากต่ำถึงสูง สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Paris พื้นผิวความ เสียหาย (fracture surface) แสดงลักษณะเป็นหลุม (dimple) โดยมี ความหยาบสูงที่อัตราการขยายตัวของรอยร้าวสูง และมีลักษณะเรียบที่ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่ำ โดยระหว่างการเปลี่ยนจากอัตราการ ขยายตัวของรอยร้าวต่ำไปเป็นอัตราการขยายตัวของรอยร้าวสูง จะ ปรากฏแถบการขยายตัว (stretched band)

โดยทั่วไปกลไกการแตกหักของวัสดุผสมอิพอกซี ขึ้นอยู่กับสาร เสริมแรง ขนาด รูปร่าง อัตราส่วนโดยปริมาตร พันธะระหว่างผิว การ เปลี่ยนเฟสของวัสดุ และคุณสมบัติเชิงกล (วัสดุหลักและสารเสริมแรง) [8-11] แต่มีการศึกษาจำนวนน้อยที่ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกการ ขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซินบริสุทธิ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะ ศึกษาการผลกระทบของของอัตราส่วนความเค้น (*R*=σ<sub>min</sub>/σ<sub>max</sub>) ที่มีต่อ การขยายตัวของรอยร้าว (*da/dN*) ของเทอร์โมเซตอิพอกซีเรซินที่ใช้ polyamine เป็นสารทำแข็ง โดยอัตรากรขยายตัวของรอยร้าวล้าถูก ศึกษาด้วยพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Δ*K*) และด้วยพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบอิลาสติกพลาสติก (Δ*J*)

# 2 วิธีการวิจัย

เทอร์โมเซตอีพอกซีเรซินได้รับการสนับสนุนจาก บริษัทไทยอิwอกซีแอนด์อัลลายโปรดักส์ โดยเรซินเป็น DGEBA (diglycidyl ethers bisphenol-A) และสารทำแข็งเป็น aliphatic amine ผสมกันด้วย อัตราส่วนโดยมวลของเรซินต่อสารทำแข็ง 100:35 และบ่มที่อุณหภูมิ ห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แข็งตัวเป็นแผ่นที่หนา 10 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำไปอบบ่มที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้เกิด ความแข็งแรงเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด สมบัติเชิงกลของอิพอกซี แสดงใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของอิพอกซีเรซิน							
Glass transition temperature (°C)	85						
Young's modulus (GPa)							
Yield stress (MPa)							
Tensile strength (MPa)	76						

ชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นแบบ CT ขึ้นรูปจากอิพอกซีเรซินแผ่นมีขนาด ตามรูปที่ 1 โดยออกแบบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM [12] รอย บาก (notch) สร้างจากเลื่อย และใบมีด โดยนำไปรับภาระวงรอบเพื่อให้ เกิดรอยร้าวล้าเริ่มต้น (initiation crack) การทดสอบการขยายตัวของ รอยร้าวล้า (fatigue crack growth test, FCG test) กระทำที่ 25°C และ ความชิ้นสัมพัทธ์ 60 % ด้วยเครื่องทดสอบการล้า Servo-hydraulic fatigue testing machine (Instron 8872 - 5 kN load cell) ตาม มาตรฐาน ASTM [12] แรงกระทำเป็นรูปฟังก์ชันไซน์ ความถี่ 10 Hz ศึกษาด้วยอัตราส่วนความเค้น (*R*) 0.1 และ 0.4 ความยาวรอยร้าว (*a*) วัดจาก traveling microscope ซึ่งมีความแม่นยำ 10 ไมครอน ระยะเปิด ที่ปากรอยร้าว (crack mouth displacement, CMD) ระหว่างการ ทดสอบวัดด้วยคลิปเกจ (clip gauge) ที่ติดตั้งที่ปากของรอยร้าวของชิ้น ทดสอบ CT และใช้ในการคำนวณหาระยะเคลื่อนตามแนวแรง (loadline displacement) โดยระบบการทดสอบการขยายด้วของรอยร้าวล้า แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 รูปทรงและขนาดของชิ้นทดสอบแบบ compact tension (CT specimen)



รูปที่ 2 การทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวล้า

ในกรณีที่ขนาดของบริเวณพลาสติก (plastic zone) ที่ปลายรอย ร้าวมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวรอยร้าว และบริเวณที่ยังไม่เกิด การร้าว (uncracked ligament) ค่า ⊿K อยู่ใต้สภาพการครากขนาดเล็ก (small scale yielding condition) และสามารถใช้ศึกษาการขยายตัว ของรอยร้าวล้าได้ โดย ⊿K สำหรับชิ้นทดสอบ CT สามารถคำนวณจาก สมการต่อไปนี้ [12]

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot f(\alpha) \tag{1}$$
$$f(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} \cdot \left(0.89 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4\right) \tag{2}$$

โดย ⊿κ คือ ผลต่างระหว่างแรงสูงที่สุดกับแรงต่ำที่สุดในแต่ละวงรอบ B, W และ a คือความหนา ความกว้าง และ ความยาวของรอยร้าว ตามลำดับ และ α คือ a/W

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

เนื่องจากอิพอกซีเรซินมีความเค้นครากต่ำ จึงอาจเกิดบริเวณ พลาสติก (plastic zone) ขนาดใหญ่ขึ้นที่ปลายของรอยร้าวระหว่างการ ขยายตัวของรอยร้าวล้าได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ารอยร้าวอยู่ภายใต้สภาพ การครากขนาดใหญ่ (large scale yielding) ในสภาพเช่นนี้อัตราการ ขยายตัวของรอยร้าวควรถูกอธิบายด้วย ∠J ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการต่อไปนี้ [13]

$$\Delta J = \frac{2A(1+\beta)}{Bb(1+\beta^2)}$$
(3)

$$\beta = 2\left[\left(a/b\right)^2 + \left(a/b\right) + 0.5\right]^{1/2} - 2\left[\left(a/b\right) + 0.5\right]$$
(4)

โดย A คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง (load-line displacement) และ *b* คือ *W-a* 



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง (load) และการเคลื่อนตัวตามแนวแรง (load-line displacement) (a) ที่ *R* = 0.1, ⊿*K* = 0.3 MPa.m<sup>1/2</sup> และ (b) ที่ *R* = 0.4, ⊿*K* = 0.2 MPa.m<sup>1/2</sup>

#### 3 ผลและการวิเคราะห์

การปิดของผิวรอยร้าว (crack closure) ส่งผลกระทบสำคัญต่อ พฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวล้า โดยเฉพาะที่ระดับอัตราการ ขยายตัวของรอยร้าวต่ำ หรือ ⊿K ต่ำ โดยต่ำแหน่งที่เกิดการปิดของ รอยร้าว สามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง อย่างไรก็ตาม ไม่พบการปิดตัวของรอยร้าวระหว่างการทดสอบอัตราการขยายตัวของ รอยร้าวล้า ที่อัตราส่วนความเค้น *R*=0.1 และ R=0.4 (รูปที่ 3 )

ความสัมพันธ์ระหว่าง ⊿K และ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า แสดงในรูปที่ 4 โดยอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่ R=0.4 มีค่าสูงกว่า ที่ค่า R=0.1 ความสัมพันธ์ระหว่างของ da/dN และ ⊿K เหนือช่วงอัตรา การขยายตัวของรอยร้าวต่ำ (da/dN >10<sup>-9</sup> m/cycle) สามารถแสดงได้ ดังสมการ

$$da/dN = C_1 \left(\Delta K\right)^{m_1} \tag{5}$$

โดย C, คือค่าคงที่ และ m, คือความชั้น โดยค่า C,และ m, ของการ ทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวล้าแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ⊿K และ da/dN

ระดับของ ⊿K ซึ่ง da/dN ต่ำ (ต่ำกว่า 10<sup>-9</sup> m/cycle) เรียก ⊿K<sub>m</sub> ซึ่งสามารถใช้แสดง ความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอย ร้าวในวัสดุได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่า ⊿K<sub>m</sub> ขึ้นกับ R โดย FCG ที่ R=0.1 มี ⊿K<sub>m</sub> สูงกว่า ⊿K<sub>m</sub> ที่ R=0.4 โดยสาเหตุของผลกระทบของ R ที่มีต่อ FCG อาจเกิดจากการปิดของพื้นผิวรอยร้าว (crack closure) แต่จากการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะเคลื่อนตัวตาม แนวแรงไม่พบการเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งแสดงว่าผลกระทบของ R ที่มีต่อ FCG ไม่ได้เกิดจากการปิดของพื้นผิวรอยร้าว

บริเวณพลาสติก (plastic zone) ที่ปลายรอยร้าวจะมีขนาดใหญ่ ขึ้นตามค่า *R* ที่เพิ่มขึ้น โดยบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่ส่งผลต่อความ เหมาะสมในการใช้ ⊿*K* อธิบาย *da/dN* โดยเงื่อนไขที่ ⊿*K* สามารถ อธิบาย *da/dN* แสดงได้ด้วยสมการ

$$a > 2.5 \left( K_{\text{max}} / \sigma_y \right)^2 \tag{6}$$

โดย  $\sigma_{p}$  คือความเค้นครากของวัสดุ ขนาดของบริเวณพลาสติกที่ คำนวณได้มีขนาดระหว่าง 0.21-0.51 มิลลิเมตร ในขณะที่รอยร้าวมี ขนาดระหว่าง 14.65 - 29.63 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารอยร้าว ขยายตัวในสภาพการครากขนาดเล็ก (small scale yielding) ดังนั้น ผลกระทบของค่า *R* ต่อ FCG ที่พบเป็นผลมาจากปัจจัยอื่น ซึ่งไม่ใช่ การปิดของพื้นผิวรอยร้าวและขนาดของบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่

R	$\Delta K_{th}$	$\Delta J_{th}$	$\Delta K_{crit}$	$\Delta J_{crit}$	$da/dN = C_1 \Delta K^{m1}$		$da/dN = C_2 \Delta J^{m^2}$	
	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(N/m)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(N/m)	$C_{l}$	$m_1$	$C_2$	$m_2$
0.1	0.30	20.04	0.46	56.34	0.01	12.96	3.90x10 <sup>-15</sup>	4.55
0.4	0.20	9.05	0.29	21.72	3.22	13.56	4.67x10 <sup>-14</sup>	4.83

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน

อิพอกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาด แบบยึดหยุ่นไม่เป็นเซิงเส้น [14] ผลกระทบของ R ต่อ da/dN อาจจะ เกิดเมื่อใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น ( $\Delta K$ ) อธิบาย da/dN ของวัสดุยึดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น ในสภาพเช่นนี้ พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบอิลาสติกพลาสติก ( $\Delta J$ ) อาจเป็น พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกว่าในการอธิบาย da/dN ความสัมพันธ์ ระหว่าง  $\Delta J$  และ da/dN ของ FCG ที่ R= 0.1 และ R=0.4 แสดง ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า FCG ขึ้นกับ R เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่าง da/dN และ  $\Delta K$  โดยความสัมพันธ์ระหว่าง da/dN และ  $\Delta J$  ที่เหนือ ช่วงอัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่ำ (da/dN > 10<sup>9</sup> m/cycle) แสดงได้ ด้วยสมการ

$$da/dN = C_2 \left(\Delta J\right)^{m_2} \tag{7}$$

โดย  $C_2$  คือค่าคงที่ และ  $m_2$  คือความชั้น ค่า  $C_2$  และ  $m_2$  แสดงในตาราง ที่ 2



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ∆J และ da/dN

เนื่องจากอิพอกซีเรซินมี glass transition temperature ประมาณ 85 C<sup>°</sup> (358 K) ซึ่งภายใต้อุณหภูมิห้อง (25+/-2 C<sup>°</sup> หรือ 298+/-2 K) อิพอกซีเรซินสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบขึ้นกับเวลา หรือ การคืบ (creep) ได้ ซึ่งการคืบจะเพิ่มขึ้นตาม *R* หรือ ความเค้นเฉลี่ย (mean stress) ของภาระแบบวงรอบ โดยในกรณีเช่นนี้ K<sub>max</sub> อาจเป็น พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกว่าในการอธิบาย da/dN ความสัมพันธ์ ระหว่าง K<sub>max</sub> และ da/dN ของ FCG ที่ *R*= 0.1 และ *R* = 0.4 แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่า FCG ไม่ขึ้นกับ *R* โดย FCG ที่ *R* = 0.1และ *R* =0.4 ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง K<sub>may</sub> และ da/dN

# 4 สรุป

ผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้น (*R*) ต่อการขยายตัวของ รอยร้าวล้า (*da/dN*) ของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซินสามารถสรุปได้ดังนี้

 การขยายตัวของรอยร้าวล้าที่ R=0.1 และ R=0.4 เกิดภายใต้สภาพ การครากขนาดเล็ก (small scale yielding) โดยปราศจากการสัมผัส ของพื้นผิวรอยร้าว (crack closure)

 ∠K และ ∠J สามารถใช้อธิบาย da/dN ได้ แต่พบว่า R มีผลต่อการ ขยายตัวของรอยร้าวล้า เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาด แบบขึ้นกับเวลาของอิพอกซีเรซิน

 K<sub>max</sub> เป็นพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักที่เหมาะสม ในการ อธิบาย da/dN โดยไม่แสดงผลกระทบของ R

# กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คำแนะนำและการสนับสนุนจาก บริษัท ไทยอิพอกซีแอนด์อัลลายโปรดักส์ (TEC) สำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

#### เอกสารอ้างอิง

- Crawford, R.J., Plastics Engineering. 3 ed. 1998, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Margolis, J.M., Advanced Thermoset Composites Industrial and Commercial Applications. 1985, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Mills, N.J., Plastics: Microstructure and Engineering. 2 ed. 1993, London: Arnold.
- Dowling, N.E., Mechanical behavior of materiasl: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 1993, New Jersey: Prentice-Hall International.
- Ramsteiner, F. and T. Armbrust, Fatigue crack growth in polymers. Polymer Testing, 2001. 20(3): p. 321-327.
- Sadananda, K. and A.K. Vasudevan, Analysis of fatigue crack growth behavior in polymers using the unified approach. Materials Science and Engineering A, 2004. 387-389(1-2 SPEC. ISS.): p. 536-541.
- Fang, Q.Z., T.J. Wang, and H.M. Li, 'Tail' phenomenon and fatigue crack propagation of PC/ABS alloy. Polymer Degradation and Stability, 2008. 93(1): p. 281-290.
- Matthews, F.L. and R.D. Rawlings, Composite Materials: Engineering and Science. 1994, London: Chapman & Hall.
- Araki, W., T. Adachi, and A. Yamaji, Time-temperature dependences of fracture toughnesses of epoxy resin and silica particulate-filled epoxy composite. Materials Science Forum, 2003. 426-432(3): p. 1985-1990.
- Lee, D.-B., et al., Damage zone around crack tip and fracture toughness of rubber-modified epoxy resin under mixed-mode conditions. Engineering Fracture Mechanics, 2002. 69(12): p. 1363-1375.
- Kim, H.S. and M.A. Khamis, Fracture and impact behaviours of hollow micro-sphere/epoxy resin composites. Composites
  Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001. 32(9): p. 1311-1317.
- ASTM E647-95a: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, in Annual Book of ASTM Standards. 1996.
- Clarke, G.A. and J.D. Landes, Evaluation of the J integral for the compact specimen. Journal of Testing and Evaluation, 1979. 7(5): p. 264-269.
- Prosser, W.H., Ultrasonic characterization of the nonlinear elastic properties of unidirectional graphite/epoxy composites, in NASA Contractor Reports. 1988.