

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งต้านทานแรงอัดและการกัดกร่อนได้ดี มีการดูดกลืนความชื้นและหดตัวน้อย อุณหภูมิใช้งานกว้าง (-25 ถึง 150 °C) และมีโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นวงของอีพอกซี (epoxy ring) [1] สามารถยึดเกาะวัสดุเพิ่มความแข็งแรง เช่น ใยแก้ว และใยคาร์บอนได้ดี จึงถูกนำมาใช้ทำวัสดุผสม (composite material) [1] และใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลาย เช่น เคลือบผิวชิ้นส่วนยานยนต์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์กีฬา และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น โดยตัวอย่างการใช้งานอีพอกซีเรซิน แสดงดังภาพที่ 1.1

ในการใช้งานทั่วไปพอลิเมอร์วิศวกรรมต้องรับภาระวงรอบกระทำซ้ำไปซ้ำมา ส่งผลให้เกิดการสะสมของตำหนิระดับจุลภาค รอยร้าว การขยายตัวของรอยร้าว และการแตกหักในที่สุด โดยความเสียหายเช่นนี้ เรียกว่า การล้า (fatigue) ในแต่ละปีมีความเสียหายจากการล้าคิดเป็นมูลค่าสูงถึงร้อยละ 90 ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เกิดความเสียหาย [2] กลไกการล้าแบ่งออกเป็น 2 กลไก คือ การเกิดของรอยร้าวล้า และการขยายตัวของรอยร้าวล้า [2] การล้ามีความสำคัญในเชิงวิศวกรรม เนื่องจากสามารถเกิดได้ที่ความเค้นต่ำกว่าความเค้นคราก (yield stress) การศึกษาการล้าสามารถศึกษาได้จากวัสดุที่มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน โดยให้ภาระแบบวงรอบจนกระทั่งเกิดการแตกหัก จำนวนรอบภาระที่ทำให้เกิดการแตกหักสุดท้าย เรียกว่า อายุการล้า (fatigue life) โดยการศึกษาแบบนี้ได้รวมขั้นตอนการเกิดขึ้นของรอยร้าวล้า และการขยายตัวของรอยร้าวล้าเข้าไว้ด้วยกัน นอกจากนี้ การศึกษาการล้าสามารถศึกษาจากวัสดุที่มีรอยร้าวเริ่มต้น โดยตรวจวัดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า การศึกษาแบบนี้ สนใจเฉพาะขั้นตอนการขยายตัวของรอยร้าวล้า [2, 3] อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าขึ้นกับ พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก โดยพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics parameter) พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear-elastic fracture mechanics parameter) และ พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (time-dependent fracture mechanics parameter)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1.1

การใช้งานอีพอกซีเรซิน

(ก) โครงสร้างของรถแข่ง [www.wired.com]

(ข) ชิ้นส่วนของเครื่องบิน [www.pilotfriend.com]

โดยทั่วไปการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอีพอกซีที่เติมอนุภาค และเส้นใยเสริมความแข็งแรง ขึ้นอยู่กับสารเสริมแรง (ขนาด รูปร่าง สัดส่วนโดยปริมาตร) พันธะระหว่างผิว การเปลี่ยนเฟสของวัสดุ และคุณสมบัติเชิงกล (วัสดุหลักและสารเสริมแรง) [4-10] แต่การศึกษาจำนวนน้อยที่ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ ได้ใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าของโพลีเมอร์ และวัสดุผสมโพลีเมอร์ [11, 12] โดยไม่ได้มีการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบขึ้นกับเวลา (time-dependent deformation) หรือการคืบ (creep) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในโพลีเมอร์ และวัสดุผสมโพลีเมอร์ [13-16]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความเค้น ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าว (da/dN) ของเทอร์โมเซตอีพอกซีเรซินชนิด bisphenol-A ที่ใช้พอลิเอมีน (polyamine) เป็นสารทำแข็ง (hardener) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าถูกศึกษาด้วย พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ΔK) พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (ΔJ) และพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (C^*) ผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและกำหนดเกณฑ์การใช้งาน เพื่อลดอันตรายจากการล้าได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการคืบของอิพอกซีเรซิน
- 1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมและกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน
- 1.2.3 ศึกษาพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักสำหรับการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน
- 1.2.4 สร้างฐานข้อมูลในการใช้ทำนายการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.3.1 สมบัติทางกลของอิพอกซีเรซิน
- 1.3.2 ความเข้าใจเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักในรูปแบบต่าง ๆ
- 1.3.3 ความเข้าใจถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน
- 1.3.4 ความเข้าใจกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าภายใต้สภาพผสมระหว่างการล้าและการคืบ
- 1.3.5 ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากการล้า เพื่อการประหยัดในเชิงอุตสาหกรรม และเศรษฐกิจ

1.4 ขอบเขตในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของอีพอกซีเรซินชนิด bisphenol-A ที่ใช้พอลิเอมีนเป็นสารทำแข็ง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ ศึกษาการคืบ และศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวลำของอีพอกซีเรซิน

การศึกษาการคืบของอีพอกซีเรซิน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ศึกษาในช่วง 0.7 - 0.85 ของความเค้นคราก ค่าเลขชี้กำลังการคืบ (creep exponent) ในช่วงการคืบปฐมภูมิ และ การคืบทุติยภูมิ ได้ถูกคำนวณ และใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (C^*)

การศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวลำของอีพอกซีเรซิน กระทำภายใต้สภาพความเครียดระนาบ (plain strain) ภาระเป็นรูปแบบไซน์ (sine waveform) ความถี่ 10 Hz และอัตราส่วนความเค้น 0.1, 0.4 และ 0.7 โดยใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ΔK) และพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (ΔJ) อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวลำ (da/dN) ในขณะที่พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (C^*) ถูกใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt) นอกจากนี้พฤติกรรมและกลไกการแตกหัก ได้ถูกศึกษาจากพื้นผิวการแตกหัก เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์และอธิบายกลไกการขยายตัวของรอยร้าวลำ

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาสมบัติทางกล ความต้านทานการแตกหัก และกลไกการขยายตัวของรอยร้าวลำ ของวัสดุพอลิเมอร์หลายประเภท แต่มีผลงานส่วนน้อยที่ศึกษาสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์และวัสดุผสมพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ สมบัติทางกล ความต้านทานการแตกหัก การคืบ และการล้า

1.5.1 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์

Bastida และคณะ [4] ได้ศึกษาถึงค่าของมอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ใน polycarbonate (PC) และ polyether imide (PEI) จากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความหนาต่างกัน (0.1-2 มม.) พบว่าค่าของมอดูลัสของความยืดหยุ่น จะมีค่าที่ลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ในทุกช่วงความหนา เนื่องจากผลกระทบของสภาพความเครียดแบบระนาบ (plane strain) ในชั้นทดสอบหนา

Brunner และคณะ [5] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่แพร่กระจายในอีพอกซีที่มีต่อค่าความทนทานการแตกหัก และเพื่อปรับปรุงค่าความเค้นครากให้ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่า การเติมซิลิกาลงไปจะทำให้ค่าความเค้นครากดีขึ้น สำหรับชั้นที่มีเส้นใยผสมอยู่ เมื่อเทียบกับชั้นที่มีแต่อีพอกซี ค่าความทนทานการแตกหักจะปรับปรุงได้ดีขึ้นประมาณร้อยละ 50 และอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (energy release rate) จะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 สำหรับการเพิ่มปริมาณซิลิกาขึ้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

Qi และคณะ [6] ได้ศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่ง (nanoclay) ชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของ DGEBA อีพอกซีเรซิน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น ค่าของคุณสมบัติเชิงกลจะดีขึ้น เช่นเดียวกับค่าความทนทานการแตกหักที่ดีขึ้นเช่นกัน

1.5.2 ความต้านทานการแตกหักของพอลิเมอร์

Low และ Mai [7] ได้ศึกษาถึงกลไกความเสียหายของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ และอีพอกซีเรซินเสริมความแข็งแรงด้วยยาง ภายใต้อัตราความเครียด (strain rate) 10^{-6} ถึง 10^2 วินาที⁻¹ และอุณหภูมิ -80°C ถึง 60°C พบว่ากลไกการขยายตัวของปลายรอยร้าวจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (plastic-induced crack blunting mechanism) ส่งผลให้ค่าวิกฤติของอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (critical strain energy release rate; G_{IC}) ลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

Gensler และคณะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของ ไอโซสแตติก พอลิโพรพิลีน (isostatic polypropylene) ภายใต้อัตราการกระ 0.1 มม./วินาที ถึง 14 ม./วินาที พบว่าพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุเปลี่ยนจากพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียวไปเป็นวัสดุเปราะเมื่อ อัตราการกระสูงขึ้น โดยกลไกการฉีกเป็นกลไกความเสียหายหลักที่อัตราการกระต่ำ ในขณะที่การเกิด ช่องว่างจำนวนมากบริเวณส่วนปลายของรอยร้าว (multiple crazing) เป็นกลไกความเสียหาย หลักที่อัตราการกระปานกลาง และการเกิดช่องว่างเดี่ยวบริเวณส่วนปลายของรอยร้าว (single crazing) เป็นกลไกความเสียหายหลักที่อัตราการกระสูง

Kanchanomai และคณะ [9] ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราการกระที่มีผลต่อพฤติกรรมการและกลไกการแตกหักของอิพอกซีเรซินที่ อัตราการกระในช่วง 10^{-1} - 10^{-3} มม./นาที่ ความหนา 3-10 มม.โดยอาศัยวิธีการตัดสามจุด พบว่าที่อัตราการกระต่ำ และความหนาต่ำ อิพอกซีเรซินแสดง สภาพความเค้นระนาบ ในขณะที่อัตราการกระสูง และความหนาสูง อิพอกซีเรซินแสดงสภาพ ความเครียดระนาบ และค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าต่ำที่สุดภายใต้สภาพความเครียด ระนาบ

Wetzel และคณะ [10] ได้ศึกษาวัสดุผสม epoxy nanocomposites มีอิพอกซีเรซิน เป็น วัสดุหลักและเติมอนุภาคนาโน (nanoparticle) ของ TiO_2 กับ Al_2O_3 เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทางกล พบว่าค่าความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) หรือ K_{IC} เพิ่มขึ้นตามความ เข้มข้นของอนุภาคที่เติมเข้าไป นอกจากนี้การเติม Al_2O_3 ส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะ คล้ายแก้ว สูงขึ้นกว่าเติม TiO_2 และการเติม Al_2O_3 ส่งผลให้วัสดุผสมอิพอกซีเรซิน มีความต้านทาน การล้าเพิ่มขึ้น หรือรอยร้าวขยายตัวได้ยากขึ้น

1.5.3 การคืบของพอลิเมอร์และวัสดุผสม

Al-Haik และคณะ [13] ได้ศึกษาการคืบของวัสดุผสม โดยมี thixotropic epoxy เป็น วัสดุหลัก ทำการศึกษาด้วยวิธีการผ่อนคลายของภาระ (load relaxation) โดยมีแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ประกอบ จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเมื่อเพิ่มความเค้นจะทำให้อัตรา ความเครียดวิสโคพลาสติก (viscoplastic strain) เพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้ สูงเข้าใกล้อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว ค่าคงที่ A ของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้น (A คือค่าที่ อยู่ในสมการความเครียดแบบพลาสติก $\epsilon_p = A\sigma^v$) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการคืบใน ระยะสั้น (ไม่เกิน 3600 วินาที) กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธี รุงเงอ-คุททา

อันดับสี่ (fourth order Runge-Kutta) ผสมกับวิธีแบ่งครึ่งช่วง (bisection) พบว่าที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษามีค่าเท่ากันทั้งการทดสอบและการคำนวณจากแบบจำลอง แต่ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น แบบจำลองจะให้ค่าที่มากกว่าค่าจริงอยู่ประมาณร้อยละ 15-20 จึงต้องระมัดระวังในการใช้แบบจำลองในกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบค่าเลขชี้กำลังการคืบของวัสดุผสม thixotropic epoxy มีค่าประมาณ 2.741

Al-Haik และคณะ [14, 15] ได้ศึกษาแบบจำลองวิโคพลาสติกของวัสดุผสม carbon-fiber/aeropoxy พบว่าค่ามอดุลัสและความแข็งแรง ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการคืบ สมบัติทางกลทั้งสองลดลงครึ่งหนึ่งที่อุณหภูมิ 75°C การศึกษาในครั้งนี้เลขชี้กำลังการคืบมีค่าประมาณ 1.370

1.5.4 การล้าของพอลิเมอร์และวัสดุผสม

Ramsteiner และ Armbrust [11] ได้ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้าของพอลิเมทิลเมทาครายเลท (poly methyl metha crylate; PMMA) และ อะคริลิโลไนไตร์บิวตาไดอีนส์ไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene; ABS) ภายใต้อัตราส่วนความเค้น เท่ากับ 0.1 โดย PMMA ใช้ขึ้นทดสอบแบบ CT specimen และ SENB specimen พบว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้ามีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่ารูปทรงที่ทดสอบไม่มีผล ทำการศึกษา ABS ที่ผสมอนุภาคยาง (modified rubber particles) ที่ต่างกัน พบว่าค่าการขยายตัวของรอยร้าวล้ามีค่าแตกต่างกัน และยังศึกษาผลกระทบของความถี่ใน PMMA โดยใช้ความถี่ 1 Hz และ 10 Hz พบว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้ามีค่าใกล้เคียงกัน

Huang และ Moan [17] ได้ศึกษาแบบจำลองผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวของโลหะชนิดต่างๆ ได้แก่ Ti 6Al 4V, Al 6013, อลูมิเนียมอัลลอย (aluminum alloy) เหล็กกล้า (steels) CrMoV และ umidet 720 super alloy ด้วยแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับปรุง ผลการศึกษาที่ค่า K_{max} คงที่พบว่าเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความเค้นแล้วอัตราการขยายรอยร้าวจะสูงขึ้น และที่อัตราส่วนความเค้นที่เป็นลบ อัตราการขยายรอยร้าวมีแนวโน้มลดลง

El-shabasy และ Lewandowski [18] ได้ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้าของโลหะ pearlitic steel ด้วยวิธีกัดตัดแบบสามจุด ที่อุณหภูมิ -125°C ที่ค่าอัตราส่วนความเค้นต่างกันคือ 0.1, 0.4 และ 0.7 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความเค้นจะทำให้รอยร้าวขยายตัวได้เร็วขึ้น ค่าความชันของกราฟอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในช่วง Paris มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความเค้น และมีค่าความชันเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิจาก 25°C เป็น -125°C

Zhao และคณะ [19] ได้ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้าของโลหะเชื่อม 95Pb-5Sn โดยใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักอธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าว ดังนี้ ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (ΔK) พิสัยอัตราการปล่อยพลังงานความเครียด (ΔU) และอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง (C^*) จากการศึกษาพบว่า ในการศึกษาที่ความถี่ถึงที่ 10 Hz ค่าอัตราส่วนความเค้นไม่มีผลต่อการขยายตัวของรอยร้าวล้าโดยรอยร้าวขยายตัวเป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา โดยไม่เกิดกลไกการปิดตัวของรอยร้าว แต่เมื่อศึกษาที่ค่าอัตราส่วนความเค้นคงที่เป็น 0.1 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่ลดลง พฤติกรรมการแตกหักเปลี่ยนจากความเสียหายในเกรน (transgranular) เป็นแบบความเสียหายที่ขอบเกรน (intergranular) ตามความถี่ที่ลดลง การขยายตัวของรอยร้าวล้าภายใต้ความถี่ 0.01 Hz เป็นแบบความเสียหายที่ขอบเกรนเป็นหลัก และเป็นกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา ขณะที่ภายใต้ความถี่ 1 Hz และ 0.1 Hz เป็นแบบผสมกันระหว่างความเสียหายในเกรนกับความเสียหายที่ขอบเกรนและเป็นกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ อีกทั้งพบว่า 95Pb-5Sn มีการเกิดผลึกใหม่พลวัต (dynamic recrystallization) ขึ้นในระหว่างการขยายตัวของรอยร้าวล้า เกรนเริ่มต้นมีขนาดประมาณ 50-100 ไมครอน (μm) ลดลงเหลือประมาณ 10-15 ไมครอน หลังจากการทดลอง

Mutoh และคณะ [20] ได้ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวล้าของโลหะเชื่อมที่มีและไม่มีตะกั่ว หลายชนิด โดยใช้ความถี่และอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายกลไกการขยายตัวของรอยร้าวล้าคือ ΔK , ΔU และ C^* พบว่า พฤติกรรมที่ขึ้นกับจำนวนรอบจะเด่นชัดที่อัตราส่วนความเค้นต่ำและความถี่สูง ขณะที่พฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาจะเด่นชัดที่อัตราส่วนความเค้นสูงและความถี่ต่ำ ภายใต้สภาพการทดสอบที่ขึ้นกับจำนวนรอบโลหะเชื่อมที่มีตะกั่วจะมีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่สูงกว่าโลหะเชื่อมที่ไม่มีตะกั่ว ความแตกต่างจะชัดเจนที่บริเวณอัตราการขยายตัวของร้าวต่ำ (threshold regime) และความแตกต่างจะลดลงเมื่อค่า ΔU เพิ่มขึ้น

ภายใต้สภาพการทดสอบที่ขึ้นอยู่กับเวลากลับพบว่าไม่มีความแตกต่างของอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในโลหะเชื่อมทั้งสองแบบ รอยร้าวจะเริ่มต้นขยายตัวจากในเกรน (transgranular) ภายใต้สภาพที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ รูปถ่ายผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบภายใต้สภาพที่ขึ้นกับเวลา แสดงการแตกหักแบบผสมระหว่างความเสียหายในเกรนและที่ขอบเกรนหรือ dominant intergranular เส้นทางการขยายตัวของรอยร้าวตามขอบเขตเกรนขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมแต่ละชนิด มีการก่อตัวขึ้นของเกรนขนาดเล็กในวัสดุหลักดีบุก (Sn matrix) ของวัสดุผสม 63Sn-37Pb และ Sn-3.5Ag เนื่องจากการเกิดขึ้นของเกรนย่อย (subgrain formation) และมีการก่อตัวขึ้นของเกรนขนาดเล็กในวัสดุหลักตะกั่ว (Pb matrix) ของวัสดุผสม 95Pb-5Sn เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization)