บทที่ 7

ข้อสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนภาระต่อการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440 โดยวิธีการและขั้นตอนการทดสอบได้ดำเนินตามคำแนะนำและข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E647-05[2] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีการระบุถึงรายละเอียดการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในช่วงแรกของการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้า และจากการทดสอบได้เก็บข้อมูลขนาดภาระ จำนวนรอบ (N) และขนาดความยาวรอยร้าวเติบโตทั้งสองด้านที่ได้จากการทดสอบ และจากการประมวลผลสามารถสรุปผลการทดสอบ ข้อเสนอแนะ และงานวิจัยต่อเนื่องสำหรับผู้ที่ให้ความสนใจจะทำการศึกษาต่อไปดังต่อไปนี้

7.1 ข้อสรุปงานวิจัย

1. จากการทดสอบชิ้นเหล็กกล้า JIS SCM 440 ที่อัตราส่วนภาระแตกต่างกัน (R = 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7) ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขละ 3 ชิ้น เพื่อหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN) และจากการทดสอบพบว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าโดยรวมเกิดขึ้นในช่วง $da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-5}\, mm./cycle$ เส้นกราฟที่ประมวลผลได้มีลักษณะสูงชัน และเป็นช่วงแรกของการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์โดยแสดงเป็นเส้นกราฟแบบ log-log สเกล ระหว่าง (da/dN) กับ ΔK สำหรับการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ(R)หนึ่งค่า ลักษณะเส้นกราฟที่แสดงผลได้บ่งบอกถึงพฤติกรรมของอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าเกิดการหักเหและลดต่ำลงของเส้นทางการเติบโตของรอยร้าวที่ $da/dN = 10^{-6}\, mm./cycle$ จนเกิดเป็นเส้นโค้งบริเวณกึ่งกลางซึ่งมีการเติบโตของรอยร้าวที่ช้าลงอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปรับลดภาระลงทุกๆ ช่วงของการเติบโตรอยร้าวทำให้จำนวนรอบ (N) ภาระกระทำเพิ่มสูงขึ้นและแสดงพฤติกรรมการหักเหและลดต่ำลงของเส้นทางการเติบโตของรอยร้าวให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อทำการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ(R)เพิ่มสูงขึ้น

2. สำหรับเหล็กกล้า JIS SCM 440 อัตราส่วนภาระ(R)มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN) และพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) เมื่อทำการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ(R) ต่างๆ กัน (R = 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7) โดยการทดสอบเป็นแบบลด K พบว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN)ให้ค่า ΔK ลดต่ำลงทุกๆ การปรับลดภาระก่อนหน้าจนสิ้นสุดกระบวนการทดสอบสำหรับหนึ่งอัตราส่วนภาระ(R)หนึ่งค่า และ ΔK ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ΔK_{th} ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าที่ $da/dN = 10^{-7}\ mm./cycle$ และผลจากการทำการทดสอบซ้ำภายใต้เงื่อนไขละ 3 ชิ้นเหล็กกล้าทดสอบให้ผล ΔK ต่ำสุดเฉลี่ยที่ 12.158, 9.640, 6.726 และ 4.073 $MPa\sqrt{m}$ ตามลำดับ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์โดยแสดงเป็นเส้นกราฟแบบ log-log สเกล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (da/dN) กับ ΔK ที่อัตราส่วนภาระ(R)ต่างกัน พบว่าเมื่อทดสอบที่อัตราส่วนภาระ(R) เพิ่มสูงขึ้น ΔK มีแนวโน้มลดต่ำลง

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ภายใต้แนวทางของมาตรฐานการทดสอบ ASTM E647-05 [2] พบว่าปัญหาส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการผลิตชิ้นเหล็กกล้าทดสอบและการดำเนินการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการทดสอบโดยการประมวลผลแสดงได้ดังบทที่ 5 ล้วนทำให้เกิดประสบการณ์ที่เกิดจากการทำการทดสอบทั้งสิ้น ซึ่งผู้ทำวิจัยจะขอแนะนำและให้ข้อพิจารณาในขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยที่จะผลิตงานวิจัยที่เนื่องและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการผลิตชิ้นเหล็กกล้าทดสอบไปจนถึงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบไปตามลำดับ

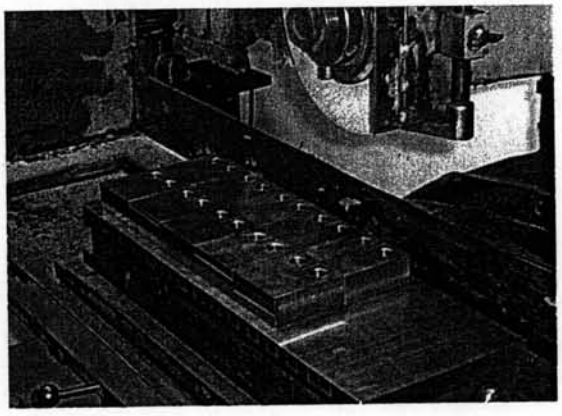
1. ประสบการณ์ที่เกี่ยวกับการเตรียมชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ

สำหรับในส่วนของการเตรียมชิ้นเหล็กกล้าทดสอบโดยเลือกพิจารณาจากเหล็กกล้าในมาตรฐาน JIS SCM 440 ส่วนสาเหตุในการเลือกที่จะศึกษาเหล็กกล้าชนิดนี้เพราะต้องการขยายฐานข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า

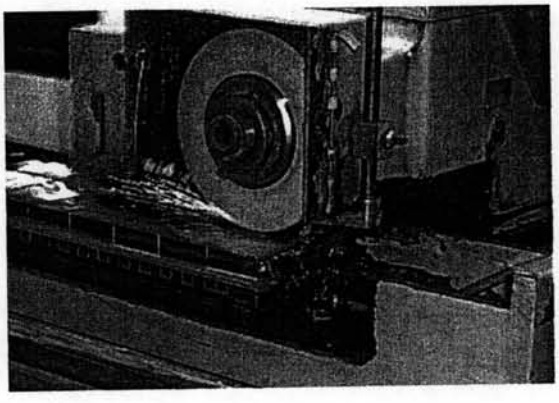
สำหรับเหล็กกล้า JIS SCM 440 ซึ่งในภาวะปัจจุบันที่ผู้วิจัยกำลังดำเนินการวิจัยอยู่เป็นเหล็กกล้าที่กำลังได้รับความนิยมในการเลือกนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนกลกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีราคาถูก และหาซื้อได้ที่ บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด

2. คำแนะนำเกี่ยวกับการผลิตและตกแต่งชิ้นเหล็กกล้าทดสอบตลอดจนการเก็บรักษา

การผลิตและตกแต่งชิ้นเหล็กกล้าทดสอบให้ได้ขนาดตามที่ได้คำนวณจากมาตรฐาน ASTM E647-05[2] เมื่อนำไปผลิตควรมีค่าของระยะเผื่อ หรือ ตามศัพท์ช่างจะเรียกว่า ค่าบวกลบ ซึ่งในส่วนนี้ถ้าจะพิจารณากันถึงความละเอียดและความถูกต้องของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่มีทศนิยม 3 ตำแหน่ง ในทางปฏิบัติมักทำได้ยากสำหรับผู้ผลิตที่มีเครื่องมือที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งในส่วนนี้เองผู้วิจัยได้ประสบมาซึ่งจะขอยกตัวอย่างและเป็นข้อพิจารณาได้อย่างดี เช่น ในกรณีของการเจาะรูร้อยสลักถ้าหากทำการเจาะรูบนชิ้นเหล็กกล้า หรือทำรูร้อยสลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.00 มม. ด้วยเครื่องเจาะแบบตั้งฐานแบบธรรมดาจะพบว่าเมื่อนำไปวัดด้วยเวอร์เนียร์ที่แท่นระดับ จะพบว่ารูเจาะทั้งสองรูบนชิ้นงานเกิดการเยื้องศูนย์ถึง 1 มม. (ขณะทำการวัดต้องสอดสลักที่กลึงได้ขนาดแล้ว) ด้วยเหตุผลนี้เองที่ผู้วิจัยคิดว่าเป็นสาเหตุและมีส่วนทำให้เกิดการ misalignment ซึ่งส่งผลให้การเติบโตของรอยร้าวทั้งสองด้าน (ด้านหน้าและด้านหลังของรอยร้าวยาวไม่เท่ากันเกินขอบเขตตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ในขณะทำการทดสอบ) นอกจากนี้ในส่วนของการเจียรและขัดผิวต้องกำชับให้ผู้ผลิตต้องเจียรในทิศทางที่ตั้งฉากกับรอยบากกลและในขั้นตอนนี้ควรทำก่อนการสร้างรอยบากกลด้วยเครื่อง EDM และทำการขัดผิวในลำดับสุดท้าย และเมื่อชิ้นเหล็กกล้าเสร็จแล้วควรทำการตรวจวัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้อีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นควรทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบเพื่อขจัดคราบไคลจากเหงื่อที่ติดมาในระหว่างการผลิตให้สะอาดก่อนเก็บในกล่องพลาสติกที่ป้องกันอากาศเข้าเพื่อไม่ให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น การเตรียมชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ การผลิตควรทำในคราวเดียวกันกับผู้ผลิตรายเดียวกันเพื่อป้องกันและลดทอนความผิดพลาดที่เกิดจากการผิดขนาดของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ



ก)



ข)

รูปที่ 7.1 การผลิตและตกแต่งขัดผิวกระทำในคราวเดียวกันทั้งหมด

ก) ทิศทางการวางชิ้นเหล็กกล้าทดสอบเพื่อขัดผิวกระทำในคราวเดียวกัน

ข) ทิศทางการเจียรขัดผิวในทิศทางตั้งฉากกับรอยบากทางกล

3. คำแนะนำเกี่ยวกับการเตรียมสลัก

ตามที่มาตรฐานระบุไว้เป็นเหล็กกล้า AISI 4340 นอกจากนี้ยังสามารถใช้เหล็กกล้าที่มาตรฐานเทียบเคียงได้ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกลที่มีคุณสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกันหรือมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าซึ่งมีอยู่หลายมาตรฐาน เช่น อาจใช้เป็นมาตรฐาน SCN 439 จากผู้ผลิต ญี่ปุ่น ในนามบริษัท Hitachi หรือ บริษัท Nippon Koshuha ซึ่งใช้มาตรฐานเดียวกัน นอกจากนี้ยังหาซื้อได้ง่าย

ในด้านของระยะเผื่อ (Clearance) ไม่ควรให้ระยะเผื่อกับรูร้อยสลักของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบและ grip device มากเกินไป เพราะถ้าหากมีค่าระยะ Clearance มากจะก่อให้เกิดเสียงดังและเกิดการกระชากของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบกับสลักในระหว่างการทดสอบจะเป็นผลทำให้อายุความล้าของสลักลดลง

4. ในขั้นตอนของการเริ่มกระบวนการทดสอบสำหรับผู้วิจัยขอแสดงความคิดเห็นว่าในช่วงแรกไม่ควรเริ่มจากสภาวะที่สูงจนเกินไปนักเพราะผลเสียที่ติดตามมาจะยากจนเกินควบคุมและอาจจะส่งผลให้ชิ้นเหล็กกล้าทดสอบดังกล่าวนั้นเสียหายจนใช้การไม่ได้ ถึงแม้มาตรฐานจะระบุไว้ในขั้นตอนของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าซึ่งกระทำต่อจากปลายรอยบากกล ทั้งนี้ยอมให้ใช้ภาระโหลดที่สูงได้เพื่อย่นระยะเวลาในขั้นตอนของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้า

ในส่วนของผลเสียคือ เมื่อใช้ภาระโหลดกระทำเริ่มแรกที่สูงมากๆ สิ่งที่ตามมา คือ ระดับความรุนแรงของการเติบโตของรอยร้าว ณ ปลายรอยร้าว(crack tip)ก็จะสูงตามไปด้วย และอาจส่งผลให้เส้นทางการเติบโตรอยร้าวไม่เติบโตในทิศทางที่ควรจะเป็น กล่าวคือ เส้นทางการเติบโตของรอยร้าวแรกเริ่มมีการเติบโตที่มากกว่า 20 องศา ซึ่งตามมาตรฐานถือเป็นข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง(invalid) ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทดลองที่ภาระโหลดสูงสุด (P_{max}) ที่ 5.00 ตัน และ ภาระโหลดต่ำสุด (P_{min}) ที่ 1.30 ตัน (ภาระโหลดสูงสุดเป็นสองเท่าของภาระที่ทำการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าที่ใช้ในการทดสอบ) การทดสอบพบว่าการเติบโตรอยร้าวเกิดขึ้นที่ปลายรอยบากกลในทิศทาง 28 - 30 องศา ที่จำนวนรอบ 403,507 รอบ และผลต่างของการเติบโตรอยร้าวด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบอยู่ที่ 6.27 มม. ซึ่งในส่วนเองนี้ผู้วิจัยคิดว่าเป็นผลต่างความยาวรอยร้าวที่สูงมาก เนื่องจากการทดสอบที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่เป็นการทดสอบแบบต่อเนื่องไม่สามารถใช้แนวทางการถอดและทำการกลับด้านของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบเพื่อให้รอยร้ายได้เติบโตได้เท่าทันกัน ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาและทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความยาวรอยร้าวที่ไม่เท่ากันได้เป็นอย่างดี ซึ่งในส่วนของค่าภาระโหลดที่เหมาะสมว่าควรอยู่ที่เท่าไหร่นั้นผู้วิจัยคิดว่าเกิดจากขนาดและรูปร่างของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบและประสบการณ์ที่ได้จากการทดสอบทั้งสิ้น

5. ในการทดสอบหากเกิดการขาดช่วงของการทดลองไม่ว่าจะเป็นไฟฟ้าดับหรือเกิดการหยุดกระทำของภาระโหลดที่ถูกตัดการทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไขดังกล่าวนี้ขึ้นในช่วงสภาวะของการทดสอบที่เริ่มเก็บข้อมูลจะถือว่าข้อมูลนั้นไม่ถูกต้อง แต่ถ้าหากชิ้นเหล็กกล้าทดสอบยังมีพื้นที่ที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าว (W)มากพอก็สามารถนำมาทดสอบที่สภาวะของการทดสอบที่สูงกว่าได้

6. ก่อนเริ่มทำการทดสอบควรทำการเช็ดถูที่บริเวณผิวที่ต่อจากรอยบากกลในแนวเส้นทางของการเติบโตของรอยร้าวทั้งสองด้านตามที่มาตรฐานแนะนำทั้งนี้เพื่อช่วยในการเฝ้าการเติบโตของรอยร้าว

7. ขณะทำการทดสอบควรหมั่นตรวจสอบการเติบโตของรอยร้าวทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบทั้งนี้เพื่อป้องกันรอยร้าวเติบโตเกินขอบเขตที่กำหนดตลอดจนจำนวนรอบที่ปรากฏอยู่ในส่วนควบคุม

8. ในช่วงของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าที่กำหนดให้รอยร้าวเติบโตต่อจากส่วนปลายของรอยบากกลเป็นระยะไม่ต่ำกว่า 3.00 มม. ตามเงื่อนไข ในช่วงดังกล่าวควรทำการวางแผนให้ดีเพราะต้องมีการปรับกันอยู่หลายครั้งและควรสังเกตเส้นทางการเติบโตของรอยร้าว (สำหรับภายใต้เงื่อนไขของสภาวะการทดสอบที่ผู้วิจัยศึกษามีการปรับลดภาระลงที่ 12% ของภาระก่อนหน้าอยู่ในช่วง 5 – 8 ครั้ง โดยเริ่มตั้งแต่รอยร้าวปรากฏขึ้น)

9. ในส่วนของการใช้สลักควรทำสำรองไว้ทั้งนี้เพื่อสลับกันใช้งานหลังจากที่การทดสอบชิ้นเหล็กกล้าชิ้นแรกทดสอบเสร็จสิ้น

10. ในส่วนของคำแนะนำอื่นๆ ก่อนที่จะทำการทดสอบควรทำการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้าที่ได้มีการทำการศึกษา ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่สภาวะการทดสอบเดียวกันหรือในสภาพเงื่อนไขของการทำการทดสอบที่ต่างกัน แต่ประสบการณ์และการบอกเล่าในสิ่งที่พบจะเป็นประโยชน์อย่างมากและเป็นแนวทางอย่างดีในการปรับใช้ให้สอดคล้องกับส่วนที่ทำอยู่

7.3 แนวทางงานวิจัยที่ต่อเนื่อง

จากประสบการณ์ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับองค์ความรู้ที่จะพัฒนางานวิจัยเพื่อไปสู่แนวทางในส่วนอื่นๆ และในแง่มุมของแนวทางการค้นคว้าวิจัยที่ต่อเนื่องได้พอสรุปได้ดังนี้

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าที่อัตราส่วนภาระที่แตกต่างกันสำหรับวัสดุเหล็กหล่อเนื่องจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM E647-05 [2] ได้ระบุว่าไม่จำกัดชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ

2. สำหรับงานวิจัยต่อเนื่องภายใต้หัวข้อวิทยานิพนธ์เดียวกันนี้สามารถแตกแขนงและขยายการศึกษาโดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กัดกร่อน เช่น ในน้ำเกลือ เป็นต้น

3. ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าที่อัตราส่วนภาระที่แตกต่างกันภายใต้อุณหภูมิที่สูงทั้งนี้เนื่องจากในส่วนของการทำงานของชิ้นส่วนกลมักมีปริมาณความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องไม่ว่าทางใดก็ทางหนึ่งหรือจะเกิดจากการที่ชิ้นส่วนกลเกิดการเสียดสีในขณะใช้งานหรือได้รับปริมาณความร้อนที่เกิดจากแหล่งอุณหภูมิความร้อนภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเติบโตรอยร้าว