

บทที่ 6

ผลการทดลอง และวิเคราะห์

6.1 คำนำ

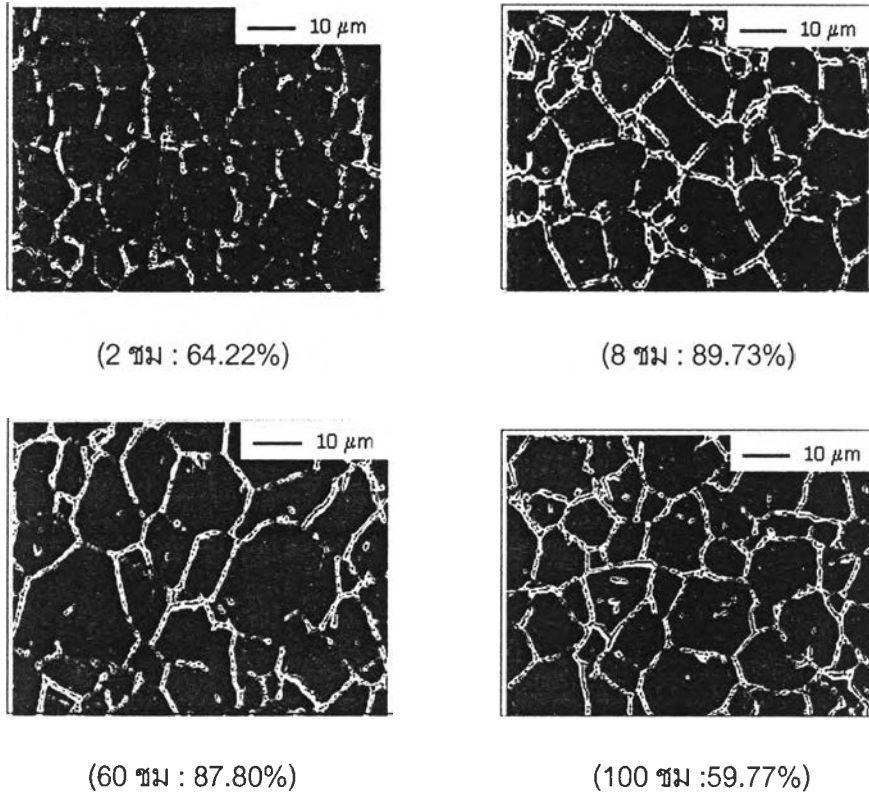
ในบทนี้ได้นำเสนอผลของกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อค่าคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีระดับในการเซนซิไทซ์ต่างกัน โดยการทดสอบด้วยเครื่อง SSRT ในสภาวะแวดล้อมจำลองการกัดกร่อน อีกทั้งผลของการตรวจวัดปริมาณของการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนอันนำไปสู่แนวทางในการวิเคราะห์ผลของกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อความต้านทานการเกิด IGSCC จะถูกนำมากล่าวถึงด้วยเช่นกัน

6.2 ปริมาณการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรน

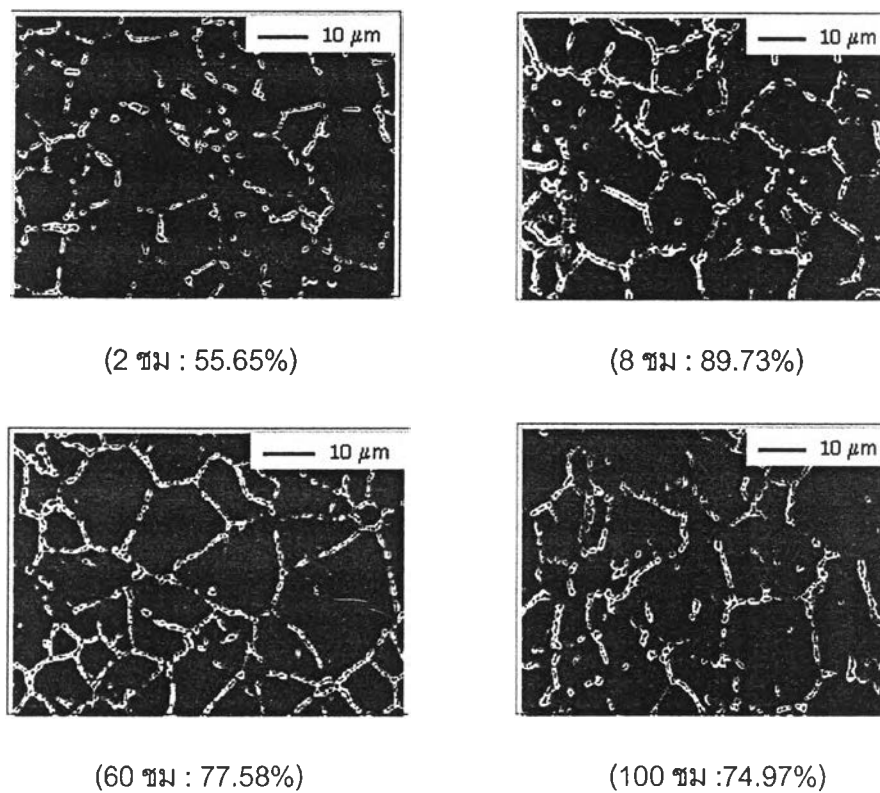
การตรวจสอบปริมาณการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรน (carbide linkage) ในชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ผ่านการเซนซิไทซ์ในระยะเวลาที่ต่างกัน ด้วยวิธี oxalic acid etched ที่อุณหภูมิห้อง และวิเคราะห์ชิ้นงานด้วย SEM พบว่าระดับของการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนในชิ้นงานทั้งสองชนิดต่างกันโดย 304AR จะมีการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนมากกว่า 304TT แสดงผลดังตารางที่ 6.1 รูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนที่ระดับการเซนซิไทซ์ต่างกัน

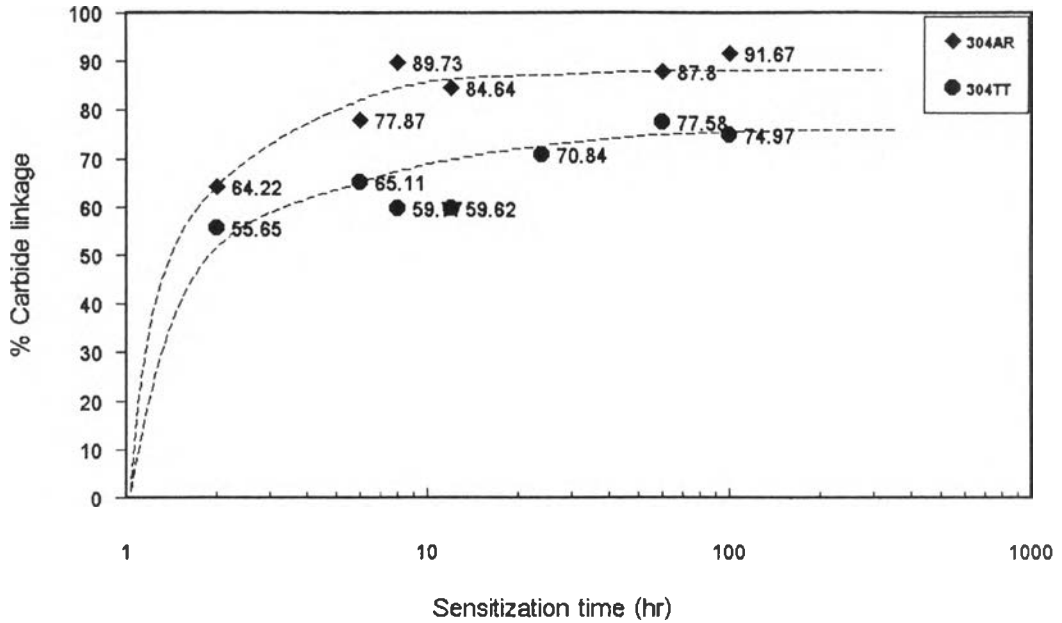
Specimen Type	Sensitisation Time at 650°C (hr)	Carbide Linkage (%)
304AR	2	64.22
	6	77.87
	8	89.73
	12	84.64
	60	87.80
	100	91.67
304TT	2	55.65
	6	65.11
	8	59.77
	12	59.62
	60	77.58
	100	74.97



รูปที่ 6.1 (a) ลักษณะของคาร์ไบด์บนขอบเกรนที่ 650°C ในระยะเวลาที่ต่างกันของชิ้นงาน 304AR



รูปที่ 6.1 (b) ลักษณะของคาร์ไบด์บนขอบเกรนที่ 650°C ในระยะเวลาที่ต่างกันของชิ้นงาน 304TT

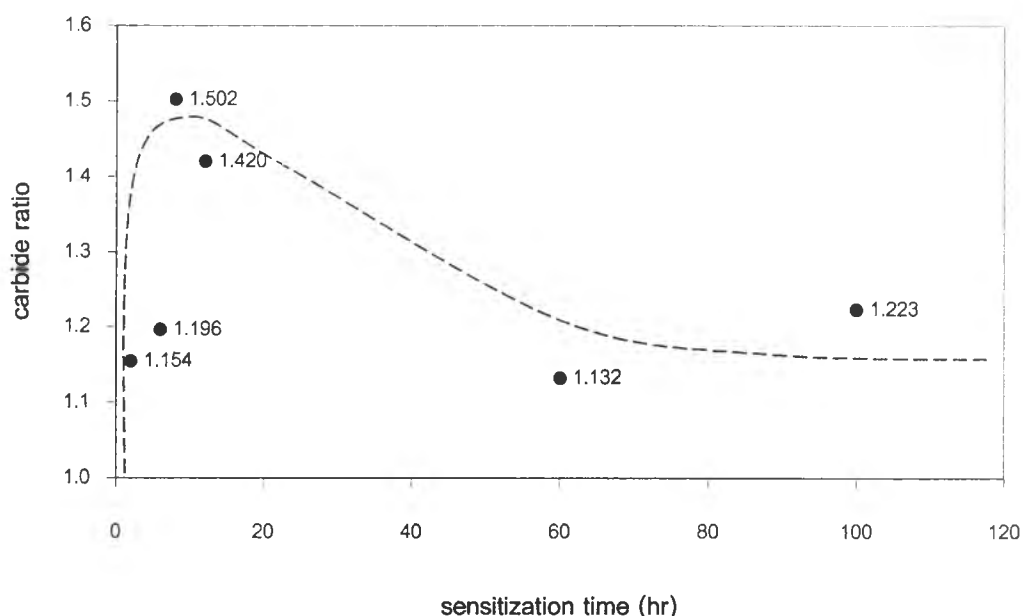


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนกับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์

จากตารางที่ 6.1 รูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าลักษณะ และเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนของชิ้นงาน 304AR และ 304TT เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาในการเซนซิไทซ์เพิ่มขึ้นจาก 2 ชม. จนถึง 8 ชม. แต่หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ ซึ่งเมื่อพิจารณา ณ เวลาในการเซนซิไทซ์เดียวกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ในชิ้นงาน 304AR จะสูงกว่า 304TT เช่นที่ 8 ชม. ของการเซนซิไทซ์จะเห็นความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์มากที่สุดคือ ใน 304AR จะสูงถึง 89.73% ในขณะที่ 304TT มีเพียง 59.77% ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวนี้เมื่อนำมาพิจารณาถึงของอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกัน (carbide ratio) ในชิ้นงาน 304AR กับ 304TT ในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์พบว่าอัตราส่วนของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ เนื่องจากระดับการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ใน 304AR เริ่มคงที่ แต่ใน 304TT ยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก เป็นผลให้อัตราส่วนของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการเซนซิไทซ์นานกว่านี้ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และในรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.2 อัตราส่วนของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันที่ชั่วโมงในการเซนซิไทซ์ต่างกัน

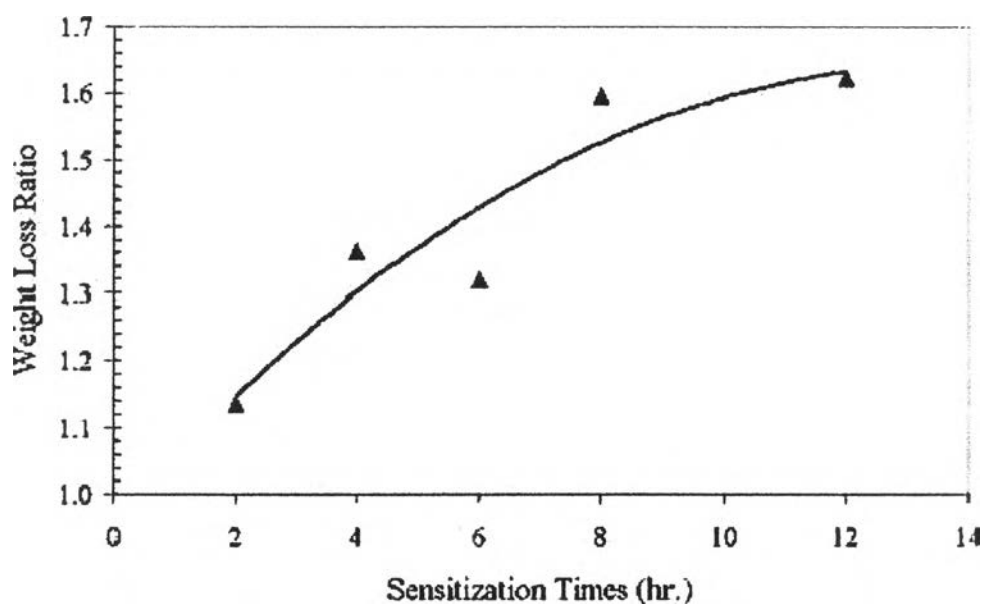
Sensitisation Time at 650°C (hr)	Carbide Linkage ratio
2	1.154
6	1.196
8	1.502
12	1.420
60	1.132
100	1.223



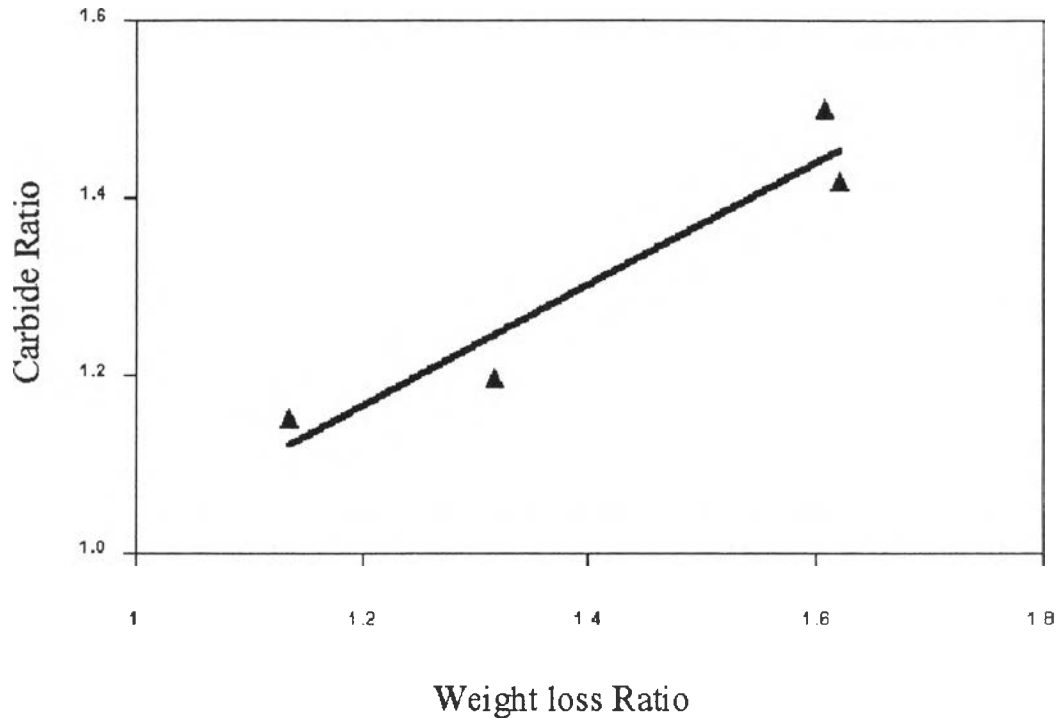
รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันกับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์

ปริมาณการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนถูกพบว่ามีผลโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนขอบเกรน เนื่องจากขอบเกรนที่มีปริมาณคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงระดับของปริมาณโครเมียมที่สูญเสียไปเป็นผลให้ที่บริเวณนี้มีความไวต่อการกัดกร่อน ซึ่งปริมาณของโครเมียมที่ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของ passive film ที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนลดลงไปด้วย เป็นผลให้สารละลายกัดกร่อนทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุได้มากขึ้น ดังแสดงในงานวิจัยของ

P. Pumpruek [36] ที่ทำการทดสอบอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) ใน 304AR และ 304TT ด้วยวิธีการทดสอบน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไป (weight loss technique) ในสารละลาย ferric sulfate-sulfuric acid พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเซนซิไทซ์ให้สูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งสองก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการกัดกร่อนของ 304AR จะสูงกว่า 304TT ณ เวลาในการเซนซิไทซ์เดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาในเชิงของอัตราส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปของ 304AR กับ 304TT (weight loss ratio) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าแนวโน้มความแตกต่างระหว่างชิ้นงานทั้งสองเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้เวลาในการเซนซิไทซ์นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องข้อมูลของอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกัน (carbide ratio) และเมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปมาแสดงความสัมพันธ์กับค่าของอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันในช่วงของการเซนซิไทซ์ตั้งแต่ 2 ชม. จนถึง 12 ชม. พบว่าเมื่อค่าของอัตราส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปเพิ่มสูงขึ้น ค่าของอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.5 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพอที่จะสรุปได้ว่า อัตราการกัดกร่อนบนขอบเกรนที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากระดับการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การเกิด IGSCC ได้อย่างง่ายดายภายใต้สภาวะที่มีความเค้น



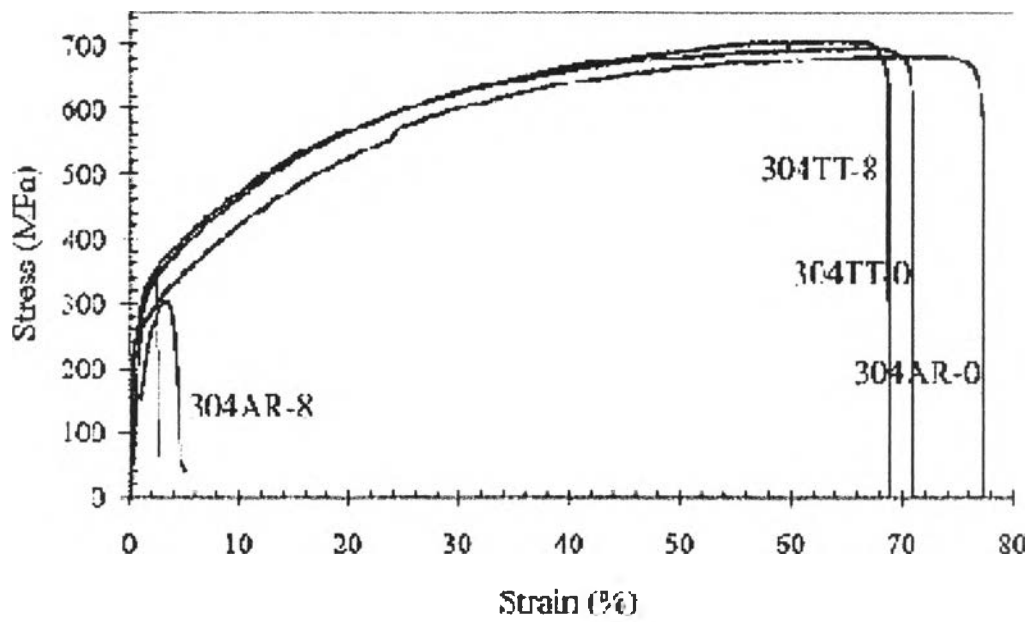
รูปที่ 6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปของ 304AR และ 304TT กับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์ [36]



รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป กับอัตราส่วนขอบเกรน ที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันของ 304AR และ 304TT [36]

6.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง SSRT

ค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสามารถบ่งบอกถึงระดับความไหวตัวต่อการเกิด IGSCC ได้เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค SSRT โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 304AR และ 304TT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้นเมื่อถูกทดสอบด้วยเครื่อง SSRT ในระบบหมุนเวียนสารละลายไฮเดียมไทโอซัลเฟตโดยใช้อัตราความเครียดประมาณ 1.75×10^{-6} วินาที⁻¹ ให้ผลการทดสอบในเชิงของค่าคุณสมบัติเชิงกลอันได้แก่ ค่า 0.2% ของความเค้น ณ จุดคราก (0.2% Yield Strength: 0.2% YS) ค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Strength: UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแตกของชิ้นงาน (Strain to Failure: ϵ_f) ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น และความเครียดที่ชั่วโงงในการเซนซิไทซ์ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.6 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของชิ้นงาน 304AR และ 304TT เปรียบเทียบกันที่ 0 ซม. และ 8 ซม.ของการเซนซิไทซ์ ค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทั้งสองนั้นสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวและได้แสดงไว้ดังตารางที่ 6.3



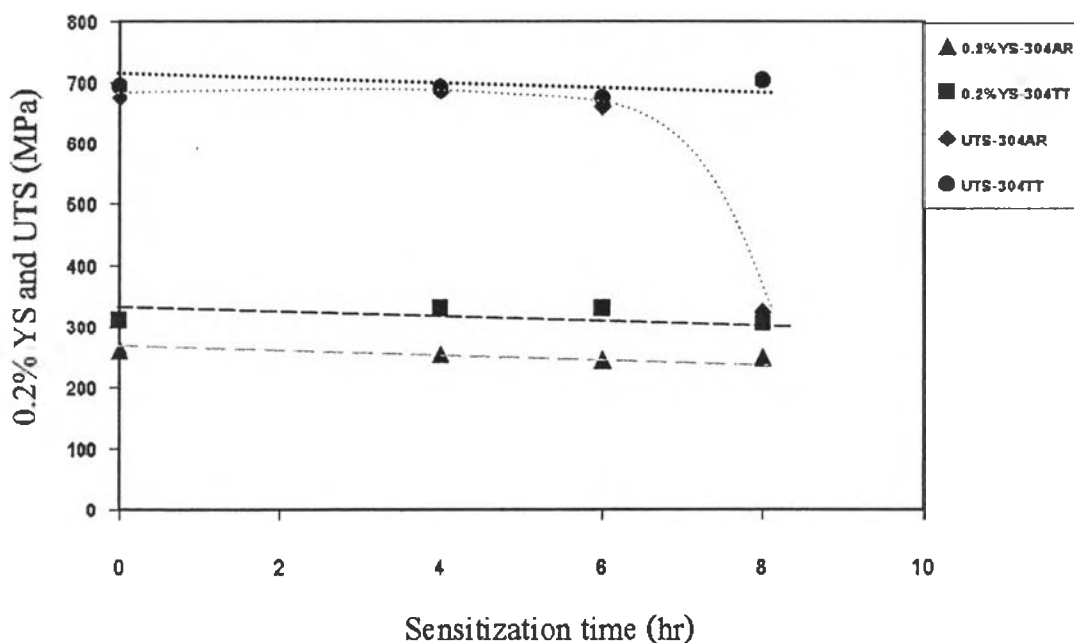
รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ 0 ชม. และ 8 ชม. ของการเซนซิไทซ์

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ด้วยเทคนิค SSRT ในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

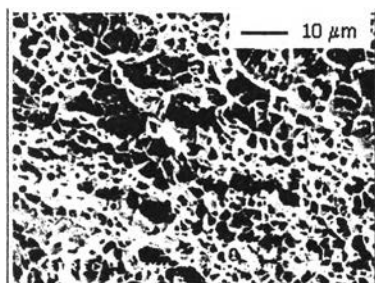
Specimen Type	Sensitisation Time at 650°C (hr)	0.2% Yield Stress* (MPa)	Maximum Tensile Strength* (MPa)	Strain to Failure* (%)	Failure Mode
304AR	0	260	675	78	Ductile
	4	255	685	65	Ductile
	6	245	660	67	Ductile
	8	250	325	5	Brittle
304TT	0	310	695	71	Ductile
	4	330	692	56	Ductile
	6	330	675	62	Ductile
	8	305	704	68	Ductile

* ค่าที่ได้จากการเฉลี่ย

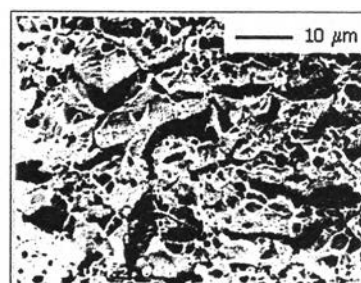
จากตารางที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าค่า 0.2% YS ของ 304AR มีค่าน้อยกว่า 304TT ณ ชั่วโมงเซนซิไทซ์เดียวกัน ในขณะที่ UTS และ ϵ_f มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย จนกระทั่งที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ ค่า UTS และ ϵ_f ของ 304AR ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ใน 304TT ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 6.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า 0.2% YS, UTS และเวลาในการเซนซิไทซ์ อีกทั้งเมื่อทำการตรวจสอบลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้นกับทั้งสองชิ้นงานพบว่ามีการแตกในลักษณะของ ductile overload ในทุกสภาวะของการเซนซิไทซ์ ยกเว้นชิ้นงาน 304AR ที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์จะมีการแตกในลักษณะของ brittle ด้วยผลของ IGSCC เกิดขึ้นในทุกส่วนของพื้นที่รอยแตกดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ตรวจวัดได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ใน 304AR จะมีการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนสูงถึง 89% เป็นผลให้ปริมาณของโครเมียมลดลงเพียงพอต่อการเกิด IGSCC ในสภาวะที่มีความเค้น และการกัดกร่อน ซึ่งสนับสนุนด้วยงานวิจัยของ D. B. Wells และคณะ [12] ที่กล่าวว่าวัสดุที่มีการเชื่อมต่อของขอบเกรนที่ถูกเซนซิไทซ์มากกว่า 89% วัสดุจะแตกร้าวด้วยผลของ IGSCC ในทันที ดังนั้นเมื่อรวมข้อมูลที่มีทั้งหมด ก็เพียงพอที่จะสรุปได้ว่าในสภาวะที่ถูกเซนซิไทซ์ 304TT จะมีความต้านทานต่อการเกิด IGSCC มากกว่า 304AR ในสภาวะที่มีความเค้น และการกัดกร่อน



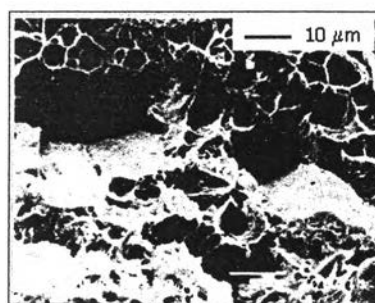
รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า 0.2%YS, UTS และเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์ของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ถูกทดสอบในสารละลายไฮเดียมไทโอซัลเฟต



(2 ชม. : Ductile)



(4 ชม. : Ductile)

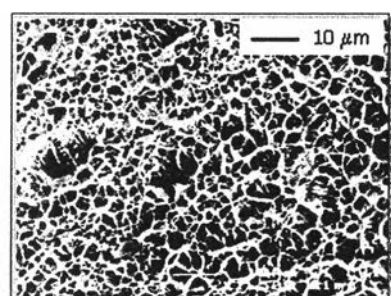


(6 ชม. : Ductile)

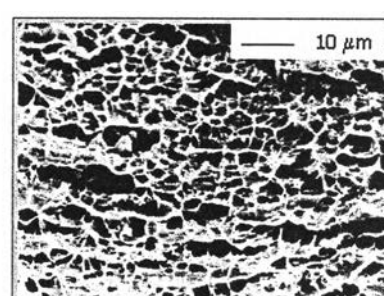


(8 ชม. : Brittle)

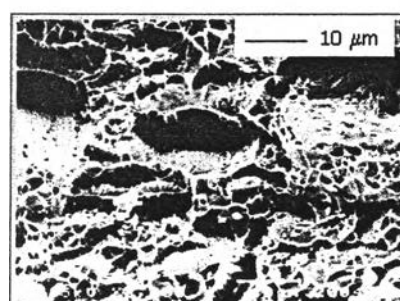
รูปที่ 6.8 (a) ลักษณะของการแตกที่ 650°C ในระยะเวลาเซนซิไทซ์ที่ต่างกันของชิ้นงาน 304AR



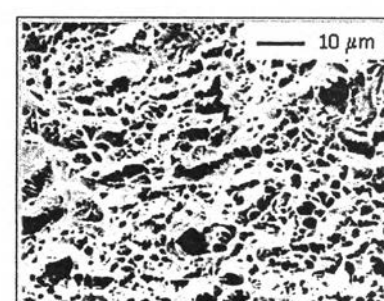
(2 ชม. : Ductile)



(4 ชม. : Ductile)



(6 ชม. : Ductile)



(8 ชม. : Ductile)

รูปที่ 6.8 (b) ลักษณะของการแตกที่ 650°C ในระยะเวลาเซนซิไทซ์ที่ต่างกันของชิ้นงาน 304TT

6.4 ผลการตรวจสอบลักษณะ และการขยายตัวของรอยแตกบนขอบเกรน

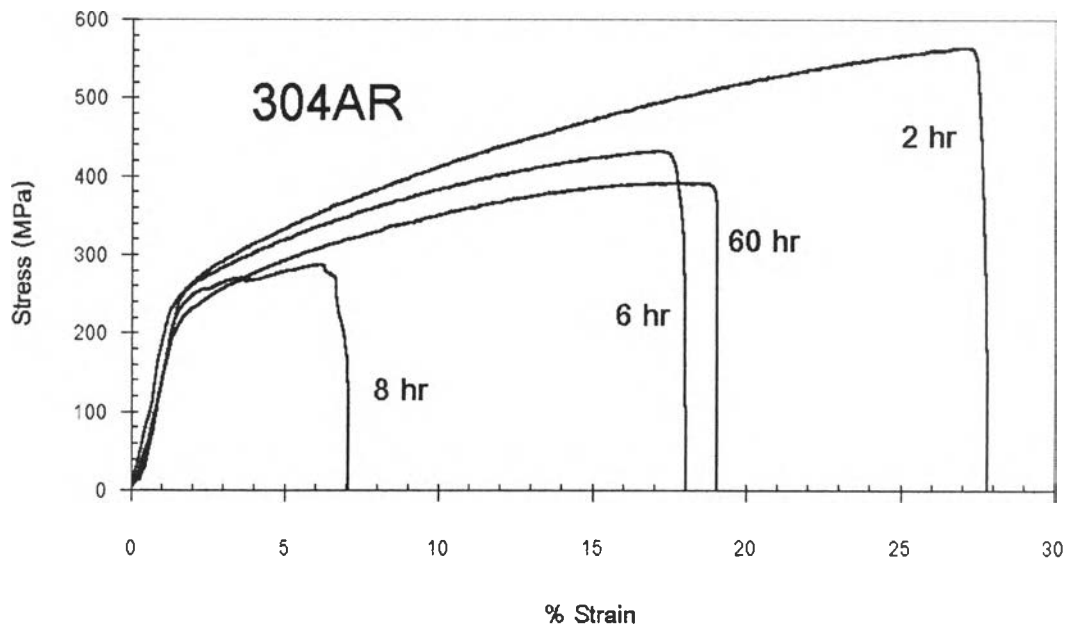
การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR และ 304TT ด้วยเทคนิค SSRT ในสารละลายไฮเดียมไทโอซัลเฟตเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ผลของกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อความต้านทานการเกิด IGSCC ได้ เนื่องจากการทดสอบในสารละลายไฮเดียมไทโอซัลเฟตแสดงให้เห็นเพียงการลดต่ำลงของค่า UTS และ E_r ของ 304AR ที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์อันเนื่องมาจากการเกิด IGSCC เท่านั้น แต่ไม่สามารถบ่งบอกถึงสาเหตุของความต้านทานการเกิด IGSCC ใน 304TT ณ เวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์เดียวกันได้อย่างชัดเจน มีแต่เพียงหลักฐานบางประการเท่านั้นที่แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการเกิด IGSCC ใน 304TT เกิดจากการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนที่มีปริมาณต่ำ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการเกิด IGSCC ได้ในทันที ดังนั้นจึงมีการทดสอบการขยายตัวของรอยแตกบนขอบเกรนเพื่อเป็นการยืนยันว่าการเกิด IGSCC นั้นถูกควบคุมด้วยลักษณะการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ ถ้าขอบเกรนที่มีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์มาก รอยแตกที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบก็ควรจะมีลักษณะใหญ่ และลึกกว่ารอยแตกของขอบเกรนที่มีการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์น้อยกว่า อีกทั้งรอยแตกที่เกิดขึ้นบนขอบเกรนจะถูกยับยั้งด้วยขอบเกรนที่ไม่มีคาร์ไบด์เป็นผลให้โอกาสของการแตกด้วยผลของ IGSCC ก็จะน้อยลงไปด้วย [12] ซึ่งถ้ามีการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์มากเท่าไร โอกาสของการเกิด IGSCC ก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น การทดสอบการขยายตัวของรอยแตกบนขอบเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR และ 304TT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือการใช้เทคนิค SSRT ที่ใช้อัตราความเครียดประมาณ 1.75×10^{-6} วินาที⁻¹ ในสารละลายที่ผสมระหว่างไฮเดียมคลอไรด์ ไฮเดียมไทโอซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก ซึ่งจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบตามด (pitting corrosion) ขึ้นบนพื้นผิว ผลของการทดสอบจะอยู่ในรูปแบบของค่าคุณสมบัติเชิงกล และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดแสดงในตารางที่ 6.4 และในรูปที่ 6.9 ตามลำดับ

จากตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.9 แสดงให้เห็นว่าค่า 0.2% YS ของ 304AR มีค่าน้อยกว่า 304TT ณ ช่วงโมเมนต์เซนซิไทซ์เดียวกัน ในขณะที่ UTS และ E_r มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยจนกระทั่งที่ 8 ชั่วโมงของการเซนซิไทซ์ ค่า UTS และ E_r ของ 304AR ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ 304TT ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่เมื่อเวลาในการเซนซิไทซ์เพิ่มสูงขึ้นถึง 60 ชม. ค่า UTS ของ 304AR กลับเพิ่มสูงขึ้นกว่าที่ 8 ชม. แต่ก็ยังน้อยกว่าที่ 2 ชม. และ 6 ชม. ของการเซนซิไทซ์ ณ เวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์เดียวกันนี้ ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่า UTS และ E_r ใน 304TT ดังกราฟความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.10

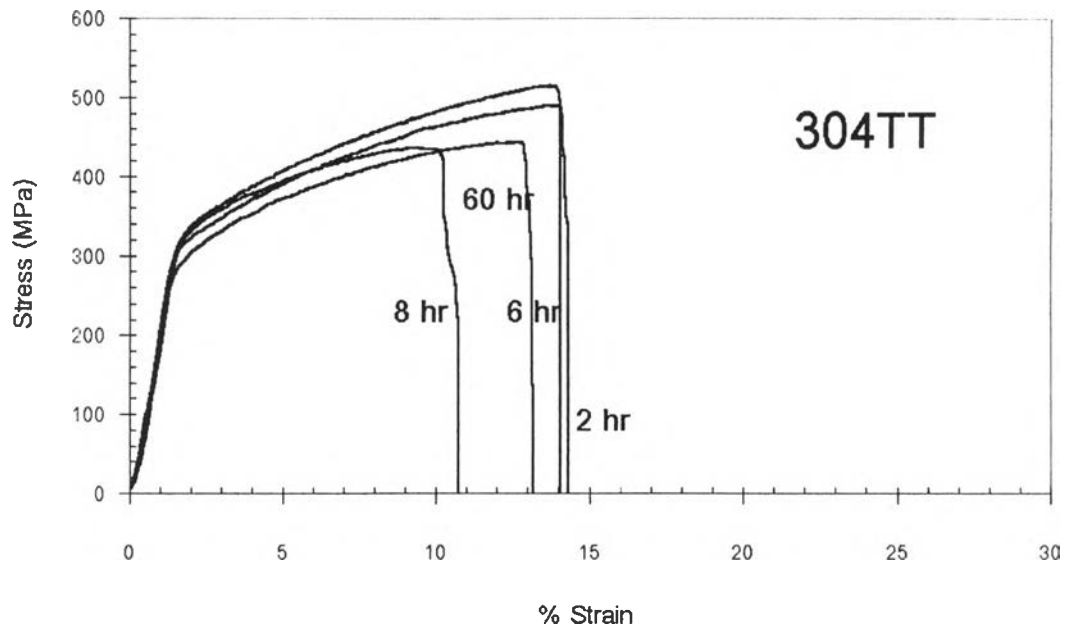
ตารางที่ 6.4 ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR และ 304TT ด้วยเครื่อง SSRT ในสารละลายผสมระหว่างไฮเดียมคลอไรด์ ไฮเดียมไทโอซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก

Specimen Type	Sensitisation Time at 650°C (hr)	0.2% Yield Stress* (MPa)	Maximum Tensile Strength* (MPa)	Strain to Failure* (%)	Failure Mode
304AR	2	254	565	29	Pitting
	6	247	445	21	Pitting
	8	248	268	6	Brittle
	60	216	375	19	Pitting
304TT	2	305	492	20	Pitting
	6	325	505	15	Pitting
	8	313	470	15	Pitting
	60	291	446	14	Pitting

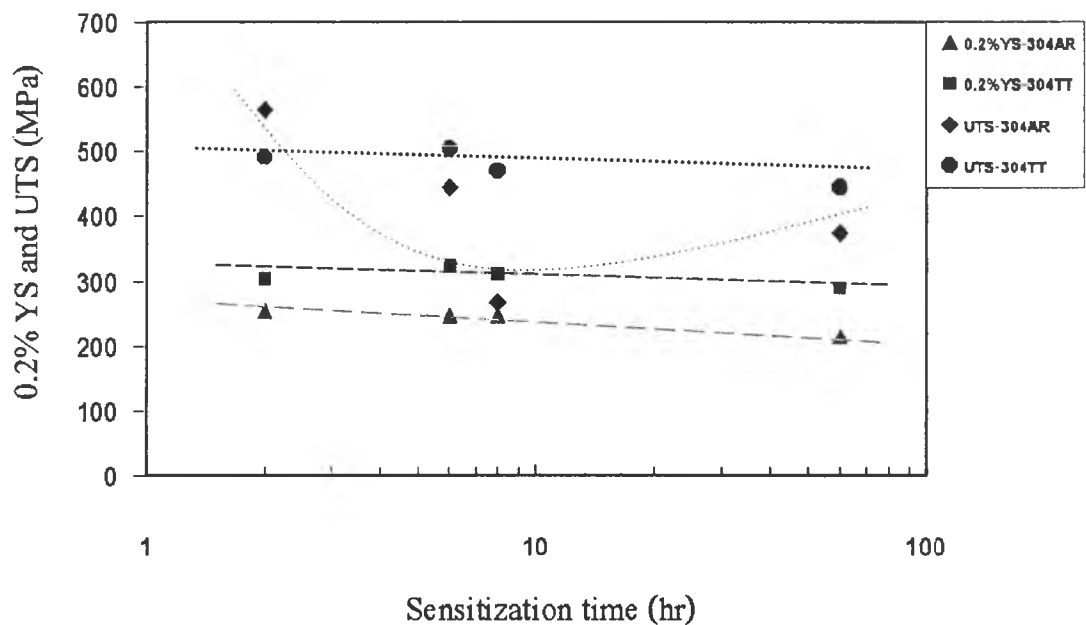
* ค่าที่ได้จากการเฉลี่ย



รูปที่ 6.9 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของ 304AR ในชั่วโมงเซนซิไทซ์ต่างกัน

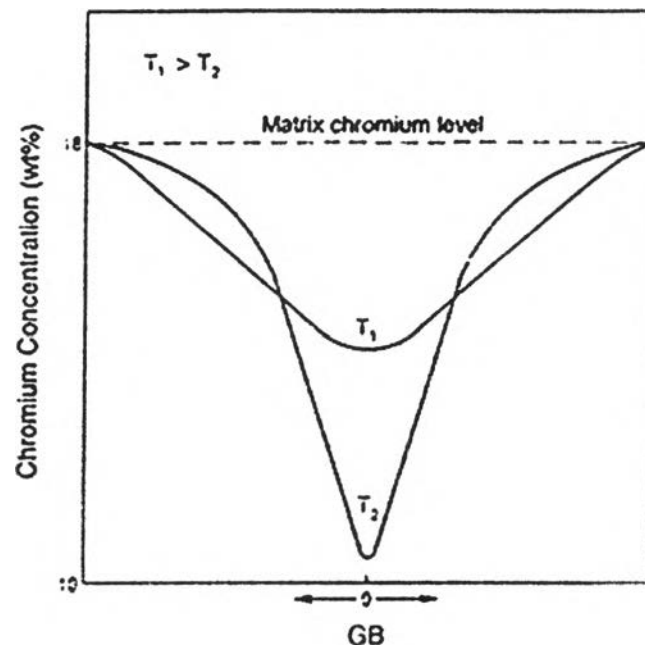


รูปที่ 6.9 (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของ 304TT
ในชั่วโมงเซนซิไทซ์ต่างกัน



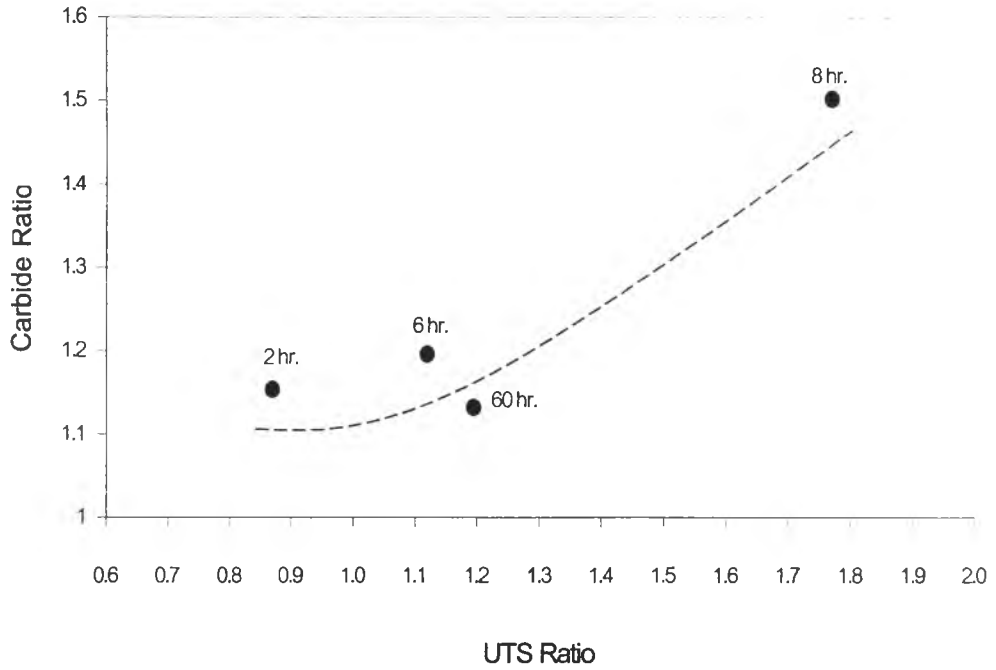
รูปที่ 6.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า 0.2%YS, UTS และเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์
ของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ในสารละลายที่ผสมระหว่างโซเดียมคลอไรด์
โซเดียมไทโอซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก

การเพิ่มสูงขึ้นของค่า UTS และ ϵ_r ใน 304AR ณ 60 ซม. เหลือ 8 ซม. ของการเซนซิไทซ์นั้น อาจเนื่องมาจากที่บริเวณขอบเกรนของ 60 ซม.เซนซิไทซ์มีปริมาณโครเมียมลดลงน้อยกว่าที่ 8 ซม.เซนซิไทซ์ดัง profile ที่แสดงในรูปที่ 6.11 เพราะเมื่อใช้เวลาในการเซนซิไทซ์นานเกินขีดสูงสุดของการลดลงของโครเมียมบนขอบเกรนซึ่งคาดว่าจะอยู่ที่ประมาณ 8 ซม.ของการเซนซิไทซ์ การลดลงของปริมาณโครเมียมจะมีแนวโน้มที่ต่ำลง แต่จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่ใหญ่และหนาขึ้นของคาร์ไบด์บนขอบเกรนแทน

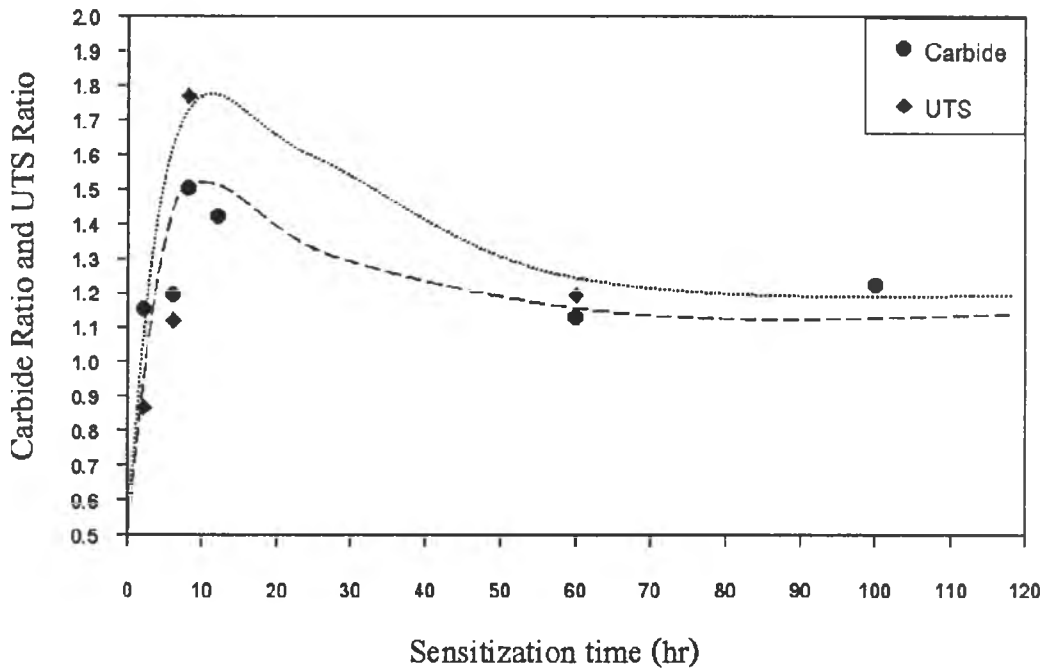


รูปที่ 6.11 Profile แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมที่ขอบเกรนในช่วงเวลาที่ต่างกัน ระหว่าง T_1 และ T_2

เมื่อนำผลของการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์บนขอบเกรนมาพิจารณาร่วมกับค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบในสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต นั่นคือ เมื่อระดับการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เพิ่มสูงขึ้น ค่าคุณสมบัติเชิงกลก็จะมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาในเชิงของอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันกับอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของ 304AR และ 304TT (UTS ratio) พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6.12 ซึ่งเมื่อนำค่าอัตราส่วนทั้งสองนี้ไปหาความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์จะได้ว่าค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุด และอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันมีค่าสูงสุดที่ 8 ซม.ของการเซนซิไทซ์ ส่วนที่เหลือจะมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันและอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของ 304AR และ 304TT



รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกัน, อัตราส่วนค่าความเค้นสูงสุด และเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์

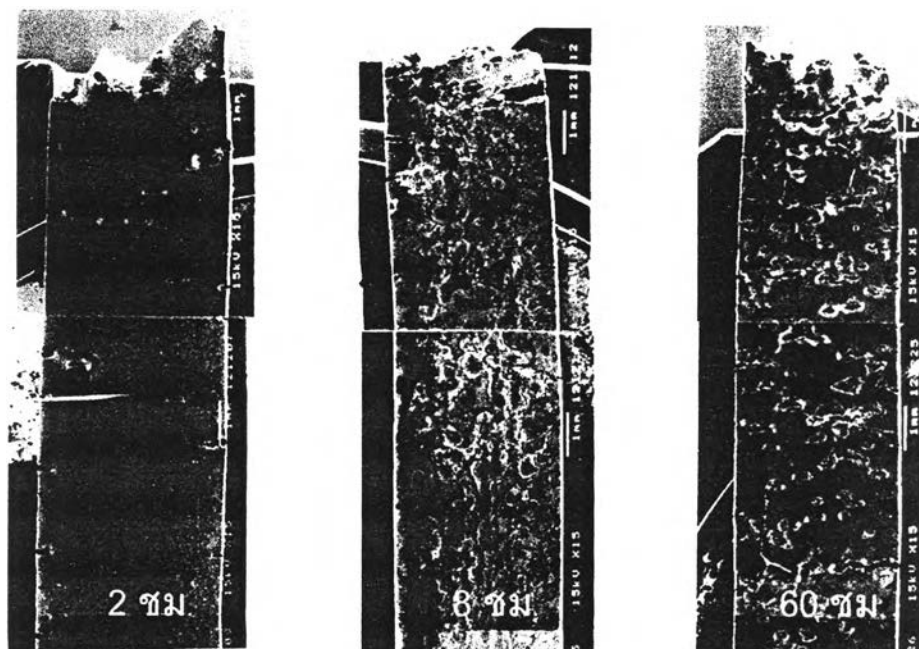
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะ และการขยายตัวของรอยแตกบนขอบเกรนของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ถูกทดสอบด้วยเทคนิค SSRT ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮโอซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ และกรดซัลฟิวริกดังแสดงในรูปที่ 6.14 พบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานทุกชิ้นเกิดจากการกัดกร่อนแบบตามด ยกเว้นที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ชิ้นงาน 304AR จะเกิดการแตกด้วยผลของ IGSCC ทั้งนี้เนื่องจากที่ทราบกันมาแล้วว่าที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์จะมีขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันถึง 89% เป็นผลให้ IGSCC เกิดขึ้นก่อนที่การกัดกร่อนแบบตามดจะเกิดขึ้น ซึ่งการกัดกร่อนแบบตามดนั้นจะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยากับผิวของชิ้นงานเพื่อให้เกิดรอยแตกเล็กๆขึ้นด้วยความสามารถของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ passive film อ่อนแอลงจนเกิดการแตกของ passive film ขึ้นได้ หลังจากนั้นไฮโอซัลเฟตจึงเข้าไปเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนภายในรอยแตกที่เกิดขึ้น [10] ซึ่งถ้าชิ้นงานได้มีการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ในปริมาณสูง ก็จะทำให้ขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่มีการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ในปริมาณต่ำดังผลที่แสดงในตารางที่ 6.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าใน 304AR มีขนาดของรอยแตกโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นใน 60 ชม.ของการเซนซิไทซ์สูงกว่าที่ 2 ชม. และ 8 ชม. ในขณะที่ขนาดของรอยแตกใน 304 TT มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.5 ความหนาแน่น และขนาดของรอยแตกแบบตามดในชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ถูกเซนซิไทซ์ในระยะเวลาต่างกัน ทดสอบด้วยเทคนิค SSRT ในสารละลายที่ผสมระหว่างโซเดียมไฮโอซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ และกรดซัลฟิวริก

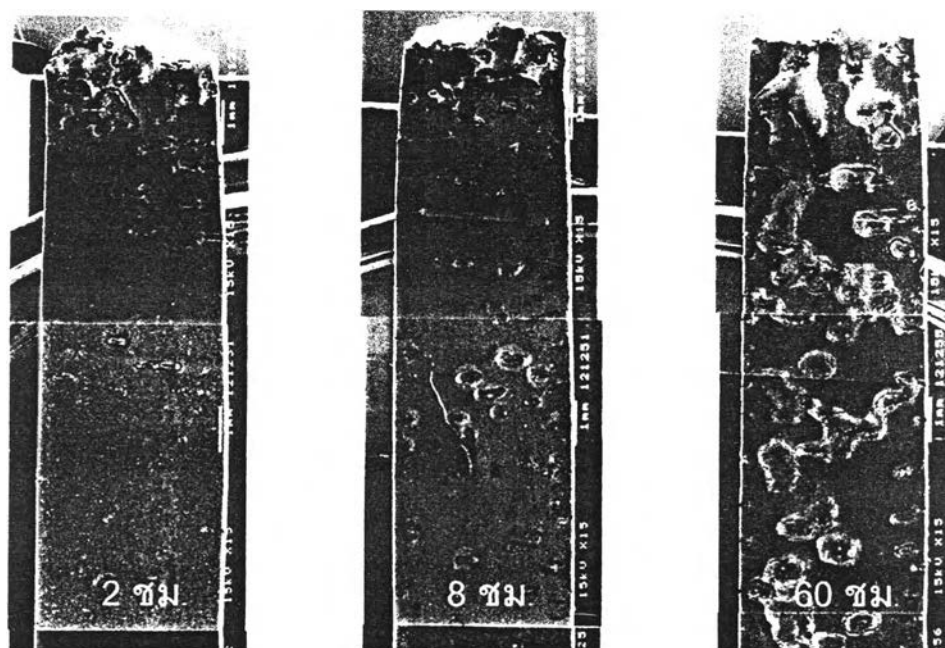
Specimen Type	Sensitisation Time at 650°C (hr)	Pit Density (mm ⁻²)*	Mean Crack Size** (µm)
304AR	2	0.054	318
	6	0.877	256
	8	0.261	535
	60	2.013	335
304TT	2	1.298	287
	6	0.329	280
	8	0.686	286
	60	2.526	270

* ค่าที่ได้จากการเฉลี่ย

** ค่าที่ได้จากการวัดรอยแตกที่มีขนาดต่ำกว่า 1,000 ไมครอน

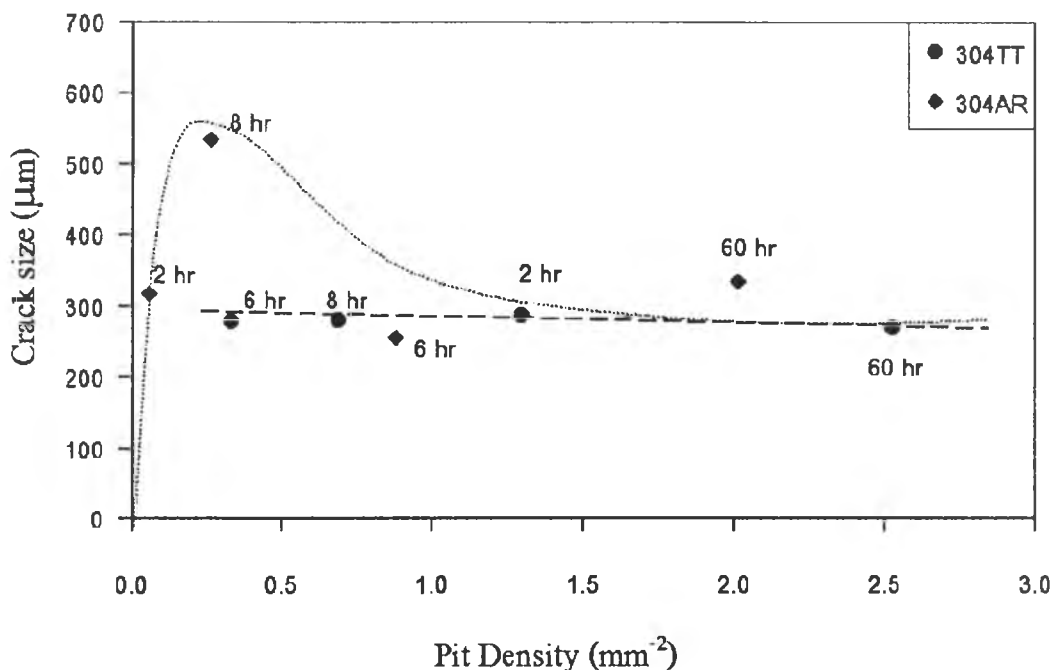


รูปที่ 6.14 (a) ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน 304AR ที่ถูกเซนซิไทซ์ในระยะเวลา 2 ชม, 8 ชม และ 60 ชม. และผ่านทดสอบด้วยเครื่อง SSRT ในสารละลายที่ผสมระหว่างโซเดียมไทโอซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ และกรดซัลฟิวริก

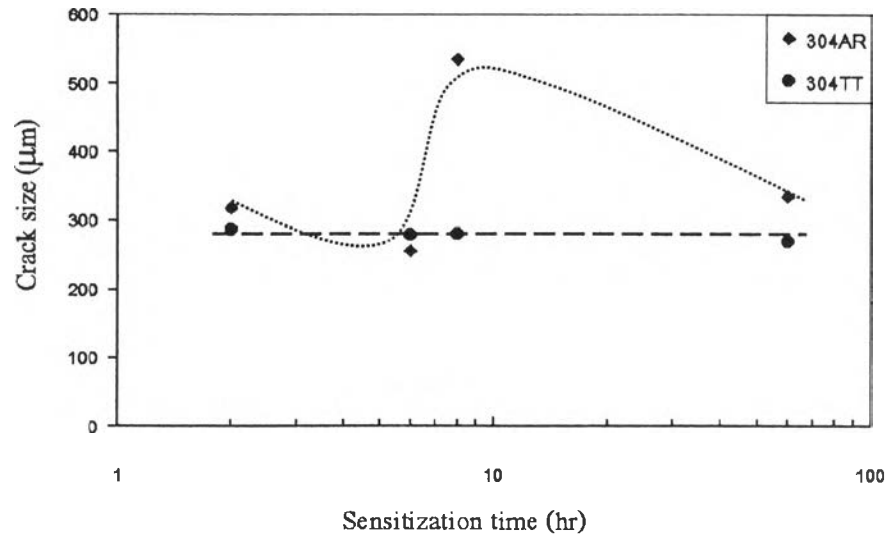


รูปที่ 6.14 (b) ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน 304TT ที่ถูกเซนซิไทซ์ในระยะเวลา 2 ชม, 8 ชม และ 60 ชม. และผ่านทดสอบด้วยเครื่อง SSRT ในสารละลายที่ผสมระหว่างโซเดียมไทโอซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ และกรดซัลฟิวริก

จากตารางที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของรอยแตกแบบตามด (pit density) ของทั้งชิ้นงาน 304AR และ 304TT มีค่าไม่แน่นอน และไม่สามารถทำนายได้ในแต่ละช่วงเวลาของการเซนซิไทซ์ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดรอยแตกแบบตามดบนผิวชิ้นงานขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบเช่น ความเข้มข้นของสารละลายกัดกร่อน ความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ในบริเวณต่างๆ อัตราการหมุนเวียนของสารละลายกัดกร่อน และอุณหภูมิเป็นต้น ซึ่งบางองค์ประกอบนั้นในการทำการทดลองไม่สามารถควบคุมได้เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นของรอยแตกแบบตามดที่ตรวจวัดได้มีค่าไม่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 6.15 ซึ่งยกเว้นกรณี 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ใน 304AR ที่มีการแตกแบบ IGSCC ดังนั้นในการวิเคราะห์เราจะมุ่งพิจารณาถึงขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์เพิ่มมากขึ้นขนาดของรอยแตกใน 304AR มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ยกเว้นที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ใน 304TT ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์กล่าวคือ ที่ 8 ชม.ของการเซนซิไทซ์ใน 304AR มีการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ในปริมาณสูง ดังนั้นย่อมจะมีรอยแตกที่มีขนาดใหญ่กว่าในช่วงเวลาเซนซิไทซ์อื่นๆ ยกเว้นที่ 60 ชม.เซนซิไทซ์จะมีขนาดของรอยแตกเล็กกว่าที่ 8 ชม.เซนซิไทซ์ และมีขนาดใกล้เคียงกับ 2 ชม. และ 6 ชม.เซนซิไทซ์ เนื่องมาจากการลดลงของปริมาณโครเมียมดังที่ได้กล่าวไปแล้วในช่วงต้นว่ามีปริมาณต่ำกว่าที่ 8 ชม.เซนซิไทซ์ เป็นผลให้รอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า และเมื่อพิจารณา 304TT จะพบว่าขนาดของรอยแตกใกล้เคียงกัน เพราะปริมาณการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์มีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง

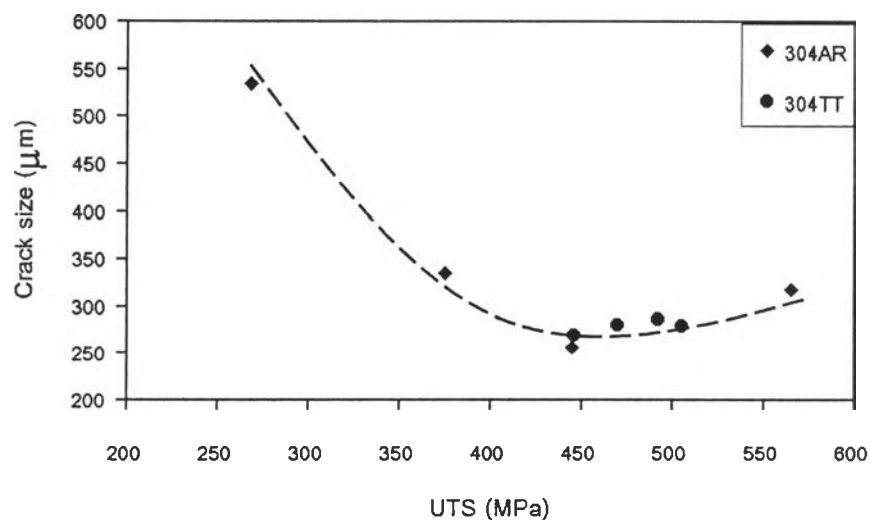


รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาด และความหนาแน่นของรอยแตกของทั้งสองชิ้นงาน

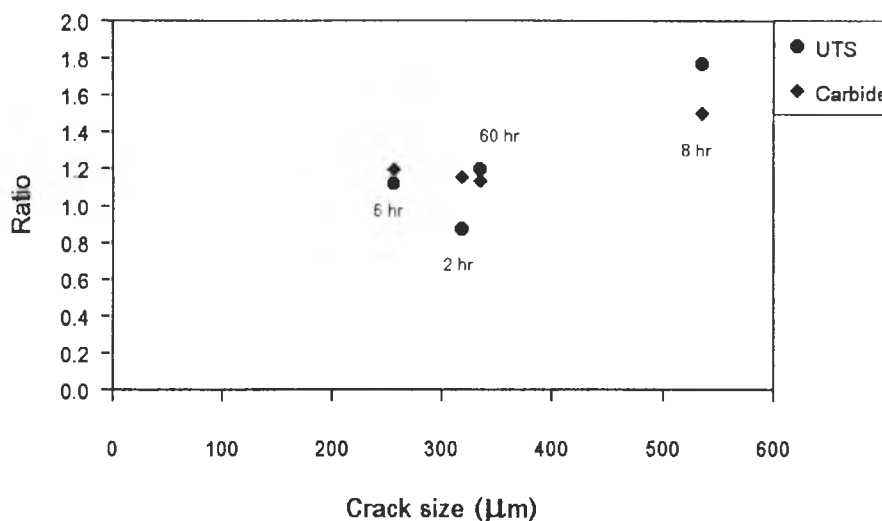


รูปที่ 6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตก และเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์

เมื่อนำค่า UTS ของทั้งสองชิ้นงานมาหาความสัมพันธ์กับขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการเซนซิไทซ์ดังแสดงในรูปที่ 6.17 พบว่ารอยแตกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่า UTS ลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนใน 8 ชม.เซนซิไทซ์ของ 304AR และเมื่อพิจารณาใน 304TT พบว่าขนาดของรอยแตกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่า UTS ที่ไม่แตกต่างกันมากนักเอง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในเชิงของค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุด และค่าอัตราส่วนขอบเกรนที่มีการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์กับขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทซ์ พบว่าขนาดของรอยแตกมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนของคาร์ไบด์ และ UTS มีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุด และขนาดของรอยแตก



รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุด และค่าอัตราส่วนขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันของ 304AR และ 304TT กับขนาดของรอยแตก

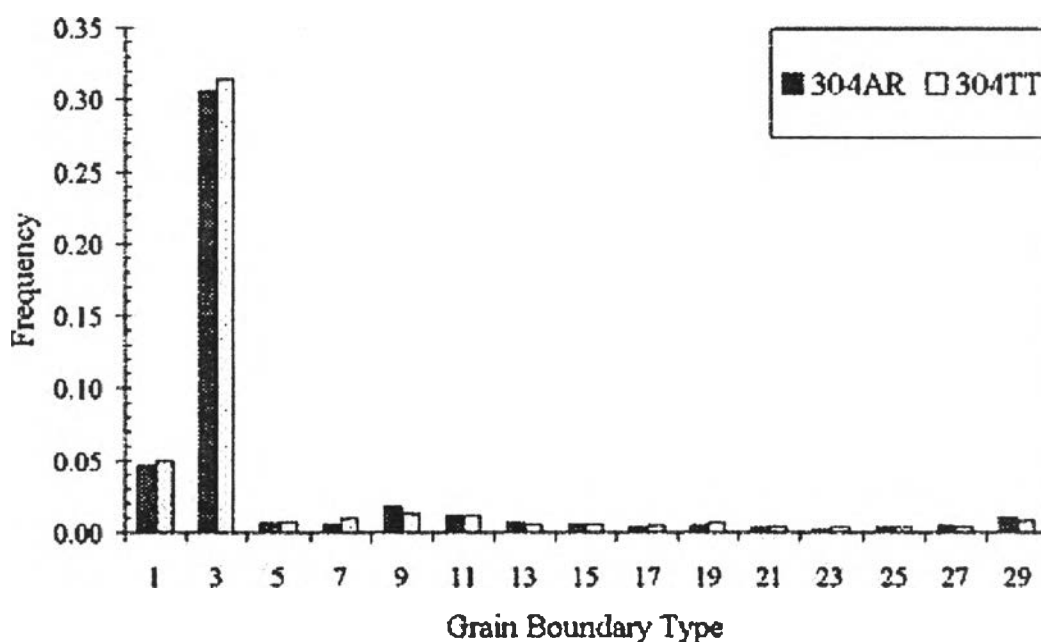
6.5 การทดสอบลักษณะ และคุณสมบัติของขอบเกรน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR และ 304TT ในสารละลายไฮเดียมไทโอซัลเฟต และสารละลายที่ผสมระหว่างไฮเดียมคลอไรด์ ไฮเดียมไทโอซัลเฟต และกรดซัลฟิวริกด้วยเทคนิค SSRT รวมไปถึงการตรวจวัดการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์นั้น เป็นเพียงการทดสอบเพื่อยืนยันสมมติฐานที่ว่า การแตกร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (IGSCC) ถูกควบคุมโดยลักษณะการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ ถ้าการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์อยู่ในปริมาณสูง โอกาสของการเกิด IGSCC ก็จะมีสูงด้วย ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยอื่นๆที่ทำการตรวจสอบ และเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของขอบเกรนใน 304AR กับ 304TT ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงไร เช่น การตรวจวัดสัดส่วนปริมาณขอบเกรนที่เป็น CSL การตรวจวัดการกระจายลักษณะของมุม dihedral และการตรวจสอบลักษณะการเอียงของระนาบของขอบเกรน ซึ่งจากผลการตรวจสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของขอบเกรนของ 304TT แตกต่างไปจาก 304AR เล็กน้อย แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยนี้ก็เพียงพอที่จะทำให้คุณสมบัติของขอบเกรนเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ทนต่อการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งรายละเอียดของการตรวจสอบคุณลักษณะขอบเกรนมีดังนี้

การตรวจวัดสัดส่วนปริมาณ CSLB

การตรวจวัดสัดส่วนปริมาณ CSLB สามารถทำได้โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (Electron Back-Scattered

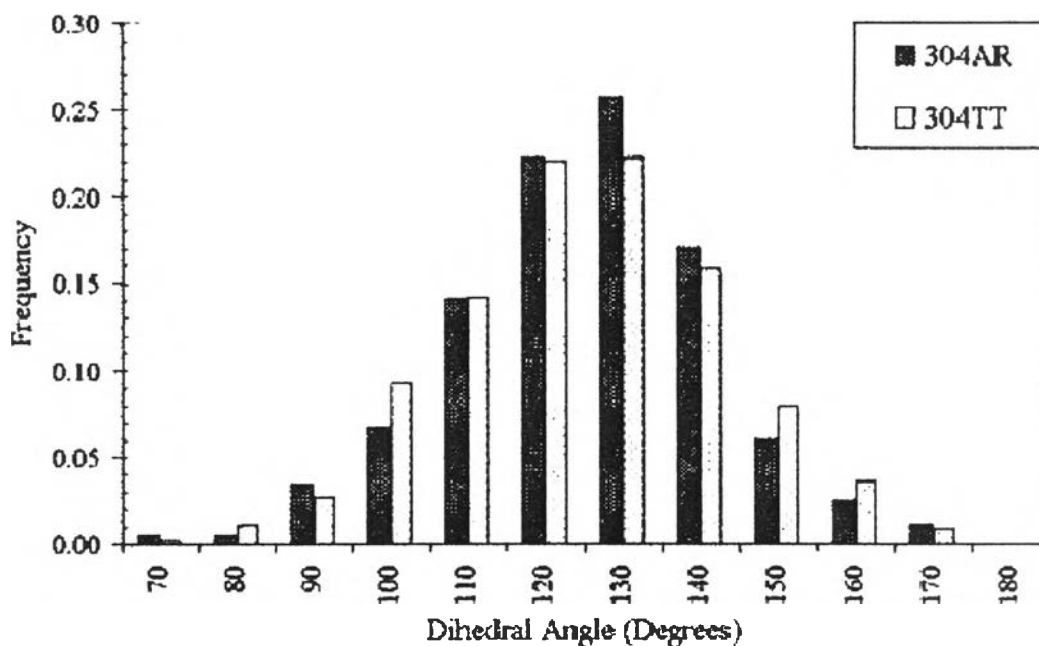
Diffraction Pattern: EBSP) ด้วย SEM โดยข้อมูลการทดสอบนี้จาก North Campus Electron Microbeam Analysis Laboratory ของมหาวิทยาลัย Michigan (Ann Arbor) ซึ่งแสดงผลการจำแนกการกระจายตัวของ CSL ในแต่ละประเภทขอบเกรนตั้งแต่ $\Sigma 1-29$ ดังแสดงในรูปที่ 6.19 พบว่าค่าสัดส่วน CSL ชนิด $\Sigma 3$ มีค่าสูงสุด และค่าสัดส่วน CSL โดยรวมมีค่าไม่ต่างกันคือ 0.39 และ 0.40 ใน 304AR และ 304TT ตามลำดับ แต่ 304TT กลับต้านทานการเกิด IGSCC ได้อย่างมาก [31] ดังนั้นสัดส่วนปริมาณ CSL จึงไม่สามารถบ่งบอกความแตกต่างระหว่าง 304AR และ 304TT ได้



รูปที่ 6.19 กราฟแจกแจงการกระจายลักษณะขอบเกรน CSL ใน 304AR และ 304TT [31]

การวัดการกระจายลักษณะของมุม Dihedral

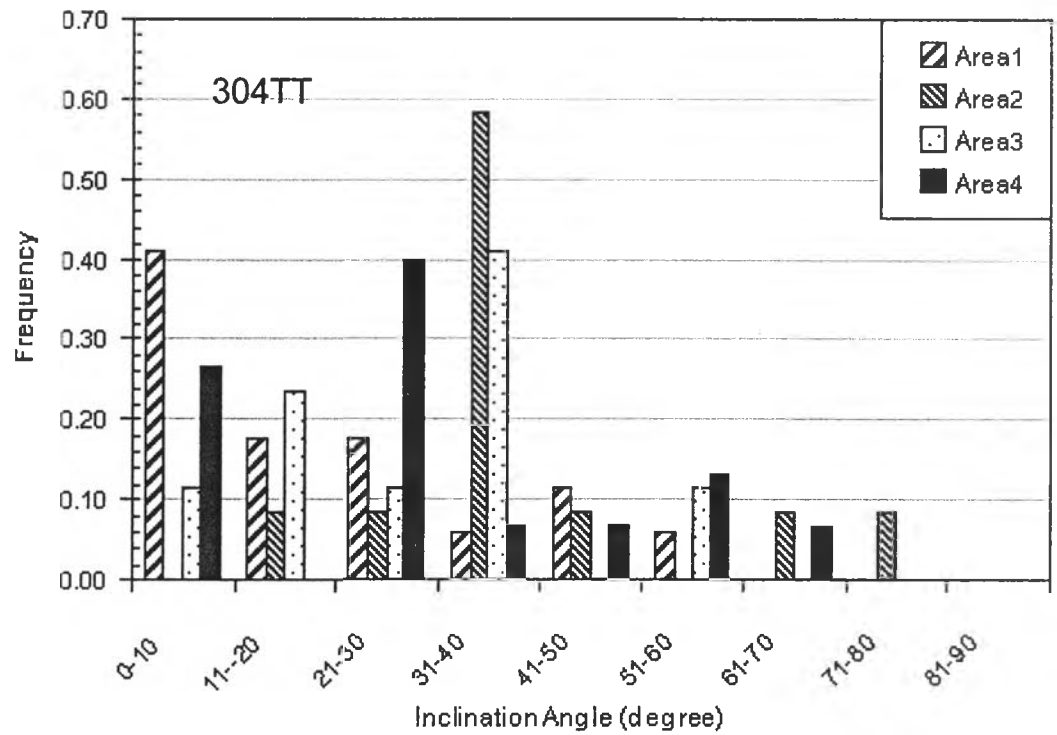
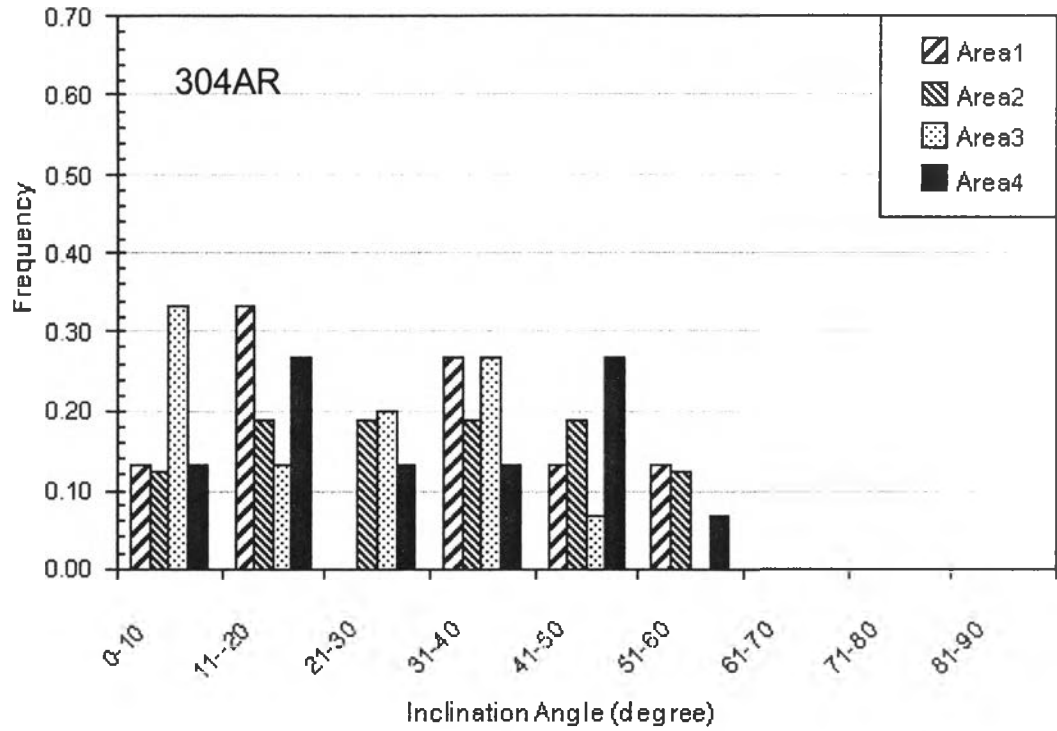
จากงานวิจัยของ V. Thaveprungsriporn และคณะ [31] ได้ทำการวัดการกระจายลักษณะของมุม dihedral ณ triple junction ในรูปแบบของความถี่ของการกระจายตัว (Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution: CFDA) ดังแสดงในรูปที่ 6.20 พบว่ามีการกระจายตัวรอบมุม 120 องศา ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากใน 304AR และ 304TT คือ 0.792 และ 0.742 ตามลำดับ เมื่อรวมเข้ากับผลของสัดส่วนปริมาณ CSL ใน 304AR และ 304TT พบว่าการกระจายลักษณะของขอบเกรน CSL มีค่าไม่แตกต่างกันมากในเชิงของสถิติ



รูปที่ 6.20 กราฟการกระจายลักษณะของมุม dihedral ณ triple junction ของ 304AR และ 304TT [31]

การเอียงของระนาบของขอบเกรน

จากงานวิจัยของ P. Prumpruek [36] ซึ่งทำการวัดการกระจายตัวของมุมเอียงของระนาบบนขอบเกรน (grain boundary inclination) ของ 304AR และ 304TT ดังแสดงในรูปที่ 6.21 พบว่าใน 304TT มีการกระจายตัวของมุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนในช่วง 20 องศา ถึง 40 องศา มากกว่า 304AR ทำให้คุณลักษณะของขอบเกรนในด้าน boundary plane reorientation เปลี่ยนแปลงไปอันมีผลต่อคุณสมบัติของขอบเกรนด้วย ซึ่งค่ามุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนที่แตกต่างกันนี้ ส่งผลให้ 304TT มีความต้านทานต่อการเกิด IGSCC มากกว่า 304AR เช่นเดียวกับงานวิจัยของ M. Caul และคณะ [33] ที่ทำการตรวจสอบสัดส่วนจำนวน CSL และค่ามุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700°C และ 800°C พบว่าชิ้นงานทั้งสองสภาวะมีสัดส่วนของขอบเกรนชนิด $\Sigma 3$ ใกล้เคียงกันมาก แต่มีค่ามุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนแตกต่างกันคือ ชิ้นงาน 800°C มีมุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนใกล้เคียงกับพื้นผิวอิสระ (free surface) มากกว่า 700°C เป็นผลให้พลังงานของขอบเกรนมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลต่ออัตราการแพร่ของอนุภาคคาร์ไบด์บนขอบเกรนที่ต่ำลงเช่นกัน จึงทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่บริเวณขอบเกรนมากขึ้น เช่นเดียวกับ 304TT ที่มีการกระจายของมุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนใกล้เคียงกับพื้นผิวอิสระมากกว่า 304AR ส่งผลให้ 304TT มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนมากกว่า 304AR



รูปที่ 6.21 กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของมุมเอียงของระนาบบนขอบเกรนของ 304AR และ 304TT [36]

6.6 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิม 304TT ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลแบบ SA เมื่อถูกนำไปเซนซีไทซ์ และทดสอบด้วยเครื่อง SSRT ในสภาวะจำลองการกัดกร่อน พบว่ามีความต้านทานต่อการเกิด IGSCC มากกว่า 304AR เนื่องด้วยผลของปริมาณการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่ถูกเซนซีไทซ์ ค่าคุณสมบัติเชิงกล และลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ 8 ชม.ของการเซนซีไทซ์ 304AR เกิด IGSCC เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ในปริมาณสูง ในขณะที่ 304TT ไม่ปรากฏลักษณะของ IGSCC เกิดขึ้นเลย และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของรอยแตกในแต่ละสภาวะของการเซนซีไทซ์พบว่าขนาดของรอยแตกขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่มีคาร์ไบด์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพฤติกรรมการแตกตามขอบเกรนด้วยผลของ IGSCC ถูกควบคุมโดยปริมาณการเชื่อมต่อของขอบเกรนที่มีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์

6.7 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าการทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซีไทซ์ในระยะเวลาที่ต่างกัน ในสภาวะจำลองการกัดกร่อนด้วยเครื่องมือให้อัตราความเครียดซ้ำที่ประมาณ 1.75×10^{-6} วินาที⁻¹ จะสามารถแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่าง 304AR และ 304TT ได้อย่างชัดเจน แต่ก็ไม่เพียงพอที่จะอธิบายให้เห็นถึงสาเหตุของความแตกต่างดังกล่าวได้ ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการทดสอบที่อัตราความเครียดเพียงระดับเดียวไม่สามารถแสดงให้เห็น IGSCC ในชิ้นงานทดสอบในสภาวะอื่นๆที่นอกเหนือไปจากที่ 8 ชม.ของการเซนซีไทซ์ได้ เนื่องด้วยผลของออกไซด์ฟิล์มที่ถูกผลิตขึ้นมาใหม่สามารถที่จะยับยั้งการเกิด IGSCC ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลด้วยอัตราความเครียดซ้ำในหลายระดับนั้น น่าจะแสดงให้เห็นถึงสาเหตุของความแตกต่างของค่าคุณสมบัติเชิงกลระหว่าง 304AR และ 304TT ได้ในสภาวะที่มีการเซนซีไทซ์ และการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี