



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลกระทบของโลหะเติมต่อสมบัติการคืบของการเชื่อมเหล็กกล้าเกรด 2.25Cr-1Mo ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมทิก

Effect of filler metals on creep properties of 2.25Cr-1Mo steel weld joints prepared by TIG process

อิทธิพล พลพุด¹ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี^{1*} ธวัชชัย ปลุกผล² บันเทิง ศรีคะรัน³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

² ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

Ittiphol Phonpud¹ Prapas Muangjunburee^{1*} Thawatchai Plookphol² Buntoeng Srikarun³

¹ Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand

² Center of Excellence in Metal and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand

³ Department of Mechanical and Robotic Engineering, School of Engineering and Technology, Walailak University, Thasala, Nakhon Si Thammarat, Thailand

* Corresponding author.

E-mail: prapas.m@psu.ac.th; Telephone: 0 7428 7111

วันที่รับบทความ 30 พฤษภาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 20 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 14 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการคืบของแนวเชื่อมเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo โดยใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และเกรด ERNiCrMo-3 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมทิกหรือการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม โดยทำการให้ความร้อนขึ้นงานตัวอย่างก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 30 นาที และให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การทดสอบการคืบเป็นการทดสอบแบบแรงการแตกหัก โดยทำการทดสอบขึ้นงานตัวอย่างในช่วงความเค้น 139 ถึง 315 MPa และอุณหภูมิทดสอบ 550, 600 และ 650 °C หลังการทดสอบได้มีการทำนายอายุการใช้งานของแนวงานเชื่อมด้วยวิธีการประเมินค่าพารามิเตอร์ของ Larson-Miller และทำการประเมินผิวรอยแตกหักหลังการทดสอบการคืบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเกิดหลุมและรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวเป็นโครงข่ายในโครงสร้างเมตริกซ์ที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งบริเวณกระแทกร้อนวิกฤติ และยังพบรูปแบบของการเกิดการคืบที่อุณหภูมิสูงในลักษณะเดียวกันของขึ้นงานเชื่อมทั้งสองแบบการทดลอง

คำสำคัญ

การคืบ เหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo การเชื่อมทิก ค่าพารามิเตอร์ของ Larson-Miller

Abstract

This research aims at comparing creep properties obtained on welding 2.25Cr-1Mo steel using ER90S-G and ERNiCrMo-3 filler metals by TIG or GTAW process. The samples were preheated at 250 °C for 30 minutes and post-weld heat-treated

at 690 °C for 1 hour. The high temperature accelerated creep rupture test of 2.25Cr-1Mo welded samples was investigated over 139 to 315 MPa stress range at temperatures of 550, 600, and 650 °C. The service lifetime of the welded materials can be predicted using the extrapolation of Larson-Miller parameter. Creep surface fracture was investigated using SEM consisted of dimple ruptures and micro-voids coalescence in the fibrous matrix of the intercritical region of HAZ. Similar high-temperature creeps service lives were found in both welded materials.

Keywords

creep; 2.25Cr-1Mo steel; GTAW; Larson-Miller parameter

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงาน ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมหลายประเภทมีการใช้งานในสภาวะที่มีความเค้นและอุณหภูมิสูง ในการพิจารณาสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับชิ้นส่วนเหล่านี้ คือ ความต้านทานต่อการเสียรูปและความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดี กล่าวคือ วัสดุต้องมีความแข็งแรงสูงและสามารถคงความแข็งแรงนั้นไว้ได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน [1]

เหล็กกล้าทนความร้อนสูง (Heat-resistant steel) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ โรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เหล็กกล้าทนความร้อนสูงที่นิยมกันมาก คือ เหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม (Cr-Mo steel) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo (2.25Cr-1Mo steel) เนื่องจากมีสมบัติที่ดีทางด้านความต้านทานต่อการคืบที่อุณหภูมิสูง การป้องกันการกัดกร่อน และความสามารถในการเชื่อม (Weldability) คือ สมบัติของเหล็กกล้าที่สามารถนำไปเชื่อมได้ดี รวมไปถึงมีราคาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระยะยาว [2, 3] เมื่อชิ้นส่วนมีความเสียหายเกิดขึ้น จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือแทนที่ด้วยอะไหล่ชิ้นใหม่ อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนที่เสียหายบางส่วนอาจได้รับการซ่อมแซมโดยวิธีการเชื่อม เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการเปลี่ยนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ชุดใหม่ [4]

สาเหตุความเสียหายที่พบได้บ่อยของวัสดุสำหรับชิ้นส่วนที่มีสภาวะการใช้งานที่ได้รับความเค้นและอุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา คือ ความเสียหายจากการคืบ (Creep) [5, 6] ดังนั้นสมบัติการคืบของวัสดุจึงเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่สภาวะความเค้นและอุณหภูมิสูง โดยปรากฏการณ์ของการคืบเป็นกระบวนการที่วัสดุได้รับความเค้นอย่างต่อเนื่องจนวัสดุเกิดการเสียรูปแบบ

พลาสติกที่ไม่สามารถกลับคืนรูปเดิมได้หรือเกิดการแตกหัก นอกจากนี้การคืบยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย การทดสอบการคืบจะพิจารณาจากความแข็งแรงของวัสดุ โดยพิจารณาจากความเค้นจุดครากในแต่ละอุณหภูมิการใช้งาน เส้นโค้งการคืบ (Creep curve) แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์พื้นฐานของกลไกการคืบ เช่น เวลาที่เริ่มเกิดการคืบ อัตราการคืบต่ำสุดหรือการคืบที่เกิดในสภาวะคงที่ และช่วงเวลาสุดท้ายของการคืบที่เร่งให้เกิดกระบวนการแตกหักของโลหะขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวัสดุที่ทนต่อการคืบ

โลหะผสมพิเศษ (Super alloy) ประเภทนิกเกิล (Nickel-based super alloy) ซึ่งมีนิกเกิลเป็นธาตุหลักได้รับความนิยมในการใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความต้านทานการคืบที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงมักถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้งานในสภาวะที่มีความเค้นและอุณหภูมิสูง [7, 8] บริเวณรอยเชื่อมมักเป็นบริเวณที่มีความอ่อนแอมากที่สุด ดังนั้นจึงถือเป็นจุดสำคัญอีกจุดหนึ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะที่มีความเค้นและอุณหภูมิสูง เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกโลหะเติมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าทนความร้อนสูงกลุ่มโครเมียม-โมลิบดีนัม และเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงจนเป็นผลให้ชิ้นส่วนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง [9] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การประเมินพฤติกรรมการคืบของเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมทิกโดยใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และเกรด ERNiCrMo-3 (Inconel 625) สำหรับการพิจารณาในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าทนความร้อนสูงดังกล่าว

2. วิธีการและระเบียบวิธีวิจัย

เหล็กกล้าที่ใช้เป็นโลหะฐาน (Base metal) ในการวิจัยนี้เป็นเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo (ASTM

A213-T22) ส่วนโลหะเติม (Filler metal) เป็นลวดเติมเกรด ER90S-G และ ERNiCrMo-3 (Inconel 625) ส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานและโลหะเติมแสดงในตารางที่ 1-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานเกรด 2.25Cr-1Mo (ASTM A213 T22)

ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.13	0.50	0.45	0.035	0.035	2.25	1.00	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมเกรด AWS A5.28 ER90S - G

ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)							
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.11	0.36	0.70	0.04	2.29	1.07	0.15	Bal.

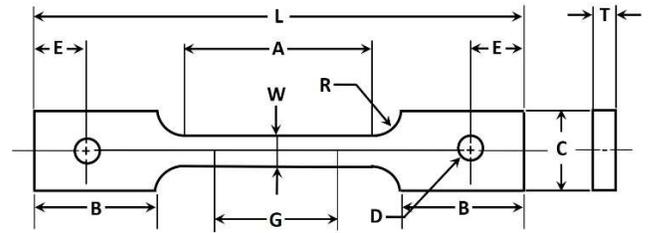
ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมเกรด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 (Inconel 625)

ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)							
C	Mn	Ti	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
0.01	0.12	0.18	64.2	22.1	8.8	3.78	0.35

งานวิจัยนี้ใช้ท่อเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 mm หนา 5.5 mm และยาว 100 mm เป็นชิ้นงานตัวอย่าง การเตรียมรอยเชื่อม คือ ร่องบากวีเปิดมุมร่อง 60 องศา และช่องว่างเติมลวด 2 mm ก่อนการเชื่อมได้ทำการให้ความร้อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 30 นาที ในเตาไฟฟ้า และทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) หรือการเชื่อมอาร์กแก๊สทั้งสแตน (GTAW) มีการใช้แก๊สปกคลุมขณะเชื่อมด้วยแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% สำหรับพารามิเตอร์ในการเชื่อมมีการกำหนดให้เหมือนกันของโลหะเติมทั้งสองเกรด พารามิเตอร์ในการเชื่อมคือ กระแสเชื่อม 100-105 A แรงดันไฟฟ้า 11-12 V และความเร็วในการเชื่อม 4.4-7.3 cm/min หลังจากการเชื่อมเสร็จ ได้มีการให้ความร้อนชิ้นงานหลังเชื่อม (PWHT) ที่อุณหภูมิ 690 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา

ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบการคืบด้วยเครื่องมือทางกลให้มีขนาดชิ้นงานตามรูปที่ 1 และตารางที่ 4

สำหรับตำแหน่งของรอยเชื่อมจะอยู่ตรงกลางชิ้นงาน โดยมีความกว้างของรอยเชื่อมประมาณ 6-8 mm



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบการคืบ [10]

ตารางที่ 4 ขนาดชิ้นงานสำหรับการทดสอบการคืบ

สัญลักษณ์	รายละเอียดของตัวอย่าง	ขนาด (mm)
G	ความยาวเกจ	19.0
W	ความกว้าง	3.0
T	ความหนา	2.0
R	รัศมีทำมุม	4.0
L	ความยาวรวม	75.0
A	ความยาวของส่วนที่ลดลง	38.0
B	ความยาวของส่วนจับ	19.0
C	ความกว้างของส่วนจับ	10.0
D	ขนาดของรูสลัก	3.5
E	ระยะขอบจากรูสลัก	9.0

ทำการทดสอบการคืบของชิ้นงานตัวอย่างในเครื่องทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 550, 600 และ 650 °C โดยได้เลือกค่าความเค้นทดสอบการคืบจากค่าความเค้นจุดครากที่อ้างอิงจากค่าทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ที่อุณหภูมิ 550, 600 และ 650 °C [11] โดยการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 550 °C ใช้ความเค้น 210, 245, 280 และ 315 MPa การทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้ความเค้น 175, 204, 232 และ 262 MPa และการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 650 °C ใช้ความเค้น 139, 162, 186 และ 209 MPa ทำการทดสอบการคืบจนกระทั่งชิ้นงานตัวอย่างขาดออกจากกัน

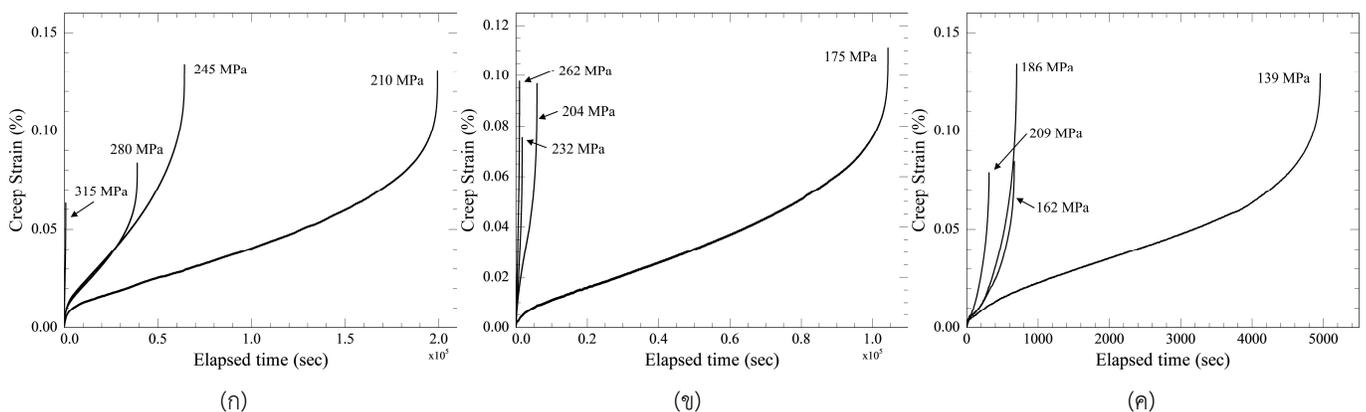
3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบการคืบ

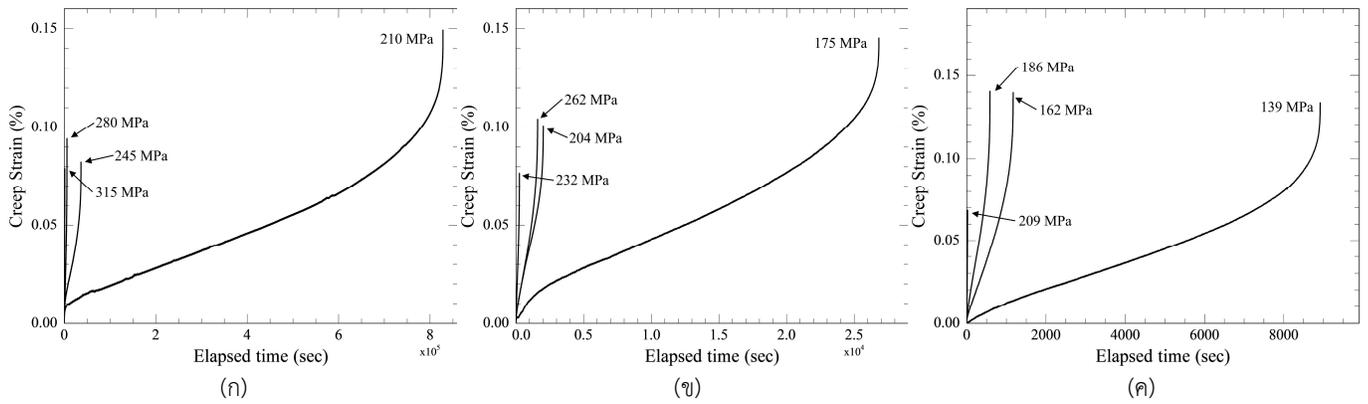
ผลของความเค้นของการคืบเทียบกับเวลาโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 550, 600 และ 650 °C ของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G

และ ERNiCrMo-3 แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบการคืบได้แสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 5 และ 6 ตามลักษณะการคืบในสามขั้นตอน ได้แก่ การคืบขั้นเริ่มต้น การคืบขั้นที่สอง และการคืบขั้นที่สาม ในขั้นตอนของการคืบขั้นเริ่มต้น อัตราการคืบหลักจะลดลงตามความเครียดที่เพิ่มขึ้นจนถึงระยะการคืบขั้นที่สองหรือการคืบในสภาวะคงตัว โดยอัตราการเกิดการคืบจะคงที่และต่ำที่สุด (Minimum creep rate) การคืบขั้นที่สาม อัตราการคืบจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดโพรงอากาศและรอยแตกภายในชิ้นงานจนเกิดการแตกหัก] 12, 1 [3รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานตัวอย่างที่สภาวะความเค้นต่าง ๆ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 550° C รูปที่) 4 ก (เวลาที่เกิดการแตกหักจากการคืบที่ความเค้น 280 และ 245 MPa ของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G ใช้เวลานานกว่าชิ้นงานเชื่อม ERNiCrMo-3 ส่วนที่อุณหภูมิ 600° C (รูปที่ 4 ข) เวลาที่เกิดการแตกหักจากการคืบของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G จะนานกว่าชิ้นงานเชื่อม ERNiCrMo-3 ในทุกความเค้นที่ทดสอบ แต่ที่อุณหภูมิ 650° C รูปที่) 4 ค (กลับพบว่าที่ความเค้น 139 และ 162 MPa ชิ้นงานเชื่อม ERNiCrMo-3 ใช้เวลาในการเกิดการแตกหักจากการคืบนานกว่า ความเค้นที่ใช้และอุณหภูมิที่ทำให้การทดสอบมีความสำคัญอย่างมากต่อเวลาที่เกิดการแตกหักจากการคืบ เนื่องจากเมื่อใช้ความเค้นในการทดสอบต่ำจะ

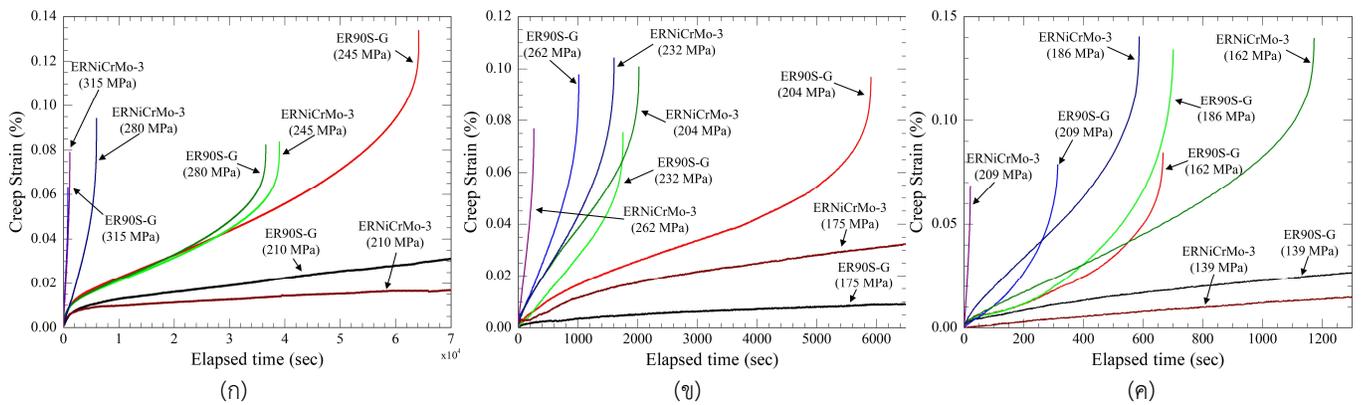
ส่งผลให้อัตราการเสียรูปที่เกิดขึ้นช้าลง แต่ในทางกลับกันความเสียหายจากการคืบจะเป็นตัวเร่งให้เกิดระดับความเค้นที่สูงขึ้น การแตกหักจากการคืบของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณกระหนาบร้อนวิกฤติ) Inter-critical Heat Affected Zone, ICHAZ (รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการเสียรูปจนแตกหักของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo 3-ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์แบบที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเมื่อค่าความเค้นที่ใช้ในการทดสอบสูงขึ้น ระยะเวลาที่ทำให้เกิดการเสียรูปจนแตกหักจะเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น รวมไปถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการคืบ โดยจะเห็นได้ว่าในตำแหน่งที่ค่าความเค้นใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิในการทดสอบสูงกว่าจะเกิดการเสียรูปจนแตกหักได้เร็วกว่าตามไปด้วย รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นของการทดสอบการคืบและอัตราการเกิดการคืบต่ำสุดที่ค่า 2.05×10^{-6} และ 4.27×10^{-7} ของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo- 3 ตามลำดับ โดยพบว่าลักษณะรูปแบบที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันของการใช้โลหะเติมทั้งสองชนิด จากกราฟจะพบแนวโน้มของอัตราการเกิดการคืบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นสูงขึ้น อันเนื่องมาจากอัตราการเกิดการคืบจะแปรผันตรงกับค่าความเค้น โดยเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นการขัดขวางการเคลื่อนตัวของอนุภาคภายในชิ้นงานจะลดต่ำลง เป็นผลให้อัตราการคืบเพิ่มสูงขึ้น] 14, 1[5



รูปที่ 2 เส้นโค้งการคืบของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G ทดสอบที่อุณหภูมิ (ก) 550 °C (ข) 600 °C และ (ค) 650 °C



รูปที่ 3 เส้นโค้งการคืบของชิ้นงานเชื่อม ERNiCrMo-3 ทดสอบที่อุณหภูมิ (ก) 550 °C (ข) 600 °C และ (ค) 650 °C



รูปที่ 4 เส้นโค้งการคืบเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo-3 ทดสอบที่อุณหภูมิ (ก) 550 °C (ข) 600 °C และ (ค) 650 °C

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการคืบของชิ้นงาน ER90S-G

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Creep Rate (1/s)	Rupture Stain	Rupture Time (s)
550	210	2.05×10^{-6}	0.1306	199,323
	245	2.99×10^{-6}	0.1337	64,159
	280	3.79×10^{-6}	0.0836	38,996
	315	3.05×10^{-5}	0.0633	808
600	175	2.32×10^{-6}	0.1111	104,300
	204	6.56×10^{-6}	0.0967	5,908
	232	5.06×10^{-6}	0.0753	1,755
	262	1.48×10^{-5}	0.0977	1,014
650	139	4.34×10^{-6}	0.1287	4,957
	162	2.52×10^{-5}	0.0843	667
	186	4.06×10^{-6}	0.0145	733
	209	7.03×10^{-5}	0.0788	314

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการคืบของชิ้นงาน ERNiCrMo-3

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Creep Rate (1/s)	Rupture Stain	Rupture Time (s)
550	210	4.27×10^{-7}	0.1492	828,120
	245	3.12×10^{-6}	0.0823	36,545
	280	6.73×10^{-6}	0.0941	5,976
	315	9.79×10^{-6}	0.0790	1,137
600	175	4.52×10^{-6}	0.1453	26,829
	204	9.74×10^{-6}	0.1008	2,022
	232	9.69×10^{-6}	0.1042	1,606
	262	1.21×10^{-4}	0.0767	261
650	139	7.78×10^{-6}	0.1353	9,124
	162	2.49×10^{-5}	0.1395	1,173
	186	8.29×10^{-5}	0.1402	587
	209	1.71×10^{-4}	0.0684	21

3.2 พารามิเตอร์ของ Larson-Miller

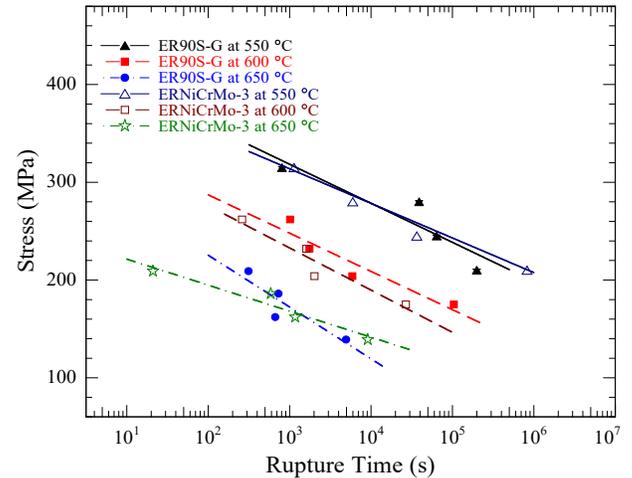
การประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานตัวอย่าง สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นจากการคืบโดยใช้พารามิเตอร์ของ Larson-Miller (P_{LM}) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟของความเค้นที่ได้จากการทดสอบการคืบกับพารามิเตอร์ของ Larson-Miller ดังแสดงในสมการ (1) และสมการเชิงเส้นของพารามิเตอร์ Larson-Miller ดังแสดงในสมการ (2)

$$P_{LM} = (\log t_r + C) \cdot T \quad (1)$$

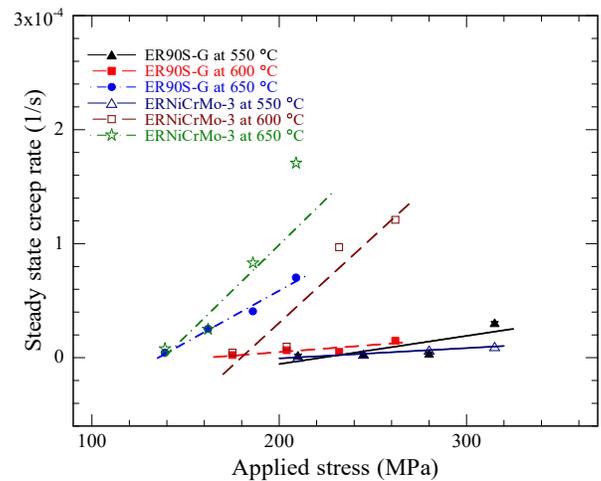
$$\sigma = (aP_{LM} + b) \quad (2)$$

โดยที่ t_r คือ อายุการใช้งานจนกระทั่งเกิดการเสียหาย (หน่วยเป็นชั่วโมง) C คือ ค่าคงที่ของ Larson-Miller T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของการใช้งานหรือทดสอบ σ คือ ค่าความเค้นที่ใช้งาน (MPa) และ a กับ b คือ ค่าตัวแปรเชิงเส้นที่ได้จาก Larson-Miller

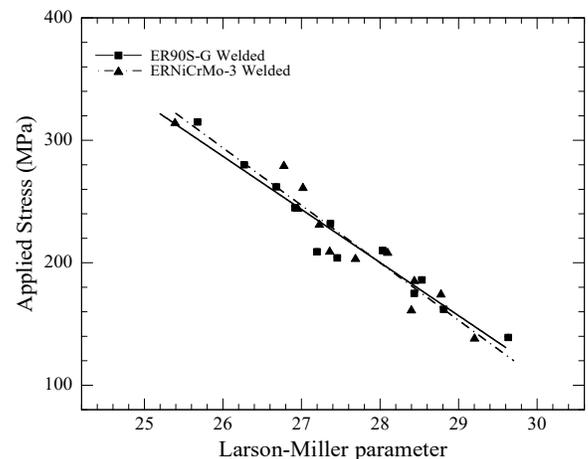
ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ Larson-Miller สำหรับเหล็กกล้า 25.2 Cr-1Mo โดยปกติจะกำหนดไว้ที่ประมาณ 16] 20-20] ในกรณีที่ใช้ค่าคงที่ 20 โดยเมื่อนำเวลาที่เกิดความเสียหายและอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบการคืบของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo-3 มาทำการแทนค่าในพารามิเตอร์ของ Larson-Miller พบว่าผลลัพธ์จากกราฟเชิงเส้นมีความคาดเคลื่อนค่อนข้างสูง โดยที่ค่า R-square (R^2) ที่ได้คือ 7015.0 และ 7766.0



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะเวลาที่เกิดการเสียรูปจนแตกหัก เปรียบเทียบชิ้นงาน ER90S-G และ ERNiCrMo-3



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า steady creep rate กับค่าความเค้น เปรียบเทียบชิ้นงาน ER90S-G และ ERNiCrMo-3



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและ พารามิเตอร์ Larson-Miller เปรียบเทียบชิ้นงาน ER90S-G และ ERNiCrMo-3

รูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ของ Larson-Miller โดยจากการทดลองได้ทำการแทนค่าอุณหภูมิและเวลาที่เกิดความเสียหายของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองลงในสมการ (1) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ Larson-Miller หลังจากนั้นนำไปค่า P_{LM} ไปแทนค่าในสมการ (2) เพื่อสร้างกราฟเชิงเส้นเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชนิด โดยได้ทำการปรับค่าคงที่ (C) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชิ้นงานตัวอย่างดังกล่าว จากการทดลองพบว่าชิ้นงานเชื่อม ER90S-G มีค่าคงที่ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 30.8 โดยค่า R-square (R^2) ที่ได้รับ คือ 0.9265 ส่วนชิ้นงาน ERNiCrMo-3 มีค่าคงที่ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 30.8 โดยค่า R-square (R^2) ที่ได้รับ คือ 0.9415 ซึ่งโดยปกติแล้วเหล็กกล้าเกรด 2.25Cr-1Mo ที่เป็นโลหะฐานจะมีค่าคงที่ของ Larson-Miller อยู่ที่ประมาณ 20 [11] แต่จากการทดลองที่ได้จากชิ้นงานเชื่อมทั้งสองมีค่าคงที่ที่ประมาณ 30 อาจเนื่องมาจากเป็นชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมและได้รับผลการทบททางความร้อนจากการเชื่อมทำให้ค่าคงที่ที่ได้แตกต่างจากชิ้นโลหะฐาน [21] จากการเปรียบเทียบกราฟเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ของ Larson-Miller ของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo-3 ในช่วงความเค้นระหว่าง 139 ถึง 315 MPa พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประเมินได้ว่าอายุการใช้งานของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo-3 อาจมีอายุการใช้งานจนกระทั่งเกิดความเสียหายใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากความเสียหายที่แตกหักหลังการทดสอบการคืบมีลักษณะแบบเดียวกัน คือเกิดการแตกหักที่นอกแนวเชื่อมใกล้กับบริเวณกระแทกร้อนวิกฤต [18-19] ของทุกชิ้นงานที่ทำการทดสอบ ส่งผลให้การเชื่อมโดยใช้โลหะเติมของทั้งสองเกรดไม่ได้ไปมีผลต่ออายุการใช้งานเนื่องจากความเสียหายไม่ได้เกิดตรงบริเวณโลหะเชื่อมแต่เกิดตรงบริเวณโลหะฐาน

3.3 ลักษณะผิวที่แตกหัก

หลังจากชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการคืบขาดออกจากกัน บริเวณผิวที่เกิดการแตกหักของชิ้นงานตัวอย่างถูกนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 โดยแสดงผิวที่แตกหักของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และเกรด

ERNiCrMo-3 โดยทำการเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบที่ใช้โลหะเติมทั้งสองเกรดที่อุณหภูมิ 550 °C ที่ระดับความเค้น 210 MPa กับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 650 °C ที่ระดับความเค้น 186 MPa โดยพบว่าเกิดการแตกหักในบริเวณนอกแนวเชื่อมในบริเวณกระแทกร้อน จากการตรวจสอบด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าประกอบด้วยรอยแตกที่มีลักษณะเป็นหลุมและมีรูพรุนจำนวนมาก พร้อมกับความเสียหายที่เกิดการแยกตัวตามขอบเกรนที่เห็นได้อย่างชัดเจน และมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากในโครงสร้างเมตริกซ์ในรูปแบบที่เป็นการแตกแบบเหนียว [22] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานเชื่อม ER90S-G และ ERNiCrMo-3 ที่อุณหภูมิ 550 °C และ 650 °C พบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน แต่ก็พบความแตกต่างของขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ที่ฝัวยรอยแตก โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะโครงสร้างเมตริกซ์รูพรุนที่ใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 550 °C อันเนื่องมาจากกระบวนการทดสอบไปได้ช่วงเวลาหนึ่งจะเกิดการตกผลึกของอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่ตามขอบเกรนบริเวณกระแทกร้อนวิกฤต และพบว่าอยู่ภายในรูพรุนของชิ้นงานที่เกิดการแตกหักแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 10 ชิ้นงานที่ได้รับความร้อนสูงจะเกิดการขยายตัวโดยที่อุณหภูมิ 650 °C เกิดการขยายตัวมากกว่าที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง รวมไปถึงชิ้นงานมีความเค้นกระทำอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้เป็นจุดที่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการคืบที่บริเวณดังกล่าว [23-24]

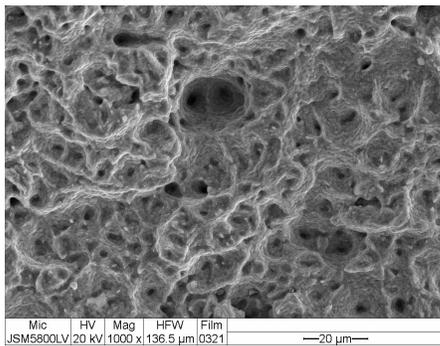
4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่สมบัติการคืบและการคาดคะเนอายุการใช้งานของการเชื่อมเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ที่ใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และโลหะเติมเกรด ERNiCrMo-3 ผลสรุปที่ได้มีดังนี้

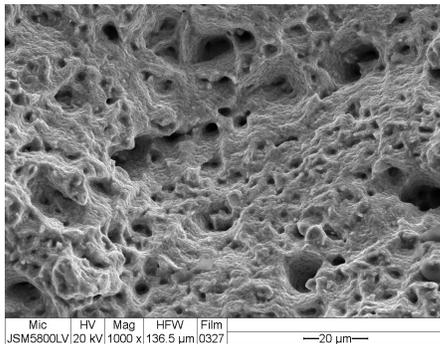
1. การประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และตัวอย่างทดสอบที่ใช้โลหะเติมเกรด ERNiCrMo-3 พบว่ามีลักษณะอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน

2. เมื่อเพิ่มระดับความเค้นในการทดสอบการคืบพบว่า มีแนวโน้มที่ทำให้เกิดอัตราการคืบคงที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ก็ทำให้ระยะเวลาที่ก่อให้เกิดการแตกหักลดลงตามระดับการเพิ่มขึ้นของความเค้น

3. ลักษณะผิวแตกหักหลังการทดสอบการคืบในชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้โลหะเติมเกรด ER90S-G และชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้โลหะเติมเกรด ERNiCrMo-3 มีลักษณะการแตกแบบเหนียวเหมือนกันแต่การทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่าจะเกิดการขยายตัวของขนาดรูพรุนที่กว้างกว่า

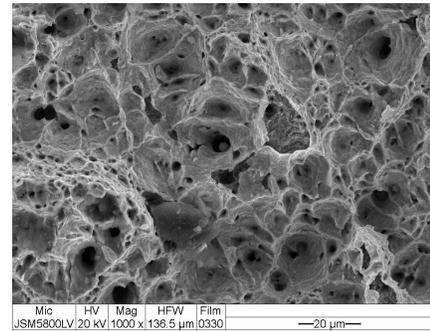


(ก)

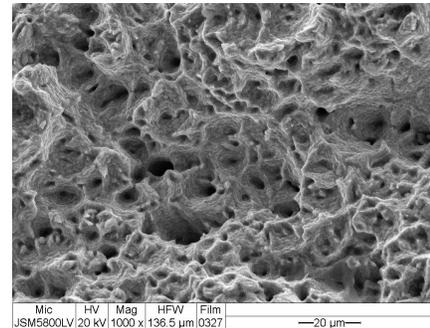


(ข)

รูปที่ 8 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวแตกหักจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 550 °C ที่ระดับความเค้น 210 MPa (ก) ER90S-G, (ข) ERNiCrMo-3

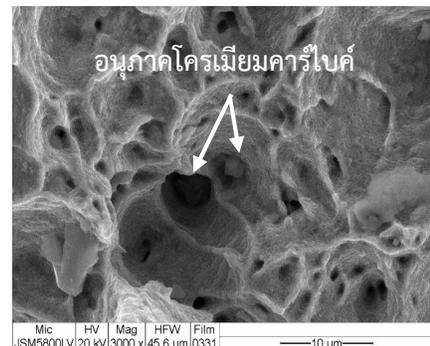


(ก)

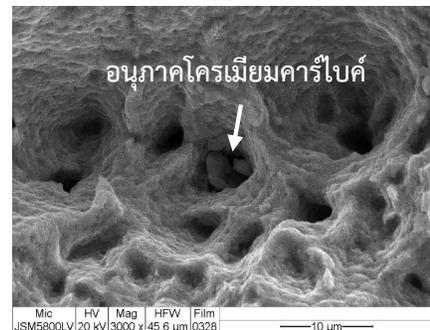


(ข)

รูปที่ 9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวแตกหักจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 650 °C ที่ระดับความเค้น 186 MPa (ก) ER90S-G, (ข) ERNiCrMo-3



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวอย่างอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 650 °C ที่ระดับความเค้น 186 MPa (ก) ER90S-G, (ข) ERNiCrMo-3

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้เขียนยังขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Song SH, Wu J, Wei XJ, Kumar D, Liu SJ, Weng LQ. Creep property evaluation of a 2.25Cr-1Mo low alloy steel. *Materials Science and Engineering*. 2010; 527(9): 2398-2403.
- [2] Lima WF, Rigueira G, Furtado HC, Lisboa MB, Almeida LH de, Lima WF, et al. Microstructure evolution and creep properties of 2.25Cr-1Mo ferrite-pearlite and ferrite-bainite steels after exposure to elevated temperatures. *Materials Research*. 2017; 20(2): 418-422.
- [3] Thong-On A, Boonruang C. Design of boiler welding for improvement of lifetime and cost control. *Materials*. 2016; 9(11): 1-16.
- [4] Fernández ARF, Alcántara NG. Analysis of the creep behavior and microstructure of PWHT steam piping exposed to service. *Materials Science and Engineering: A*. 2004; 371(1): 127-134.
- [5] Saga M, Iwasaki S, Tsurusaki Y, Hata S. Repair technologies of mechanical drive steam turbines for catastrophic damage. In *Proceedings of the 34th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories; 2005. p. 15-24.
- [6] Webster GA, Ainsworth RA. *High Temperature Component Life Assessment*, first ed. UK: Springer Science & Business Media; 1994.
- [7] Shankar V, Rao KBS, Mannan SL. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2001; 288(2): 222-232.
- [8] Donachie MJ, Donachie SJ. *Superalloys: A Technical Guide*, second ed. Materials Park, OH: ASM International; 2002.
- [9] Tammasophon N, Homkrajai W, Lothongkum G. Effect of postweld heat treatment on microstructures and hardness of TIG weldment between P22 and P91 steels with Inconel 625 filler metal. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2011; 21(1): 93-99.
- [10] ASTM E8/E8M-13. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2013.
- [11] Sawada K, et al. Catalog of NIMS creep data sheets. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2019; 20(1): 1131-1149.
- [12] Abe F, Kern TU, Viswanathan R. *Creep-Resistant Steels*. first ed. Abington, CA: Woodhead Publishing Limited; 2008.
- [13] Kassner ME. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. third ed. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann; 2015.
- [14] Bueno L, Sobrinho J. Correlation between creep and hot tensile behaviour for 2.25Cr-1Mo steel from 500°C to 700°C Part 1: an Assessment According to usual Relations Involving stress, temperature, strain rate and Rupture Time. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2011; 17(3): 1098-1108.
- [15] Dieter GE. *Mechanical Metallurgy*. third ed. US: McGraw-Hill; 1988.
- [16] Bueno LO. Creep Behaviour of 2.25 Cr-1Mo steel- An equivalence between hot tensile and creep testing data. In Shibli IA, Holdsworth SR, Merckling G. (eds.) *ECCC Creep Conference, 12-14 September 2005, London- Proc. Creep & Fracture in High Temperature Components- Design & Life Assessment Issues*. USA: DEStech Publ.; 2005. p. 969-980.
- [17] Whittaker MT, Wilshire B. Advanced procedures for long-term creep data prediction for 2.25

chromium steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013; 44(1): 136–153.

- [18] Laha K, Chandravathi K, bhanu sankara rao K, Mannan SL, Sastry DH. A comparison of creep rupture behaviour of 2.25 Cr-1Mo and 9Cr-1Mo steels and their weld joints. *High Temperature Materials and Processes*. 2000; 19(2): 141-150.
- [19] Fujibayashi S, Miura M, Togashi K. Life prediction of low alloy ferritic steels based upon the tertiary creep behavior. *ISIJ international*. 2004 44(5): 919–926.
- [20] Fujibayashi S, Kawano K, Komamura T, Sugimura T. Creep behavior of 2.25 Cr-1Mo steel shield metal arc weldment. *ISIJ international*. 2004; 44(3): 581–590.
- [21] Maruyama K, Abe F, Sato H, Shimojo J, Sekido N, Yoshimi K. On the physical basis of a Larson-Miller constant of 20. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018; 159: 93–100.
- [22] Goyal S, Laha K, Chandravathi KS, Parameswaran P, Mathew MD. Finite element analysis of type IV cracking in 2.25 Cr–1Mo steel weldment based on micro-mechanistic approach. *Philosophical Magazine*. 2011; 91(23): 3128–3154.
- [23] Chen K, Xu Y, Song S. Effect of impurity antimony on the creep behavior of 2.25 Cr-1Mo heat-resistant steel. *Results in Physics*. 2019; 13: 102208.
- [24] Petchsang S, Phung- on I, Poopat B. Life assessment for Cr–Mo steel dissimilar joints by various filler metals using accelerated creep testing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016; 25: 5424–5439.