

ขบวนการเพิ่มสัดส่วน CSL โดยควบคุมขนาดเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Grain boundary engineering by control grain size process in 316L stainless steel

มงคล แหยมทองคำ¹ และ ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ติดต่อ: E-mail : panyak110@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-326-4197, เบอร์โทรสาร 02-326-4198

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบขบวนการทางความร้อนเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ให้มีขนาดเกรนควบคุม 60 ไมโครเมตร และมีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษแตกต่างกัน โดยใช้ความเครียดระดับต่ำ จากนั้นทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน เป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อดูผลกระทบของความเครียดและอุณหภูมิในการอบต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคและเปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษ ขบวนการทางความร้อนเชิงกลเริ่มจากการปรับโครงสร้างจุลภาคเดียวกัน ด้วยกระบวนการความร้อนเพื่อสลายคาร์ไบด์ ขึ้นงานอ้างอิงที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการสะสมพลังงานความเครียดแบบยืดหยุ่น ด้วยวิธีการดึงยืดตัว 40% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100 และ 1125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ได้ขนาดเกรน 60 และ 80 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งขบวนการข้างต้นเรียกว่า “ขบวนการซิงเกิลสเตปรีคริสตัลไรเซชัน” จากนั้นนำชิ้นงานที่มีขนาด 80 ไมโครเมตร ไปผ่านการขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีการดึงยืดตัว 40% และอบอ่อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1030 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ขนาดเกรน 60 ไมโครเมตร เรียกขบวนการทำซ้ำนี้ว่า “ขบวนการอิเทอร์เรทีฟรีคริสตัลไรเซชัน” ผลการทดลองเปรียบเทียบสัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษด้วยเทคนิค EBSD พบว่า มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษทั้งหมดที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอิเทอร์เรทีฟรีคริสตัลไรเซชันเท่ากับ 42.26%, ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการซิงเกิลสเตปรีคริสตัลไรเซชันเท่ากับ 32.34% และชิ้นงานอ้างอิงเท่ากับ 23.36% ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีขนาดเกรนควบคุมเดียวกันที่ 60 ไมโครเมตร ผลดังกล่าวแสดงผลกระทบของกระบวนการก่อนหน้าในการทำวิศวกรรมขอบเกรน

คำหลัก: ขอบเกรน, สัดส่วนของขอบเกรนชนิดพิเศษ, ขบวนการความร้อนเชิงกล

Abstract

This research has a purpose to design the thermomechanical process of 316L austenitic stainless steel have grain size of 60 microns and different percentage of coincidence-site-lattice boundary (CSL) are using low stress then those are annealing in various temperatures at period of time. To observe the effect of stress and temperature are annealing on microstructure changes and

percentage of CSL. Thermomechanical process start from improvement the identically microstructure with solution anneal method of reference specimen at 1200 °C for 1 hour. After that, give passing be compound with elastic strain energy process by tensile test for 40% elongation and used temperature at 1100 and 1125 °C for annealing take to 10 minutes obtained 60 and 80 microns grain size respectively. The process above was calling “Single step recrystallization process”. Then, take 80 microns specimen through to a cold working process at 40% elongation and annealing temperature at 1030 °C to obtain a grain size of 60 microns, this repeat process is calling “ Iterative recrystallization process”. The results for the comparison of grain boundaries by EBSD technique showed that: percentage of total CSL were different for specimen of iterative recrystallization process was 42.26%, specimen of single step recrystallization process was 32.34% and as-receives specimen was 23.36%. Which specimens had the same grain to controlled size of 60 microns. The results showed the impact of previous process on grain boundary engineering.

Keywords: Grain boundary, Coincidence-site-lattice boundary (CSL), thermomechanical process

1. บทนำ

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเพิ่มมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม เช่น การสร้างโรงไฟฟ้า การทำท่อส่ง หรือ อุปกรณ์เครื่องจักรในโรงงานต่างๆ รวมถึงการก่อสร้างตึก อาคาร สำนักงาน ฯลฯ เพราะมีคุณสมบัติในการต้านการสึกกร่อนและป้องกันการเกิดสนิมที่ดีกว่าเหล็กกล้าทั่วไป อีกทั้งยังมีความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมก็ยังสามารถเกิดความเสียหายขึ้นได้จากการกัดกร่อนเนื่องจากปัจจัยที่มีสิ่งแวดล้อมเป็นตัวเหนี่ยวนำ เช่น การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) เป็นต้น [1] อีกทั้งการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้งานในสภาวะที่ไม่เหมาะสมหรือสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปก็สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เพราะเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีอายุการใช้งานได้ดีในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเกรนนั้นๆเท่านั้น [2] จึงต้องมีการเปลี่ยนหรือซ่อมบำรุงอยู่เสมอ ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

มีการวิจัยเกี่ยวกับผลของตัวแปรต่างๆ ในการพัฒนาโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยวิธีการให้ความร้อนเชิงกล ซึ่งก็คือการให้ความร้อนเชิงกล ซึ่งพบว่าการให้ความเครียดระดับต่ำ แล้วนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิระดับต่ำๆ [3] ทำให้วัสดุมีความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่ดีที่สุดซึ่งสืบเนื่องมาจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของขอบเกรนแบบพิเศษ (CSL) ที่มีปริมาณมากและเหมาะสม ขอบเกรนแบบพิเศษจะไปแทรกอยู่ระหว่างขอบเกรนแบบสุ่ม ทำให้ขอบเกรนแบบสุ่มไม่ต่อเนื่องกันและทำให้วัสดุมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

ในการพัฒนาโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยให้ความร้อนเชิงกล [4] พบว่า การให้ความเครียดระดับต่ำ 3% ที่อุณหภูมิ 1240 °K เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะเกิดสัดส่วนของขอบเกรนแบบพิเศษถึง 86% ซึ่งจากการทดสอบด้วยกรด พบว่าสัดส่วน CSL ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการสึกกร่อนน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นในการออกแบบขบวนการความร้อนเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

โดยให้ความเครียดระดับต่ำ อบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆกัน เป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อดูผลของการให้ความเครียดและอุณหภูมิในการอบว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคอย่างไร เมื่อผ่านขบวนการความร้อนเชิงกลในแต่ละขั้นตอน เพื่อเตรียมชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มสัดส่วนของขอบเกรนชนิดพิเศษ หรือ Coincidence -site-lattice boundaries (CSLB)



รูปที่ 2 ชิ้นงานหลังกระบวนการสลายคาร์ไบด์

2. การเตรียมชิ้นงานและขั้นตอนการทดลอง

เตรียมชิ้นงานอ้างอิงโดยนำเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ตัดให้ได้ความยาว 12 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการความร้อนเพื่อสลายคาร์ไบด์ (Solution heat treatment) ที่อุณหภูมิ 1200 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสลายคาร์ไบด์นำไปเข้าสู่กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical) โดยนำไปดึงระยะยืด 40% ซึ่งคำนวณจากสมการ

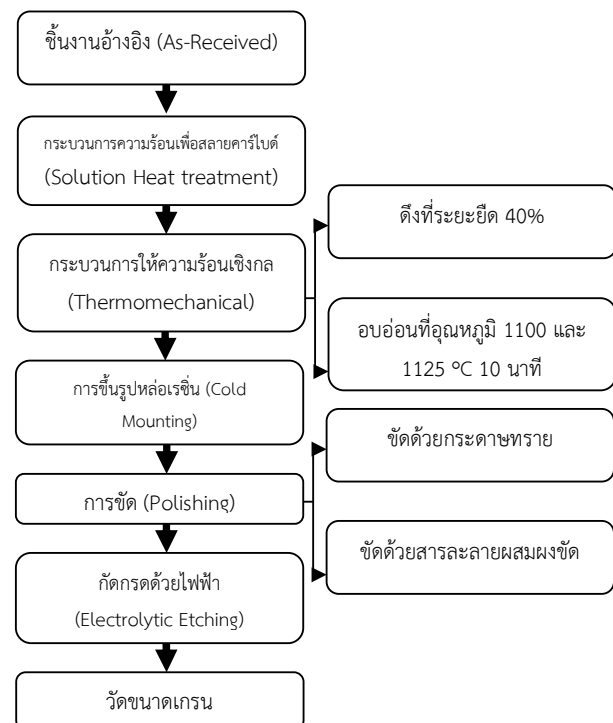
$$\%EA = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

ซึ่ง L_f คือ ความยาวหลังจากการยืด และ L_0 คือความยาวเริ่มต้น

จากนั้นนำชิ้นงานไปขึ้นรูปหล่อเรซิน ทำการขัด กัดกรดด้วยไฟฟ้าและหาขนาดเกรน ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเรียกว่ากระบวนการของ Single-step recrystallization

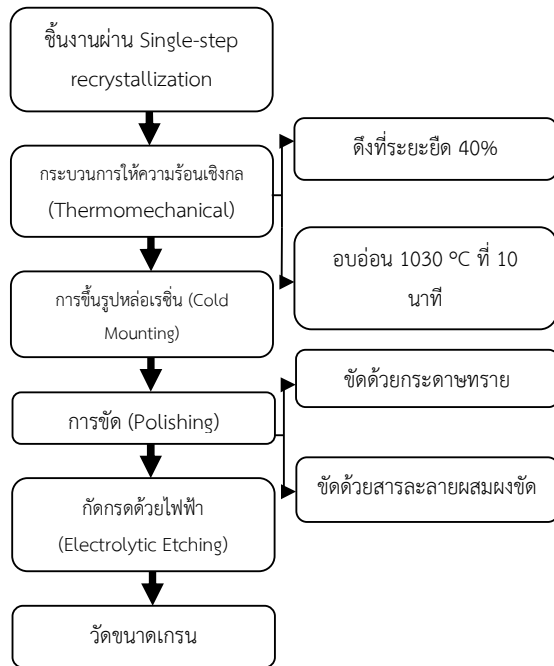


รูปที่ 1 ชิ้นงานอ้างอิง (As-Received)



รูปที่ 3 กระบวนการของ Single-step recrystallization

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการของ Single-step recrystallization ที่มีขนาดเกรน 80 ไมโครเมตร นำมาซ้ำอีกครั้งหนึ่งเรียกว่า กระบวนการของ Iterative recrystallization ดังรูปที่ 4

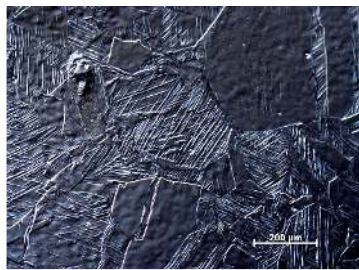


รูปที่ 4 กระบวนการของ Iterative recrystallization

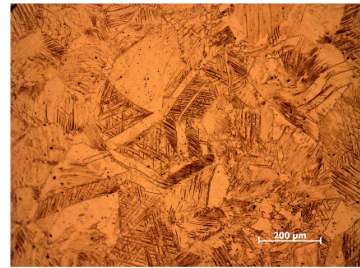
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองของการเตรียมชิ้นงานกระบวนการ Single-step recrystallization

จากรูปที่ 5-8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการดิ่งระยะยืด 40%



รูปที่ 5 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านการอบอ่อน



รูปที่ 6 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบอ่อน 900 องศาเซลเซียส 10 นาที



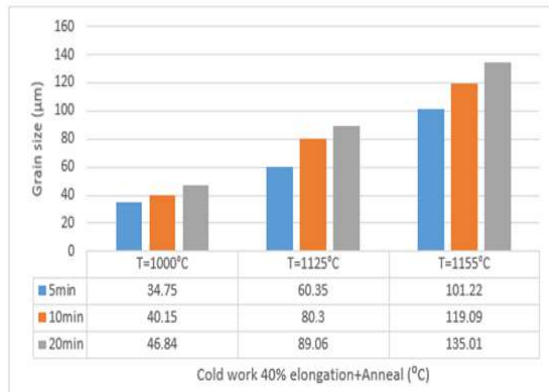
รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบอ่อน 950 องศาเซลเซียส 10 นาที



รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบอ่อน 1100 องศาเซลเซียส 10 นาที

จากการทดลองพบว่า ขนาดเกรนที่ไม่ได้ทำการอบอ่อน จะมีขนาดโตขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากการอบอ่อน จนกระทั่งอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ขนาดเกรนจะมีขนาดเล็กลงมาก และเมื่ออบที่อุณหภูมิมากขึ้นอีก ขนาดเกรนก็เริ่มโตขึ้นอีกครั้ง จึงสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิระหว่าง 900-950 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

3.1.1 ตรวจสอบขนาดเกรนของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000, 1125 และ 1155 องศาเซลเซียส



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับ
กระบวนการทางวิศวกรรมขอบเกรน ที่อุณหภูมิ 1000,
1125 และ 1155 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 9 แสดงขนาดเกรนที่อบอ่อนอุณหภูมิ
และเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าการอบอ่อนอุณหภูมิ
เดียวกันแต่เวลาต่างกัน เมื่อเวลามากขึ้นขนาดเกรนก็
จะมีขนาดโตขึ้น และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเท่ากัน
แต่อุณหภูมิแตกต่างกัน ก็จะได้เห็นได้ว่า การอบ
อ่อนอุณหภูมิสูงขึ้น การโตของเกรนก็จะโตขึ้นเช่นกัน
หรือเรียกว่าอัตราการโตขึ้นของเกรนเร็วขึ้น เมื่ออุณหภูมิ
มากขึ้น

3.2 ผลการทดลองของการเตรียมชิ้นงานกระบวนการ Iterative recrystallization

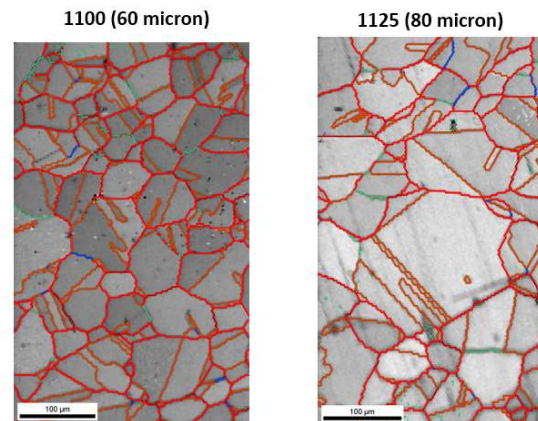
นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการของ Single-step
recrystallization ที่มีขนาดเกรน 80 ไมโครเมตรมา
ทำซ้ำอีกรอบตามรูปที่ 4 เพื่อให้ได้ขนาดเกรน 60
ไมโครเมตร ได้โครงสร้างออกมาดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่
ขนาดเกรนเริ่มต้น 80 ไมโครเมตร ที่ผ่านการดิงระยะยืด
40% และอบอ่อนที่ 1030 องศาเซลเซียส 10 นาที

3.3 สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษ

3.3.1 ชิ้นงาน ที่ผ่าน กระบวนการ Single-step recrystallization

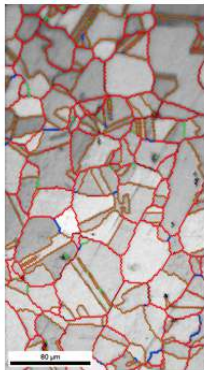


รูปที่ 11 ขอบเกรนชนิดพิเศษระหว่างการอบ
อ่อนที่ 1100 องศาเซลเซียส กับ 1125 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบสัดส่วนขอบเกรนชนิด
พิเศษพบว่า เปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนอยู่ที่ 32.34%
กับ 23.72% ของการอบอ่อนที่ 1100 องศาเซลเซียส กับ
1125 องศาเซลเซียสตามลำดับ

3.3.2 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Iterative recrystallization

1030 (60 micron)



รูปที่ 12 ขอบเกรนชนิดพิเศษระหว่างการอบอ่อนที่ 1030 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษของการอบอ่อนที่ 1030 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 42.26%

4. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบขบวนการทางความร้อนเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ให้มีขนาดเกรนควบคุม 60 ไมโครเมตร พบว่า มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฮีทเทรทีฟรีคริสตัลไรเซชันเท่ากับ 42.26%, ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชิงเกิลสเตปรีคริสตัลไรเซชันเท่ากับ 32.34% และชิ้นงานอ้างอิงเท่ากับ 23.36%

และจากการเตรียมชิ้นงานพบว่าขนาดเกรนจะโตขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากการอบอ่อน แต่เมื่อถึงอุณหภูมิ Recrystallization จะทำให้เกิดเกรนใหม่ที่เล็กและละเอียด และเมื่ออบที่อุณหภูมิมากขึ้นอีก ขนาดเกรนก็เริ่มโตขึ้นอีกครั้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุสุวรรณ ในการแนะนำให้ขอเสนอแนะ และแนวคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอขอบคุณ Materials Laboratory ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ทำให้บทความฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Suresh Kumar, M. Sujata, M.A. Venkataswamy, S.K. Bhaumik. (2008), Failure analysis of stainless steel pipeline. Eng Fail Anal; 15(5): pp.547-565
- [2] Magdy A.M. Ibrahim, S.S. Abd El Rehim, M.M Hamza. (2009), Corrosion behavior of some austenitic stainless steels in chloride environments. Materials Chemistry and Physics;15(1): pp.80-5.
- [3] M. Shimada et al. (2002), Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin-included grain boundary engineering. Sendai Japan: Tohoku University
- [4] M. Michiuchi et al. (2006), Twin-induced grain boundary engineering for 316 austenitic stainless steel. Sendai Japan: Tohoku University