



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

Effects of Heat Treatment on Residual Stress and Fatigue Properties of Deep Rolled Martensitic Stainless Steel AISI 420

นามผู้วิจัย นายทศพร นิมิตรบัญชา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของ
เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

Effects of Heat Treatment on Residual Stress and Fatigue Properties of Deep Rolled
Martensitic Stainless Steel AISI 420

โดย

นายทศพร นิมิตรปัญญา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทศพร นิมิตรบัญชา 2557: ผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชา วิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing. 66 หน้า

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก AISI 420 เป็นเหล็กที่มีการใช้งานในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ งาน โครงสร้างต่างๆ ซึ่งต้องรับภาระทางกลสูง อีกทั้งยังได้รับแรงกระทำแบบซ้ำๆ เป็นวัฏจักร ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแบบความล้าขึ้น จึงต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อยืดอายุการใช้งาน กระบวนการรีดผิวเรียบเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกลชนิดหนึ่งที่เกิดการแปรรูปอย่างถาวรที่ผิว ทำให้เกิดความเค้นกดตกค้างและเกิดความแข็งโดยการแปรรูป เป็นผลทำให้อายุการใช้งานในลักษณะเป็นแบบวัฏจักรยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้งานในรูปแบบวัฏจักรไปเรื่อยๆ พบว่าความเค้นกดตกค้างที่ผิวลดลง เป็นผลมาจากการคลายตัวของความเค้นตกค้าง จึงได้มีการนำกรรมวิธีทางความร้อนมาใช้เพื่อให้ค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวยังคงอยู่ได้นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ โดยนำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 300 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5-35 นาที แล้วตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างและความแข็งจากการแปรรูป จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบการต้านทานความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุน จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนส่งผลให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก มีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการคลายตัวของความเค้นตกค้าง อย่างไรก็ตามค่าการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่ผ่านการอบในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที พบว่ามีค่าความต้านทานต่อความล้าสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกของการบ่มเครียด

ลายมือชื่อนิติศ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Tossaporn Nimitbunchar 2014: Effects of Heat Treatment on Residual Stress and Fatigue Properties of Deep Rolled Martensitic Stainless Steel AISI 420. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Patiphan Juijerm, Dr.-Ing. 66 pages.

Martensitic stainless steel AISI 420 is widely used in automotive industry, high-loading and cyclic-loading condition. Thus, its surface should be modified to enhance performance. Thermo-mechanical surface treatment such as heat treatment after deep rolling process attributed to the formation of compressive residual stress and strain hardening in near surface layers to enhance fatigue properties. Therefore, the optimization of heat treatments on a deep rolled martensitic stainless steel AISI 420 has been investigated. The annealing process was performed in the temperature range of 200-300°C with soaking times between 5-35 min. Residual stresses and FWHM-values were determined using X-ray diffraction method. The fatigue tests were performed using a rotating bending fatigue machine. It was found that the residual stresses and FWHM-values decrease with increasing annealing temperatures and times. However, on the other hand, the annealing process at a temperature of 250°C for about 25 min shows beneficial effects on the fatigue lifetimes because of a strain aging concept. Thus, higher fatigue lifetime can be expected as compared to the deep rolled condition.

Student's signature

_____ / _____ / _____

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาและวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรรมการที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยและบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมสั่งสอน ดูแล ช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ทศพร นิมิตรบัญชา

พฤษภาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	24
ผล	24
วิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	42
สรุป	42
ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	44
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก ค่าความเค้นตกค้าง	47
ภาคผนวก ข ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก	53
ภาคผนวก ค ผลการต้านทานต่อความล้า	59
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบผลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล	15
2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ใช้ในการวิจัย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	20
ตารางผนวกที่		
ก1	ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	48
ก2	ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	49
ก3	ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	50
ก4	ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	51
ก5	ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	52
ข1	ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิกของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	54
ข2	ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิกหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	55
ข3	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิก 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	56
ข4	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิกหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข5 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคหลังอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	58
ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ	60
ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	61
ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 หลังผ่านการรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที	62
ค4 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสที่เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	63
ค5 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	64
ค6 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสที่เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	65

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดต่าง ๆ	8
2	หลักการของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิว โดยกระบวนการทางกล (ก) เกิดการแปรรูปแบบถาวรบริเวณผิว (ข) เกิดความเครียดบริเวณผิว (ค) บริเวณผิวไม่สามารถยืดออกได้ เกิดความเค้นตกค้างที่บริเวณผิว	9
3	ลักษณะการทำงานของกระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ	10
4	ลักษณะการทำงานของกระบวนการยิงด้วยเลเซอร์	11
5	ลักษณะของกระบวนการรีดผิวเรียบ (ก) แผนภาพ (ข) การติดตั้งจริง	12
6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบและยังไม่ได้ผ่านการรีดผิวเรียบ (ก) AISI 420 (ข) SAE 1045	13
7	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 หลังผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล	13
8	เปรียบเทียบความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างในชิ้นงาน AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการรีดผิวเรียบและการยิงลูกเหล็ก	14
9	การคลายตัวของความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 เนื่องจาก (ก) แรงทางกล (ข) ความร้อน	16
10	การจัดวางดิสโคเคชั่นของอะตอมคาร์บอนหรือไนโตรเจน	17
11	ปรากฏการณ์ การบ่มเครียดในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	18
12	การให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆของวัสดุ (ก) SAE 1045 (ข) AISI 304	19
13	ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E466-96	21
14	แผนภาพงานวิจัยผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	22
15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ	24

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	25
17	ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิคของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	26
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	27
19	ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	28
20	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	28
21	ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	29
22	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	29
23	ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	30
24	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที	31
25	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	32
26	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	34
28	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบและยังไม่ได้รีดผิวเรียบ	36
29	ค่าความเค้นตกค้างหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	37
30	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ	37
31	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบ โดยทดสอบที่ ความเค้นแอมปริจูดเท่ากับ 525 เมกะปาสกาล	38
32	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ใน 3 เงื่อนไข คือ (1) ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ (2) ผ่านการรีดผิวเรียบ และ (3) รีดผิวเรียบแล้วอบที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที	39
33	การเปรียบเทียบความลึกลำความเค้นกดตกค้างระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบและรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที	40
34	การเปรียบเทียบความลึกลำความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกระหว่างเหล็กกล้า ไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบและรีดผิวเรียบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที	41

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T	=	อุณหภูมิในการอบ
°C	=	องศาเซลเซียส
t	=	เวลาในการอบ
s	=	วินาที
min	=	นาที
HRC	=	Hardness of rockwell
MPa	=	เมกะปาสกาล
σ_a	=	ความเค้นแอมปริจูด
ϕ	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)
R	=	รัศมี (มิลลิเมตร)

ผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้า
ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

Effects of Heat Treatment on Residual Stress and Fatigue Properties
of Deep Rolled Martensitic Stainless Steel AISI 420

คำนำ

ในปัจจุบันความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลไม่ว่าจะในอุตสาหกรรม หรือทางการทหารมักเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue failure) เป็นส่วนใหญ่ สาเหตุมาจากภาระงานที่มากกระทำต่อวัสดุโลหะหรือส่วนประกอบในเครื่องจักรจะเป็นแบบวัฏจักร หรือเป็นแรงแบบซ้ำๆ (Cyclic loading) จึงทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ในขณะที่วัสดุได้รับแรงกระทำแบบซ้ำๆนั้นจะทำให้เกิดจุดศูนย์กลางของความเค้นขึ้นที่บริเวณผิว (Stress concentration) ส่งผลทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรนั้นเริ่มเกิดความเสียหายจุดเริ่มต้นของความเสียหายจากความล้าโดยส่วนมากจะเริ่มต้นที่ผิว โดยที่ผิวจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (Crack initiation) แรงที่ใช้ในการเปิดรอยแตกบริเวณที่ผิวคือแรงดึง (Tensile stress) และเมื่อชิ้นงานยังคงถูกใช้งานแบบวัฏจักรไปเรื่อยๆ รอยร้าวจะเริ่มขยายตัวมากขึ้น (Crack propagation) ลุกลามเข้าไปภายในชิ้นงานทำให้พื้นที่ในการรับแรงของวัสดุหรือชิ้นงานลดลง เมื่อภาระงานที่มากกระทำต่อวัสดุยังคงเกิดอย่างต่อเนื่อง แต่พื้นที่รับแรงมีขนาดลดลงส่งผลทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายในที่สุด ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้จะไม่ส่งสัญญาณเตือนออกมา และไม่สามารถตรวจสอบได้ หรือทำการตรวจสอบได้ยาก จึงเป็นอันตรายต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก

หากมีกระบวนการที่สามารถทำให้บริเวณผิวมีความสามารถต้านทานแรงดึงได้จะส่งผลทำให้การเริ่มเกิดรอยแตกร้าวขึ้นที่ผิวได้ยากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยทำให้ที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีความเค้นกดตกค้าง (Compressive residual stress) เพื่อช่วยสร้างความต้านทานแรงดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิว ทำให้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ผิวลุกลามต่อไปได้ยาก การเพิ่มความเค้นกดตกค้างที่ผิวสามารถทำได้โดยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล (Mechanical surface treatment) เช่น กระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ (Shot peening) หรือ กระบวนการรีดผิวเรียบ (Deep rolling) จะช่วยทำให้ที่บริเวณผิวมีความเค้นกดตกค้างขึ้น สามารถต้านทานการเกิดรอยร้าวที่บริเวณผิว และทำให้ที่

บริเวณผิวมีปริมาณของดิสโลเคชัน (Dislocation) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการขัดขวางกันเองของดิสโลเคชัน ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้ที่ผิวมีความแข็งแรงจากการแปรรูปเพิ่มขึ้น (Work hardening) เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานที่ถูกใช้งานในลักษณะเป็นแบบวัฏจักรยาวนานขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าลดลง (Juijerm, 2007)

อย่างไรก็ตามเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาใช้งาน จะมีทั้งแรงทางกลและ/หรือความร้อน (Mechanical and thermal loading) เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ดิสโลเคชันที่อยู่บริเวณผิวของวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ (Dislocation movement) การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการคลายตัวของความเค้นกดดกค้างที่ผิวของวัสดุ (Residual stress relaxation) (Weizhi *et al.*, 2009) ทำให้วัสดุมีความเค้นกดดกค้างที่ผิวลดลง ส่งผลทำให้ที่บริเวณผิว มีแรงที่ใช้ในการต้านแรงดึงลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวลดลง และทำให้วัสดุหรือชิ้นงานเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้ จึงได้มีแนวความคิดที่จะทำดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก เพื่อลดการคลายตัวของความเค้นกดดกค้างที่ผิว ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยแตกเร็วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้ามากขึ้น โดยอาศัยหลักการ การบ่มเครียด (Strain ageing) (Dieter, 1961) ซึ่งอะตอมในโครงสร้างของโลหะจำพวก คาร์บอนและไนโตรเจน จะไปล้อมรอบดิสโลเคชัน ทำดิสโลเคชันถูกตรึง (Lock/Pin) เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น หากดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก นั้นหมายถึงจะทำให้ความเค้นกดดกค้างที่บริเวณผิวมีความคงตัวมากยิ่งขึ้น และจะส่งผลทำให้ความสามารถต้านทานการเกิดรอยแตกเร็วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานยาวนานขึ้น ทั้งนี้ปัจจัยในการทำให้เกิดผลของการบ่มเครียด คือ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากการให้ความร้อนจะทำให้อะตอมที่ผสมอยู่ภายในโครงสร้างของโลหะเข้าไปล้อมรอบดิสโลเคชันเป็นผลทำให้เกิดการบ่มเครียดขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการให้ความร้อนจะทำให้ดิสโลเคชันที่บริเวณผิวของโลหะเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น (Recovery) ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้เกิดการลดลงของค่าความเค้นกดดกค้าง มีผลแนวโน้มจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนนั้นสั้นลง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อย่างเหมาะสมในการให้ความร้อน เพื่อให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 เพื่อเพิ่มความ

ต้านทานต่อความล้า เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรม และทางการแพทย์ ซึ่งต้องรับภาระงานทางกลสูง และมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมของกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้ค่าความต้านทานความล้าสูงที่สุดของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการรีดผิวเรียบ

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป เป็นที่นิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานก่อสร้าง อุตสาหกรรมหรือแม้กระทั่งด้านการแพทย์ เหล็กกล้าไร้สนิมนอกจากธาตุเหล็ก (Fe) ที่เป็นธาตุหลักและธาตุผสมอื่นๆ เช่น คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) แล้วยังมีการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และ/หรือ วานาเดียม (V) ลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยธาตุผสมหลักที่มีการเติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนคือ โครเมียม โครเมียมจะถูกเติมในปริมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดเป็นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เคลือบที่ผิวทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมยากที่จะเกิดสนิม นอกจากนี้การเติมธาตุผสมนั้นยังส่งผลต่อโครงสร้างผลึก ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็ก เช่น การต้านทานแรงดึง การยืด ความแข็ง และความเหนียว โดยสิ่งสำคัญที่ทำให้โครงสร้างผลึกของเหล็กมีความแตกต่างกันคือ ลักษณะของแลตทิซ (Lattice) เฟสทรานซิชัน (Phase transition) และองค์ประกอบทางเคมี โดยการเติมโครเมียมทำให้โครงสร้างผลึกเป็นเฟอร์ไรต์ หรือก็คือโครงสร้างผลึกแบบบอดี – เซ็นเตอร์ – คิวบิก (Body – center – cubic, BCC) และนิกเกิลทำให้โครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์ หรือก็คือโครงสร้างแบบเฟส – เซ็นเตอร์ – คิวบิก (Faced – center – cubic, FCC) แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิช่วง 910 – 1400 องศาเซลเซียส โครงสร้างแลตทิซในเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นจะเปลี่ยนเป็นแบบ เฟส – เซ็นเตอร์ – คิวบิก ทั้งหมด (Bhadeshia and Honeycombe, 2006)

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มคูเพิล็กซ์ (Duplex stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึก (Precipitation-hardenable stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) และเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) (Davis, 2000)

1.1 กลุ่มเฟอร์ริติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครเมียม ประมาณ 12-18เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงปานกลางแต่มีค่าความยืดสูง เช่น เกรด 430 และ 409 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสียและในบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อใช้กับงานที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

1.2 กลุ่มดูเพล็กซ์

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ 18-28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิลประมาณ 4.5-8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวสูง เหมาะสำหรับใช้ทำตัวคลาษอุณหภูมิจนถึงบรรจุสารเคมี โรงกลั่นต่างๆ เป็นต้น ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ เช่น เกรด 2304, เกรด 2205, เกรด 2507 เป็นต้น

1.3 กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก

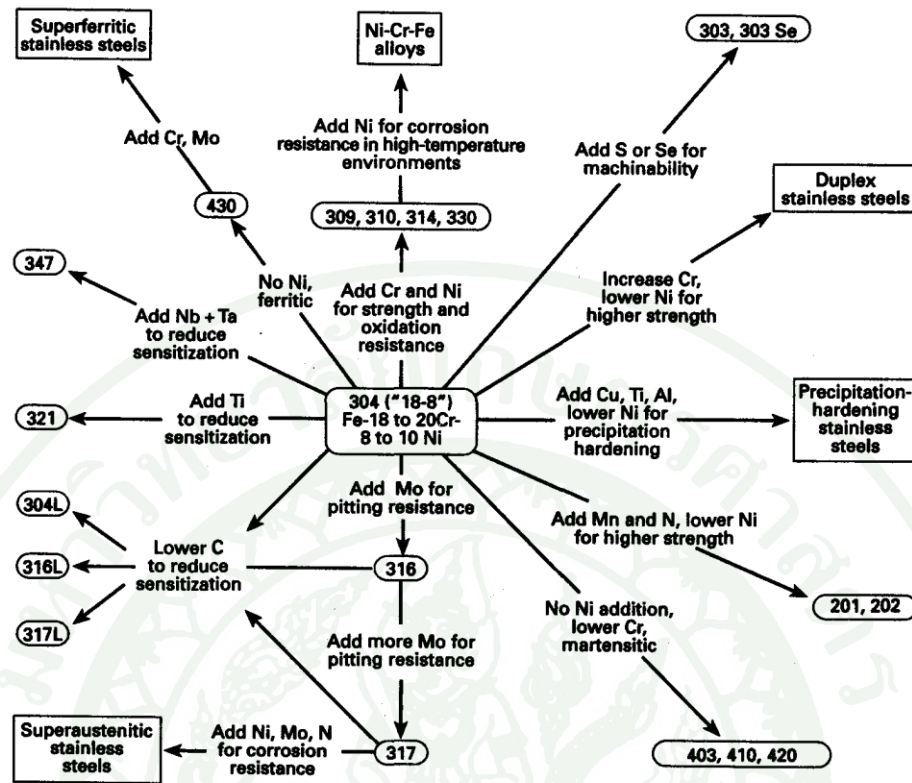
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครเมียมผสมประมาณ 15-18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิลอยู่ประมาณ 3-8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความแข็งแปรผัน สามารถทำการชุบแข็งได้ มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ทนการกัดกร่อนได้ปานกลางและมีความแข็งแรงสูง จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปัม หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น PH13-9Mo และ AM-350 เป็นต้น

1.4 กลุ่มออสเทนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนี้เป็นเหล็กที่มีโครเมียม นิกเกิล และแมงกานีสเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณของธาตุคาร์บอนไม่เกิน 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่น AISI 201 AISI 304 และ AISI 316 เป็นต้น ไม่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูง เหมาะสำหรับใช้งานด้านสุขอนามัย หม้อ ช้อน และถาดต่างๆ เป็นต้น

1.5 กลุ่มมาร์เทนซิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกนี้มีโครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) ประกอบด้วยโครเมียม 12 – 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางและมีธาตุอื่นผสมบ้างเล็กน้อย เช่น แมงกานีส นิกเกิล ซิลิกอน เป็นต้น เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลอื่นให้ดีขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถชุบแข็งได้และมีการปรับส่วนผสมให้สมบัติทางด้านความแข็งและความแข็งแรงสมดุลกันจึงมีความทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและกลุ่มออสเทนนิติก โดยจะใช้กับงาน โครงสร้าง ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น (Callister, 2000) ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ เช่น AISI 440A, AISI 440B, AISI 440C, AISI 403, AISI 420 เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มมาร์เทนซิติกเนื่องจากสามารถชุบแข็งได้ มีความแข็งแรงสูง เหมาะกับการนำไปใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์และโครงสร้างต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้



ภาพที่ 1 การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดต่าง ๆ

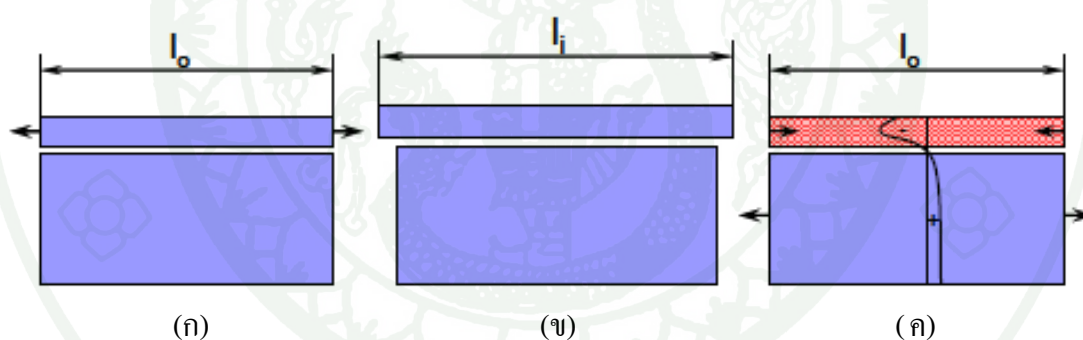
ที่มา: Davis (2000)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 420 จัดเป็นทั้งเหล็กกล้าเครื่องมือและเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก ซึ่งมีความต้านทานแรงดึงสูง มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี เหมาะสำหรับงานแม่พิมพ์ที่มีสภาวะการกัดกร่อนเกิดขึ้น เพลลา สกรู มีด และชิ้นส่วนอะไหล่ที่ต้องการความแข็งแรงสูง สามารถทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้จึงทนต่อการสึกหรอได้ดี สามารถชุบแข็งที่อุณหภูมิ 980-1050 องศาเซลเซียส ชุบด้วยน้ำหรือน้ำมันให้มีความแข็งสูงได้ถึง 56 HRC (Chandler, 1995)

เหล็กกล้าไร้สนิมนั้นเป็นเหล็กที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่เมื่อนำมาใช้งานซึ่งต้องรับภาระทางกลที่สูง ทำให้ต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มสมบัติของพื้นผิวในด้านต่างๆ ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล

2. กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล

กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกลเป็นกระบวนการที่ใช้แรงทางกลกระทำที่บริเวณผิวเป็นผลให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) แต่บริเวณผิวไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระเนื่องจากถูกยึดด้วยเนื้อโลหะ (Substate) ได้บริเวณผิวซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากแรงกระทำจึงไม่เกิดการแปรรูป โดยผลจากปฏิกิริยาระหว่างบริเวณที่เกิดการแปรรูปอย่างถาวรและบริเวณที่เกิดการแปรรูปไม่ถาวร ดังแสดงในภาพที่ 2 เป็นผลให้เกิดความเค้นกด เพื่อช่วยสร้างความต้านทานแรงดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิว รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ผิวลุกลามต่อไปได้ยาก สามารถต้านทานการเกิดรอยร้าวที่บริเวณผิวได้ และทำให้ที่บริเวณผิวมีปริมาณของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการขัดขวางกันเองของดิสโลเคชัน ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ที่ผิวมีความแข็งแรงจากการแปรรูปเพิ่มขึ้น (Schulze, 2006) เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานที่ถูกใช้งานในลักษณะเป็นแบบวัฏจักรยาวนานขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าลดลง และช่วยในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานความล้า (Fatigue strength)



ภาพที่ 2 หลักการของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล

- (ก) เกิดการแปรรูปแบบถาวรบริเวณผิว
- (ข) เกิดความเค้นบริเวณผิว
- (ค) บริเวณผิวไม่สามารถยืดออกได้ เกิดความเค้นตกค้างที่บริเวณผิว

ที่มา: Juijerm (2007)

กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกลมีหลายวิธี เช่น การยิงด้วยเม็ดโลหะ การยิงด้วยเลเซอร์ (Laser shock peening) และการรีดผิวเรียบ หลักการทำงานและรายละเอียดต่างๆมีดังนี้

2.1 กระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ

เป็นกระบวนการที่ใช้เม็ดโลหะหรือเซรามิกกระทำที่ผิวของชิ้นงาน สามารถทำได้รวดเร็วและใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้ แต่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ได้นั้นจะไม่เรียบ เนื่องจากที่บริเวณผิวจะถูกกระแทกด้วยเม็ดโลหะระหว่างขั้นตอนการดำเนินการ ส่งผลให้บริเวณผิวขรุขระ ลักษณะการทำงานดังแสดงในภาพที่ 3

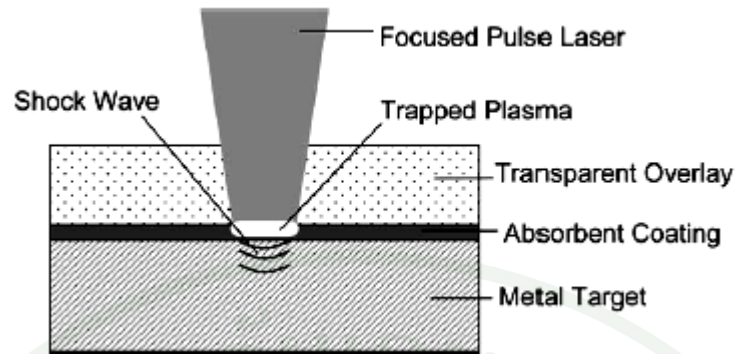


ภาพที่ 3 ลักษณะการทำงานของกระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ

ที่มา: Juijerm (2007)

2.2 กระบวนการยิงด้วยเลเซอร์

เป็นกระบวนการที่ใช้เลเซอร์ในการยิงอัดไปที่บริเวณผิวของชิ้นงานหรือโลหะ โดยชิ้นงานจะต้องผ่านการทาสีที่บริเวณผิวก่อน เพื่อให้เลเซอร์กระทบกับสีที่ทาเอาไว้ทำให้เกิดเป็นพลาสมาขึ้น ซึ่งพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกอัดเข้าไปในชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งลึกเข้าไปในชิ้นงานค่อนข้างมากเนื่องจากเป็นรูปแบบของพลังงานทำให้การแทรกซึมเข้าไปได้ดี โดยจะลึกกว่ากระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ ลักษณะการทำงานจะแสดงดังภาพที่ 4

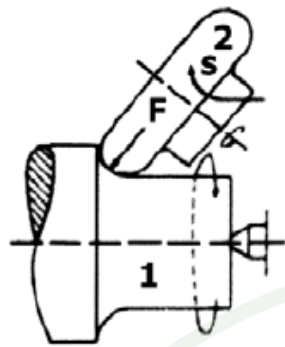


ภาพที่ 4 ลักษณะการทำงานของกระบวนการยิงด้วยเลเซอร์

ที่มา: Juijerm (2007)

2.3 กระบวนการรีดผิวเรียบ

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีรีดผิวเรียบเป็นการใช้ลูกกรีด (Roller) ที่มีลักษณะเป็นลูกบอลหรือทรงกลม รีดที่ผิวของโลหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหะกายภาพ (Changing the surface metallurgy) โดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงทางส่วนผสมทางเคมีแต่อย่างใดเป็นผลให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวร และเกิดความเค้นกดตกค้างขึ้น ทำให้ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานความล้าได้ ซึ่งลักษณะของกระบวนการนี้จะแสดงในภาพที่ 5



1 = workpiece
2 = deep rolling device

(ก)

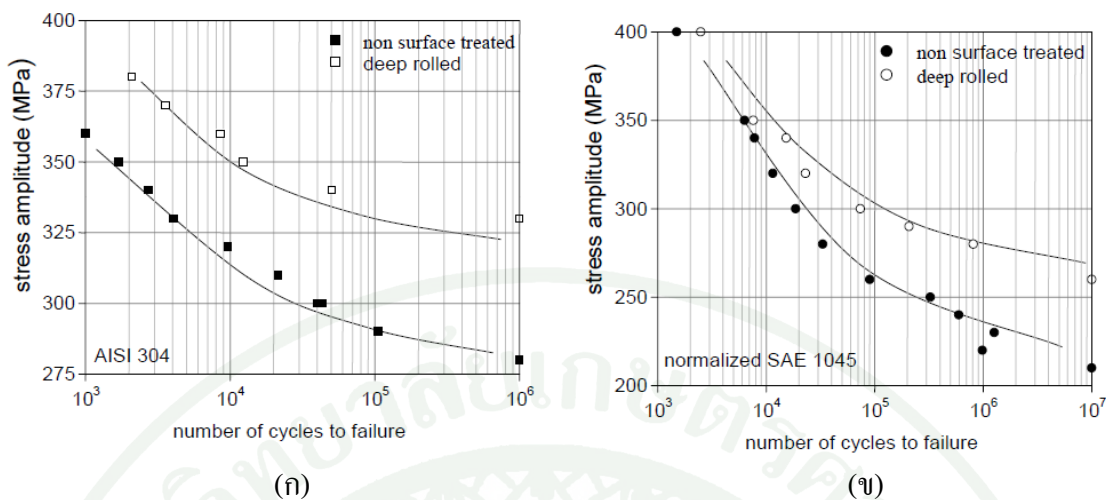


(ข)

ภาพที่ 5 ลักษณะของกระบวนการรีดผิวเรียบ (ก) แผนภาพ (ข) การติดตั้งจริง

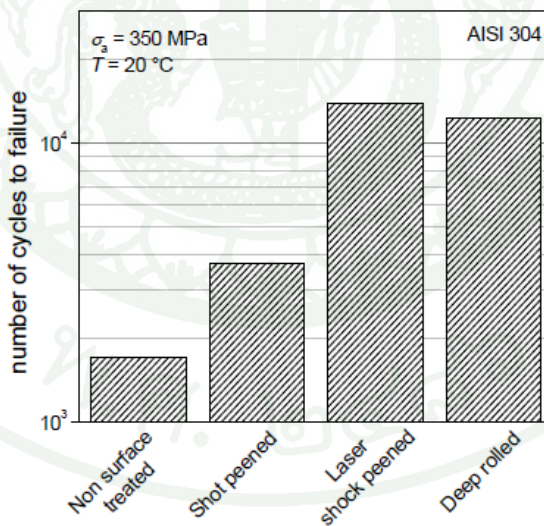
ที่มา: Juijerm (2007)

จากงานวิจัยของ Juijerm (2007) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการต้านทานความล้าของวัสดุ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 และเหล็กกล้าคาร์บอน SAE 1045 ด้วยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล 3 ชนิด คือ กระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ กระบวนการยิงด้วยเลเซอร์และกระบวนการรีดผิวเรียบ จากภาพที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าวัสดุหรือชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวทางกลแล้วจะทำให้มีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย (Number of cycles to failure) เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าวัสดุหรือชิ้นงานดังกล่าวสามารถต้านทานการเกิดความล้าได้ดีขึ้น ซึ่งวิธีการยิงด้วยเลเซอร์จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายสูงที่สุด แต่เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูงและการดำเนินการยากกว่าวิธีอื่นๆ



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบและยังไม่ได้ผ่านการรีดผิวเรียบ (ก) AISI 420 (ข) SAE 1045

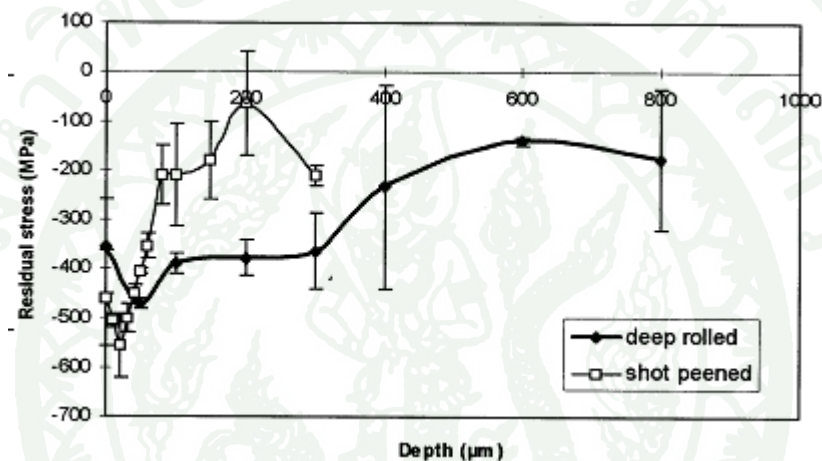
ที่มา: Juijerm (2007)



ภาพที่ 7 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนินติก AISI 304 หลังผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล

ที่มา: Juijerm (2007)

งานวิจัยของ Altenberger *et al.* (1999) ได้ศึกษากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวโลหะด้วยแรงทางกล 2 วิธี คือ กระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กและกระบวนการรีดผิวเรียบ งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กและกระบวนการรีดผิวเรียบของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก AISI 304 จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการรีดผิวเรียบสามารถทำให้เกิดความเค้นตกค้างที่ลึกลงไปจากผิวชิ้นงานได้มากกว่ากระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กอย่างชัดเจน ส่งผลให้การรีดผิวเรียบมีความต้านทานการเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้ดีกว่ากระบวนการยิงด้วยลูกเหล็ก



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความลึกของค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงาน AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการรีดผิวเรียบและการยิงลูกเหล็ก

ที่มา: Altenberger *et al.* (1999)

และงานวิจัยของ Juijerm (2007) ได้ศึกษาผลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีทางกล 3 วิธี คือ การยิงด้วยเม็ดโลหะ การยิงด้วยเลเซอร์ และการรีดผิวเรียบ เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation density) ค่าความเรียบผิว (Surface roughness) และค่าความลึกของความเค้นตกค้าง (Case depth of residual stress) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล

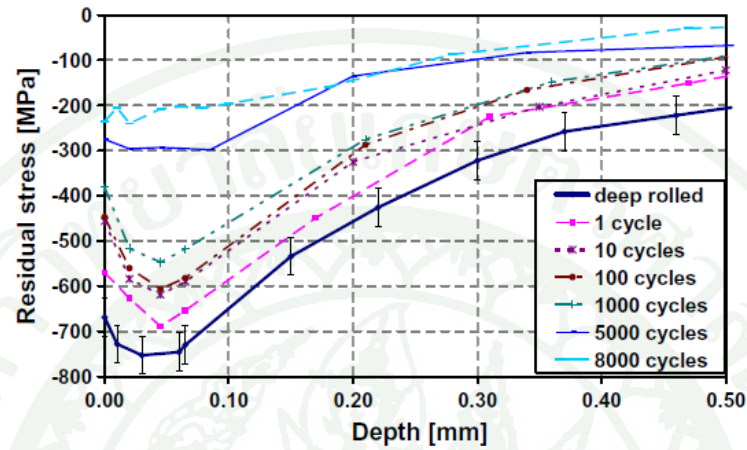
	Amount of residual stress	Dislocation density	Surface microhardness increase	Maximum "case" depth	Surface roughness	Work hardening
Shot peening	σ_{Yield}	Very high $5-8 \times 10^{11}$ cm^{-2}	150% AISI 304 60% SAE 1045	0.3 mm	4-8 μm	5-50%
Laser shock peening	σ_{Yield}	medium	40% AA2024 30% AA7075	2 mm	1-5 μm	1-2%
Deep rolling	σ_{Yield}	$10^{11} cm^{-2}$ or lower	60%	1-3 mm	1 μm	>20%

ที่มา: Juijerm (2007)

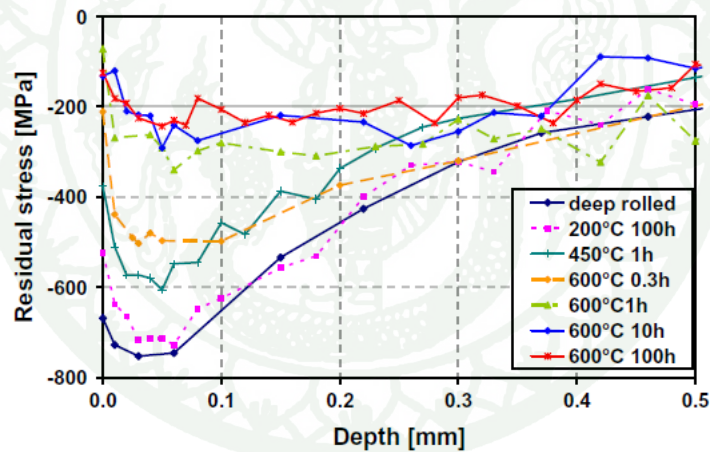
จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวทางกลด้วยวิธีการรีดผิวเรียบ จะได้รับความเรียบที่บริเวณผิวของชิ้นงานมากที่สุดและมีความลึกของความเค้นกดตกค้างลึกที่สุด จากข้อมูลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่ากระบวนการรีดผิวเรียบเป็นกระบวนการที่ให้ความเรียบผิวสูง มีค่าความลึกของความเค้นกดตกค้างมากกว่าเทคนิคอื่นๆ และมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายที่สูง นั่นหมายถึงจะสามารถต้านทานการเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้ดีมาก อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ราคาถูก ติดตั้งและดำเนินการได้ง่ายกว่ากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกลแบบอื่นๆ จึงเลือกกระบวนการรีดผิวเรียบมาศึกษา เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานความล้าของวัสดุ

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการรีดผิวเรียบสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุประเภทโลหะจากกลไกการเกิดความเสียหายแบบความล้าได้ แต่เมื่อนำวัสดุหรือชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาใช้งาน จะมีทั้งแรงทางกลและ/หรือความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้คิสโลเคชั่นที่อยู่บริเวณผิวของวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนของคิสโลเคชั่นดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้างที่ผิวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความเค้นกดตกค้างที่ผิวลดลง ส่งผลให้ที่บริเวณผิว มีแรงที่ใช้ในการต้านแรงดึงลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวลดลง และทำให้วัสดุหรือชิ้นงานเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้ จากภาพที่ 9 แสดงให้

เห็นถึงการเกิดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้างที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงทางกลและ/หรือความร้อนมากระทำ (Nikitin and Besel, 2008)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 การคลายตัวของความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 เนื่องจาก
(ก) แรงทางกล (ข) ความร้อน

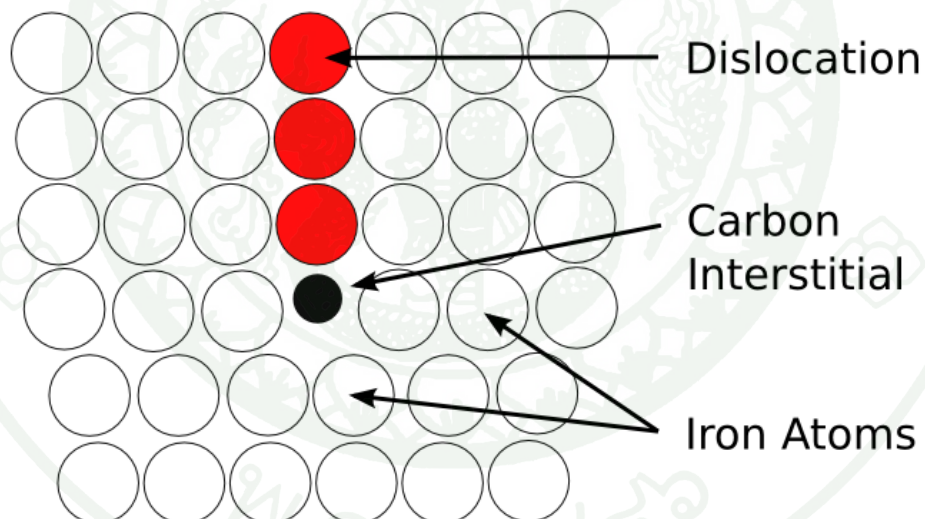
ที่มา: Nikitin and Besel (2008)

ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก เพื่อลดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้างที่ผิว ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการเกิดรอย

แตกร้าวมากขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้ามากขึ้น โดยอาศัยหลักการ การบ่มเครียด

4. การบ่มเครียด

การบ่มเครียด เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) ซึ่งในโลหะจะมีอะตอมต่างๆมากมายโดยเฉพาะอะตอมของคาร์บอนหรือไนโตรเจนที่แทรกตัวอยู่ในโลหะผสม จากภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าอะตอมของคาร์บอนหรือไนโตรเจนที่แทรกตัวอยู่จะเป็นตัวที่ทำหน้าที่ดึงหรือขัดขวางดิสโลเคชันเอาไว้ ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยากขึ้น การที่จะทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่จำเป็นต้องใช้แรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การคลายตัวของดิสโลเคชันจะช้าลง และจะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุที่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้

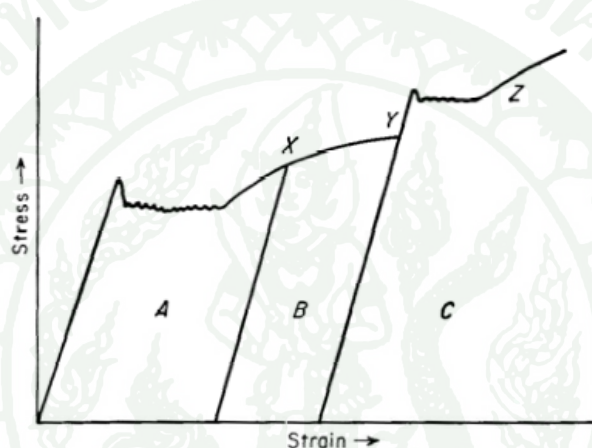


ภาพที่ 10 การขัดขวางดิสโลเคชันของอะตอมคาร์บอนหรือไนโตรเจน

ที่มา: Cottrell (1949)

จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ได้รับแรงกระทำจนกระทั่งผ่านจุดคราก (Yield point) จนถึงจุด X แล้วปล่อยแรงกระทำ หลังจากนั้นออกแรงกระทำต่อไปจนถึงจุด Y (โดยไม่ปล่อยให้เกิดการบ่มเครียดหรือใช้ความร้อนกระตุ้น) จะพบว่าไม่เกิดปรากฏจุดคราก แต่เมื่อปล่อย

ขึ้นงานไว้หลายวันหรือใช้ความร้อนกระตุ้น เมื่อออกแรงกระทำกับชิ้นงานอีกครั้งจะพบว่า มีค่าที่จุดครากที่สูงกว่าค่าเดิม จากการที่ค่าที่จุดคราก มีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่า จะต้องใช้แรงในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปอย่างถาวรเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรได้ยากขึ้น วัสดุจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากดิสโลเคชันมีการเคลื่อนที่ยากมากขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้เพื่อให้ความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานทางด้านความล้าให้ยาวนานมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ปัจจัยในการทำให้เกิดผลของการบ่มเครียด คือ พลังงานความร้อน



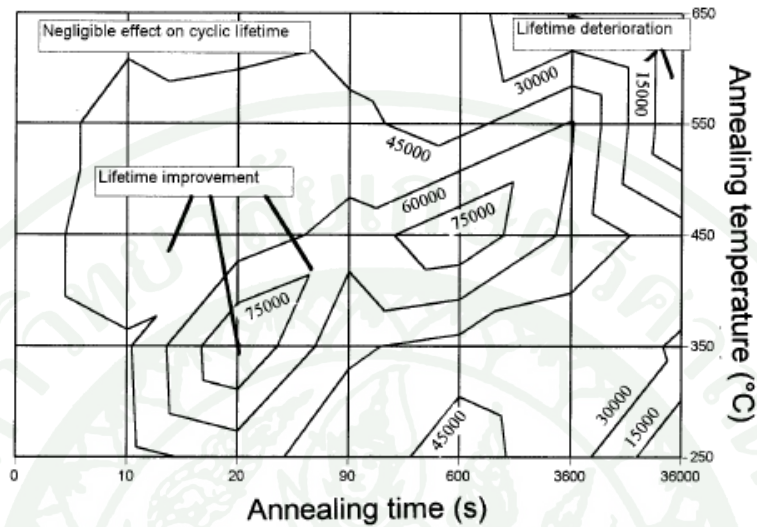
ภาพที่ 11 ปรากฏการณ์ การบ่มเครียดในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ที่มา: Dieter (1961)

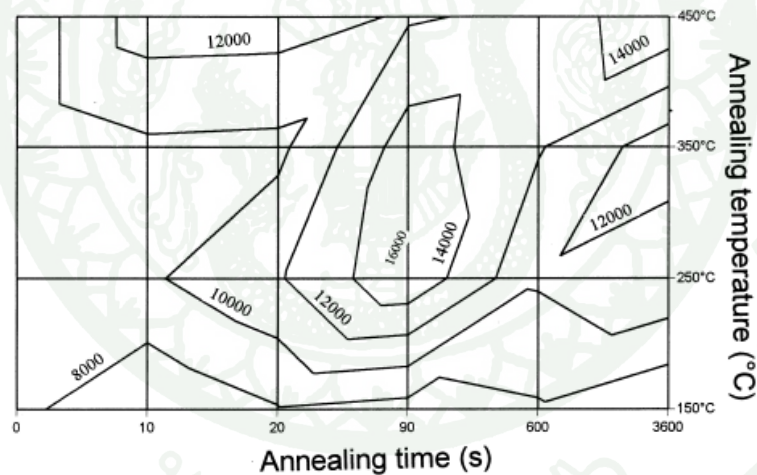
5. กระบวนการอบด้วยความร้อน (Annealing process)

การอบด้วยความร้อน คือการให้ความร้อนกับโลหะเป็นระยะเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์อันใดอันหนึ่งในโครงสร้างของโลหะนั้นๆ โดยจะนำความร้อนจากกระบวนการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบที่อุณหภูมิปกติ เพื่อให้โลหะผสมที่มีอะตอมของธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้าง (Solution atom) เคลื่อนที่เข้ามาจับหรือล้อมรอบ ดิสโลเคชันที่เกิดขึ้น เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ การบ่มเครียดขึ้น จากการศึกษางานวิจัยของ Altenberger and Scholtes (1999) ที่ทำการให้ความร้อนกับโลหะ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน SAE 1045 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 พบว่าถ้าทำการอบที่อุณหภูมิและเวลาที่

เหมาะสมแล้ว จะมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด นั่นคือมีความสามารถในการต้านทานความล้าได้มากที่สุด (ภาพที่ 12)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 การให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆของวัสดุ (ก) SAE 1045 (ข) AISI 304

ที่มา: Altenberger and Scholtes (1999)

ทั้งนี้ในแต่ละวัสดุจะมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกัน จึงต้องมีการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 เพื่อให้เกิดการบ่มเกร็ดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จึงจะส่งผลให้ชิ้นงานหรือวัสดุนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ใช้ในการวิจัย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Fe
0.3	12.15	0.32	0.25	0.43	0.018	0.028	Bal.

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 2.1 เครื่องตัดชิ้นงาน (Abrasive cutter) ของ IMPTECH รุ่น C10
- 2.2 เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder polisher) ของ IMPTECH รุ่น 101
- 2.3 เครื่องกลึง (Lathe Machine)
- 2.4 เครื่องรีดผิวเรียบ (Deep rolling) รุ่น EG5-1-SL
- 2.5 เตาแบบอ่างเกลือ (Salt-bath furnace)
- 2.6 อุปกรณ์สำหรับเมาท์แบบเย็น (Cold Mount) ใช้ เรซินชนิดอีพ็อกซีหล่อในเบ้าพลาสติก
- 2.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด Type-K

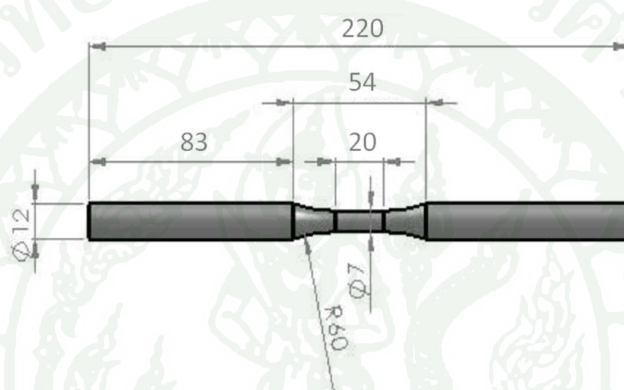
3. เครื่องมือวิเคราะห์

- 3.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางโครงสร้าง (X-ray diffraction, XRD)
- 3.2 เครื่องทดสอบความล้าแบบดัดหมุน (Rotary Bending Fatigue Testing Machine, Model PQ-6)

วิธีการ

1. การเตรียมชิ้นงาน

ตัดแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ให้เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 220 มิลลิเมตร โดยนำไปตัดแต่งขึ้นรูปให้ได้รูปทรงตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM E466-96 (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E466-96

2. การรีดผิวเรียบ

- 2.1 ติดตั้งเครื่องรีดผิวเรียบกับเครื่องกลึง
- 2.2 นำชิ้นงานยึดกับเครื่องกลึงเพื่อเตรียมรีด
- 2.3 รีดชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด คือ แรงกด (Force) 0.75 กิโลนิวตัน ความเร็วในการหมุน (Speed) 85 รอบต่อนาที และอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด (Feed rate) 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที (พจนัพีชานนท์, 2553)

3. การอบด้วยความร้อน

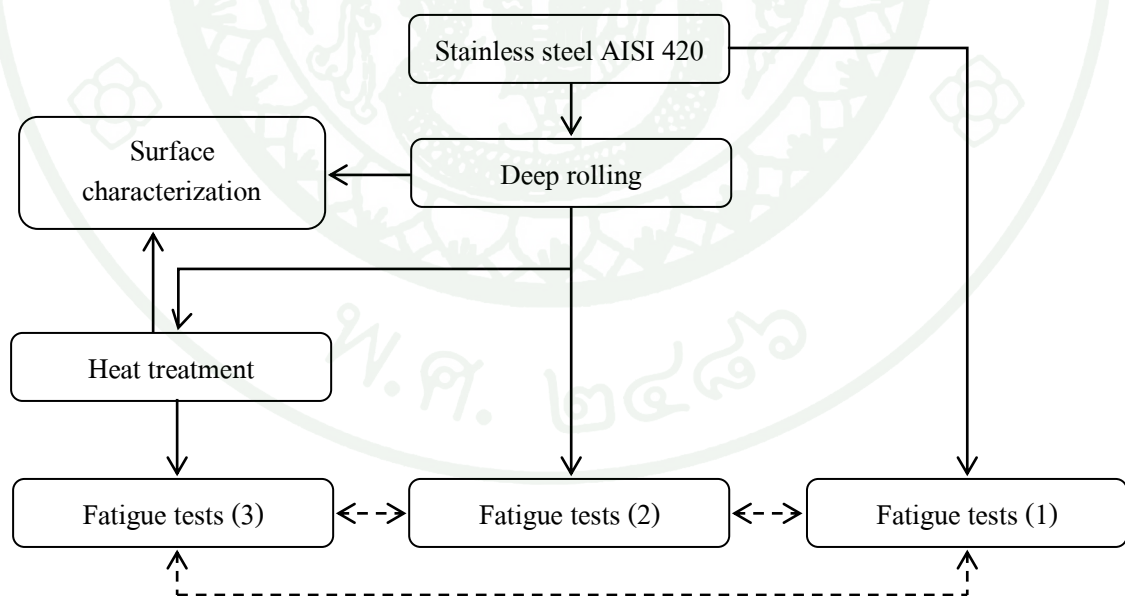
นำชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบแล้วมาทำการให้ความร้อนด้วยเตาแบบอ่างเกลือที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-35 นาที หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป

4. การวิเคราะห์

4.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ มาตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างและความแข็งจากการแปรรูป จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (Full width half maximum, FWHM) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ โดยหลักการวิเคราะห์จะใช้รังสีโครเมียม-เคอิลฟา ($\text{CrK}\alpha = 0.2291 \text{ \AA}$) ยิ่งไปที่ระนาบ $\{211\}$ ($2\theta = 156.4^\circ$) และค่าคงตัวยืดหยุ่น (Elastic constant, $\frac{1}{2}S_2$) = $6.16 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ แล้วเครื่องจะทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เพื่อดูกราฟที่เบี่ยงเบนออกมา หลังจากนั้นเครื่องจะคำนวณออกมาเป็นค่าความเค้นตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค

4.2 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบการต้านทานความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบค้ำหมุน โดยใช้ความเค้นแอมปริจูดในช่วง 400-700 เมกะปาสกาล

โดยการดำเนินงานในการวิจัยครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนและสามารถสรุปขั้นตอนเป็นแผนภาพงานวิจัยได้ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แผนภาพงานวิจัยผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ส่วนที่1: นำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ยังไม่ได้ผ่านการรีดผิวเรียบ มาทดสอบความล้าแบบหมุนดัด เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความล้า จากการทดลองสามารถหากราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแอมพลิจูด (Stress amplitude) และจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย หรือเรียกว่า S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ได้

ส่วนที่2: ทำการรีดผิวเรียบบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้าง (Residual stress) รวมทั้งดูค่าความแข็งจากการแปรรูป จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ ชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบจะทำการทดสอบความล้าเช่นเดียวกับในส่วนที่ 1 ผลการทดลองที่ได้จะสามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองในส่วนที่ 1

ส่วนที่3: จะทำการรีดผิวเรียบบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 โดยใช้ตัวแปรในการรีดผิวเรียบเหมือนกับที่ใช้ในส่วนที่ 2 หลังจากนั้นจะนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ กัน ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในแต่ละตัวแปรจะถูกทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้าง รวมทั้งดูค่าความแข็งจากการแปรรูป จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ จากนั้นจะทำการทดสอบความล้าเช่นเดียวกับในส่วนที่ 1 และ 2 ผลการทดลองที่ได้จะสามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองในส่วนที่ 1 และ 2

ผลและวิจารณ์

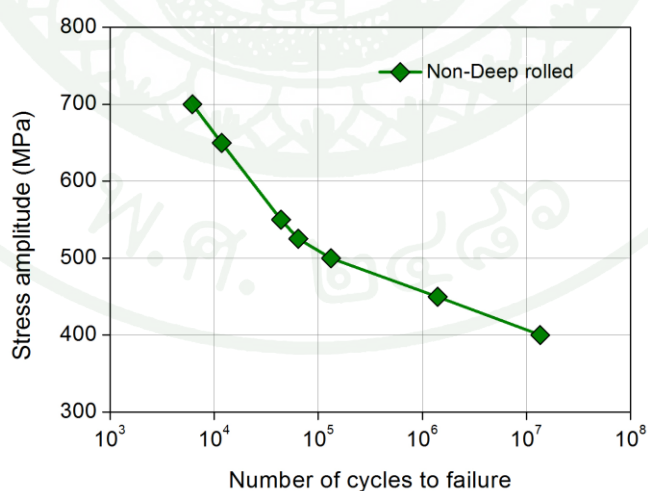
ผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งมีผลการทดลองของแต่ละส่วนเป็นดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ยังไม่ได้ผ่านการรีดผิวเรียบ

1.1 ความต้านทานต่อความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ

การทดสอบความล้าแบบหมุนดัด จะได้กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ยังไม่ได้ผ่านการรีดผิวเรียบ โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมปริจูดที่ 400 450 500 525 550 650 และ 700 เมกะปาสกาล จากภาพที่ 15 พบว่าถ้าเพิ่มความเค้นแอมปริจูดไปเรื่อยๆ จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายน้อยลงเช่นกัน ถ้าใช้ความเค้นแอมปริจูด 400 เมกะปาสกาลจะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย 13,585,657 รอบ แต่ถ้าใช้ความเค้นแอมปริจูด 700 เมกะปาสกาล จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย 6,196 รอบ

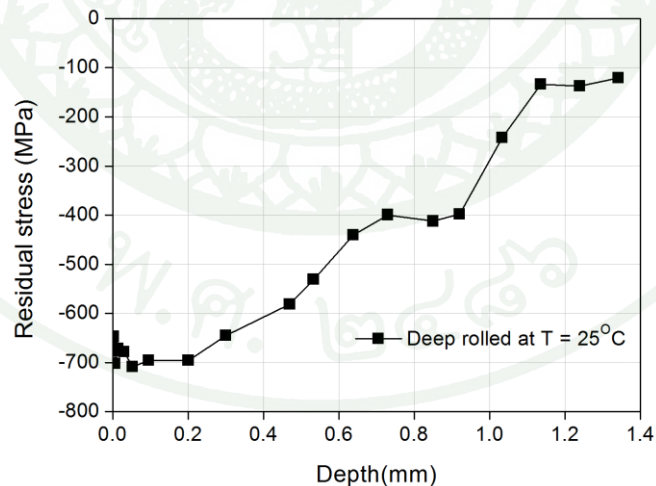


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ

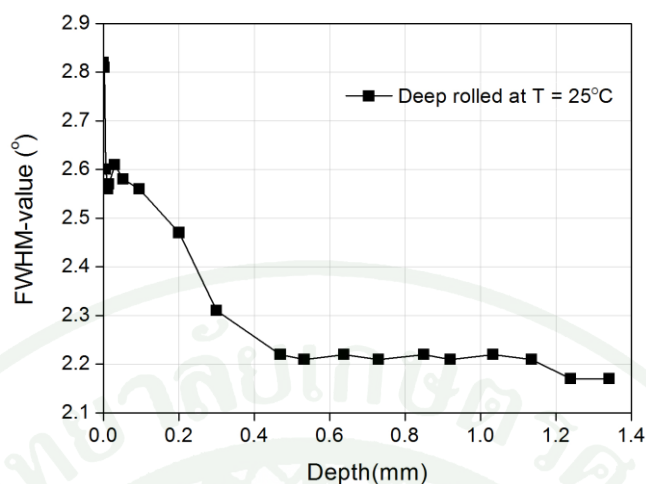
2. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

2.1 ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคหลังผ่านกระบวนการรีดผิวเรียบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420

เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 มาทำการรีดผิวเรียบ ด้วยแรงกด 0.75 กิโลนิวตัน ความเร็วในการหมุน 85 รอบต่อนาที และอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า หลังทำการรีดผิวเรียบแล้วจะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวเพิ่มขึ้นจากของเดิมที่ยังไม่ได้รีดจาก -430 เมกะปาสกาล เป็น -653.58 เมกะปาสกาล และค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคเพิ่มขึ้นจากของเดิม 2.60 องศา เป็น 2.82 องศา จากภาพที่ 16 และ 17 ได้ทำการศึกษาความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ พบว่า ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคจะมีค่าสูงมากที่บริเวณผิวของชิ้นงาน นั่นคือ -653.58 เมกะปาสกาล และ 2.82 องศา ตามลำดับ แล้วจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะลึกเข้ามาในชิ้นงานมากขึ้น จนถึงในระดับที่ไม่มีความเค้นตกค้างเหลืออยู่เลย ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ค่าความเค้นตกค้างลดลงจนเข้าใกล้ค่าศูนย์



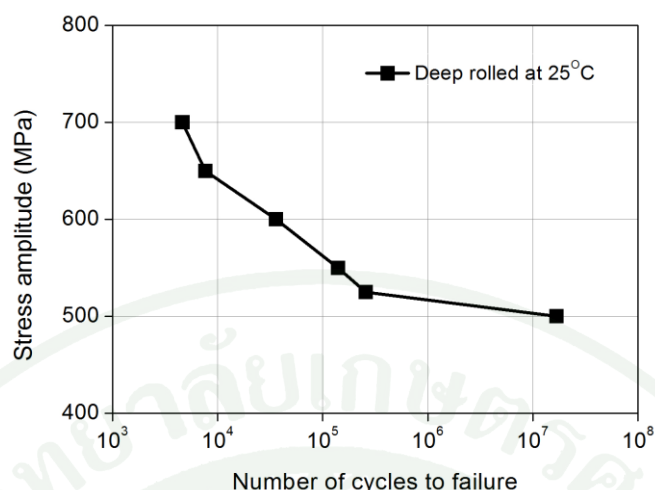
ภาพที่ 16 ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ



ภาพที่ 17 ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

2.2 ความต้านทานต่อความล้าหลังผ่านกระบวนการรีดผิวเรียบของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิก AISI 420

จากภาพที่ 18 ได้ทำการทดสอบความล้าแบบหมุนดัดของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความล้าตัวของวัสดุ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแอมปริจูด และจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมปริจูดที่ 500 525 550 600 650 และ 700 เมกะปาสกาล พบว่าถ้าเพิ่มความเค้นแอมปริจูดไปเรื่อยๆ จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายน้อยลง ถ้าใช้ความเค้นแอมปริจูด 500 เมกะปาสกาลจะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย 16,856,980 รอบ แต่ถ้าใช้ความเค้นแอมปริจูด 700 เมกะปาสกาล จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย 4,631 รอบ



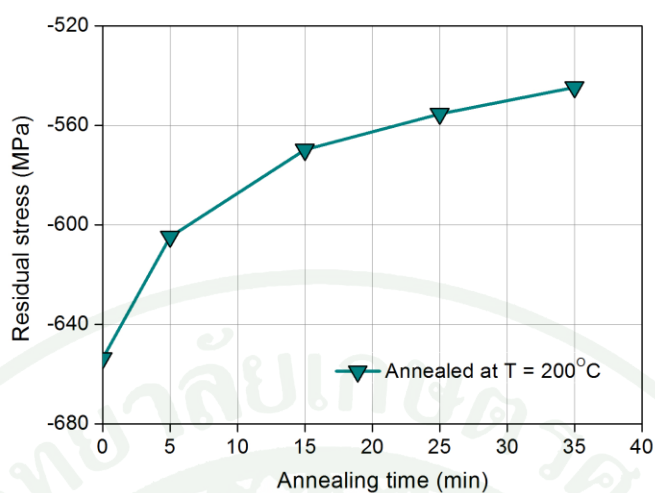
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

3. การอบด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

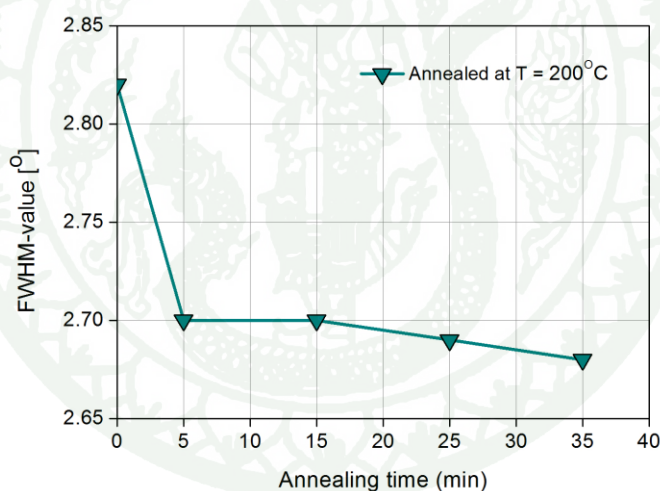
3.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

3.1.1 อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

หลังจากนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 มาทำการรีดผิวเรียบ แล้ว จะนำมาอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากภาพที่ 19 และ 20 พบว่า เมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แล้วใช้เวลานานขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างค่อยๆลดลงจากของเดิมที่ยังไม่ได้อบ โดยค่าความเค้นกดตกค้างหลังผ่านการรีดผิวเรียบ คือ -653.58 เมกะปาสกาล เมื่ออบด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างลดลงอยู่ในช่วง -604.8 ถึง -544.7 เมกะปาสกาล ส่วนค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคก็มีแนวโน้มลดลงจากเดิมเช่นเดียวกัน คือ จากของเดิมที่ทำการรีดผิวเรียบ คือ 2.82 องศา เมื่ออบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที ทำให้ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคลดลงมาอยู่ในช่วง 2.70 – 2.68 องศา



ภาพที่ 19 ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

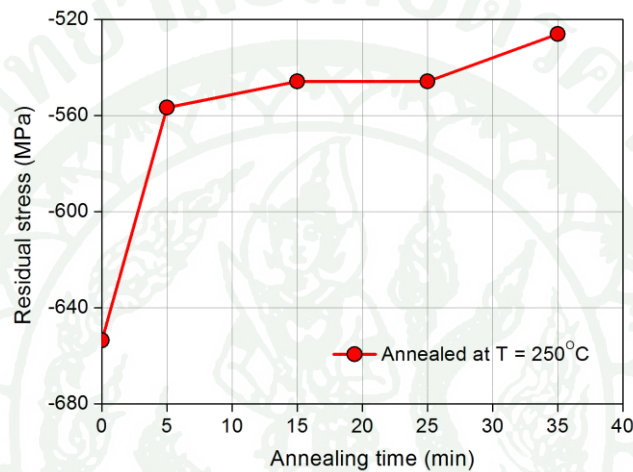


ภาพที่ 20 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

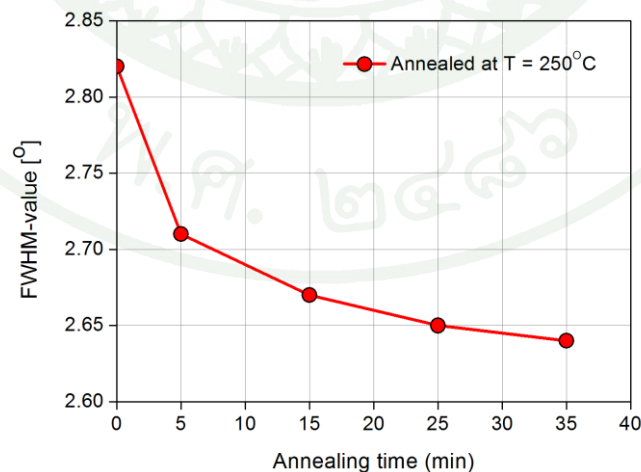
3.1.2 อบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

จากการทดลองนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ทำการรีดผิวเรียบแล้ว นำมาอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากภาพที่ 21 และ 22 พบว่า เมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แล้วใช้เวลานานขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่า

ความเค้นกดตกค้างค่อยๆลดลงจากของเดิมที่ยังไม่ได้อบ โดยค่าความเค้นกดตกค้างหลังผ่านการรีดผิวเรียบ คือ -653.58 เมกะปาสกาล เมื่ออบด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างลดลงอยู่ในช่วง -556.7 ถึง -526.1 เมกะปาสกาล ส่วนค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคก็มีแนวโน้มลดลงจากเดิมเช่นเดียวกัน คือ จากของเดิมที่ทำการรีดผิวเรียบ คือ 2.82 องศา เมื่ออบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที ทำให้ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคลดลงมาอยู่ในช่วง 2.71 – 2.64 องศา



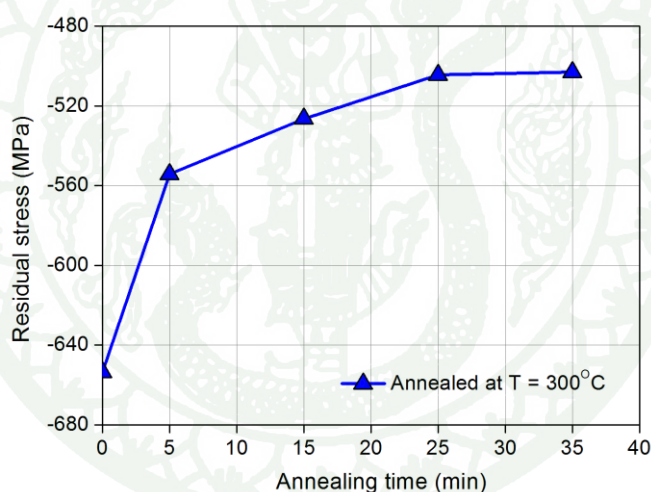
ภาพที่ 21 ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที



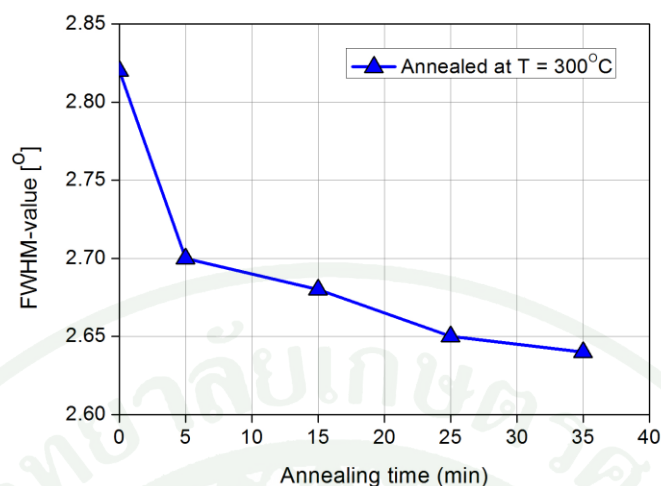
ภาพที่ 22 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

3.1.3 อบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

จากการทดลองนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ทำการรีดผิวเรียบแล้ว นำมาอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากภาพที่ 23 และ 24 พบว่า เมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แล้วใช้เวลานานขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างค่อยๆลดลงจากของเดิมที่ยังไม่ได้อบ โดยค่าความเค้นกดตกค้างหลังผ่านการรีดผิวเรียบ คือ -653.58 เมกะปาสกาล เมื่ออบด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างลดลงอยู่ในช่วง -554.2 ถึง -503.0 เมกะปาสกาล ส่วนค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคก็มีแนวโน้มลดลงจากเดิมเช่นเดียวกัน คือ จากของเดิมที่ทำการรีดผิวเรียบ คือ 2.82 องศา เมื่ออบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 35 นาที ทำให้ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคลดลงมาอยู่ในช่วง 2.70 – 2.64 องศา



ภาพที่ 23 ค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

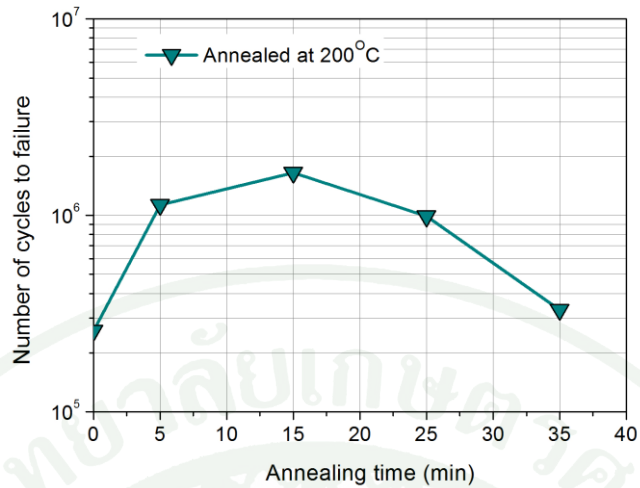


ภาพที่ 24 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

3.2 ความต้านทานต่อความล้าหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

3.2.1 อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

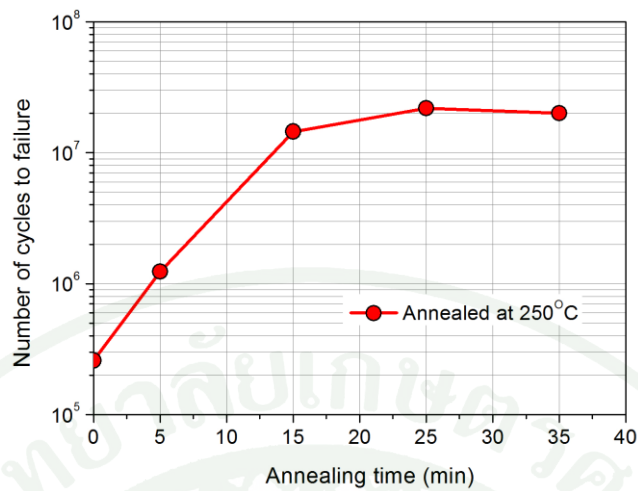
หลังจากนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากนั้นนำมาทดสอบความล้าแบบหมุนดัด เพื่อศึกษาจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย ซึ่งมีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อความล้าของวัสดุ โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมปริจูดที่ 525 เมกะปาสกาล จากภาพที่ 25 พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบต่างกัน จะทำให้ได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายต่างกันเช่นกัน ซึ่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถ้าใช้เวลา 15 นาทีในการอบ จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายสูงสุด คือ 1,646,359 รอบ



ภาพที่ 25 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

3.2.2 อบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

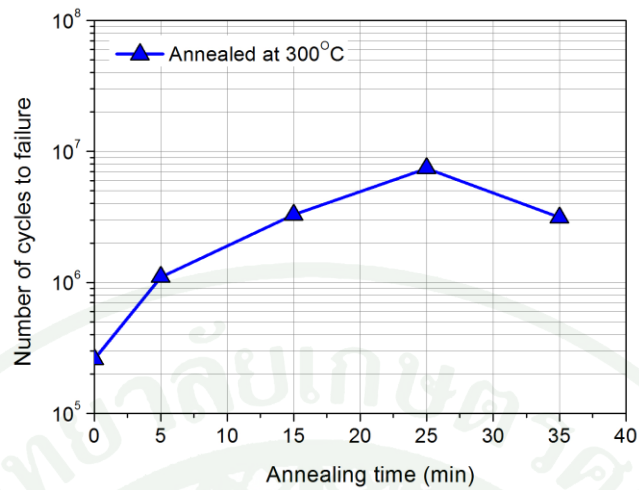
หลังจากนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากนั้นนำมาทดสอบความล้าแบบหมุนดัด เพื่อศึกษาจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย ซึ่งมีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อความล้าของวัสดุ โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมพลิจูดที่ 525 เมกะปาสกาล จากภาพที่ 26 พบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาอบต่างกัน จะทำให้ได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายต่างกันเช่นกัน ถ้าอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายสูงที่สุด คือ 21,935,616 รอบ



ภาพที่ 26 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

3.2.3 อบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที

หลังจากนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาที จากนั้นนำมาทดสอบความล้าแบบหมุนดัด เพื่อศึกษาจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย ซึ่งมีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อความล้าของวัสดุ โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมปริจูดที่ 525 เมกะปาสกาล จากภาพที่ 27 พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบต่างกัน จะทำให้ได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายต่างกันเช่นกัน ซึ่งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถ้าใช้เวลา 25 นาทีในการอบ จะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายสูงที่สุด คือ 7,440,014 รอบ



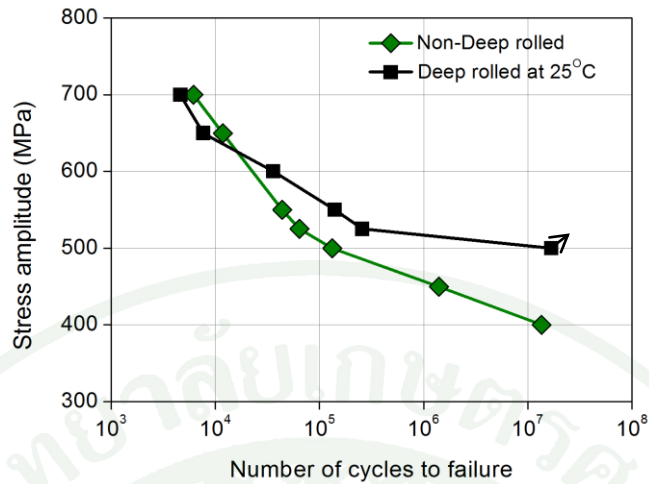
ภาพที่ 27 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 25 และ 35 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

วิจารณ์

1. อิทธิพลของกระบวนการรีดผิวเรียบต่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420

จากการทดลองนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 มารีดผิวเรียบที่อุณหภูมิปกติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) พบว่า หลังทำการรีดผิวเรียบแล้วจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 มีค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวเพิ่มขึ้นจากของเดิมที่ยังไม่ได้รีดจาก -430.0 เมกะปาสกาล เป็น -653.58 เมกะปาสกาล และค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกเพิ่มขึ้นจากของเดิม 2.60 องศา เป็น 2.82 องศา เนื่องมาจากที่บริเวณผิวของวัสดุเกิดการแปรรูปอย่างถาวร แต่บริเวณผิวไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระเพราะถูกยึดด้วยเนื้อ โลหะใต้บริเวณผิวซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากแรงที่มากกระทำจึงไม่เกิดการแปรรูป โดยผลจากปฏิกิริยาระหว่างบริเวณที่เกิดการแปรรูปอย่างถาวร และบริเวณที่เกิดการแปรรูปไม่ถาวร เป็นผลให้เกิดความเค้นกดตกค้างขึ้นที่บริเวณผิว และจากปฏิกิริยาดังกล่าวยังทำให้ที่บริเวณผิวมีปริมาณของดิสโลเคชันเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย การที่มีปริมาณของดิสโลเคชันที่บริเวณผิวมากขึ้นจะเกิดการขัดขวางกันเองของดิสโลเคชัน ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ที่ผิวมีความแข็งจากการแปรรูปเพิ่มขึ้น (Juijerm, 2007) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกที่เพิ่มขึ้นจากของเดิม 2.60 องศา เป็น 2.82 องศา และจากภาพที่ 16 และ 17 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกที่จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผิวหลังจากนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 มารีดผิวเรียบที่อุณหภูมิปกติ และค่าความเค้นกดตกค้างรวมถึงค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะลึกเข้ามาในชิ้นงานมากขึ้น

จากการทดลองในเรื่องของความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบที่อุณหภูมิปกติ หลังจากนำชิ้นงานมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบคัทหมุน โดยการทดสอบจะใช้ความเค้นแอมปริจูดในช่วง 500 - 700 เมกะปาสกาล จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 28

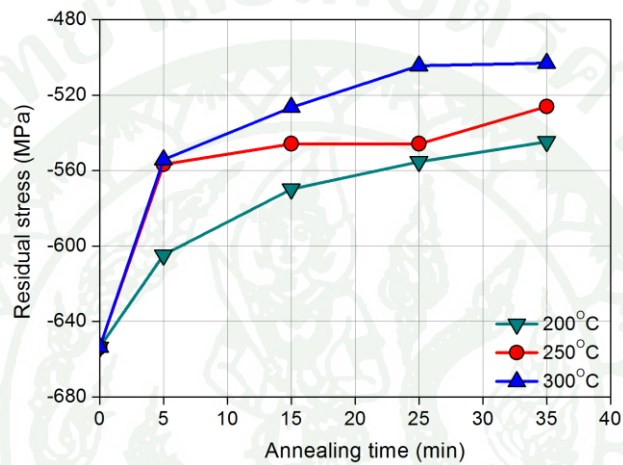


ภาพที่ 28 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่รีดผิวเรียบและยังไม่ได้รีดผิวเรียบ

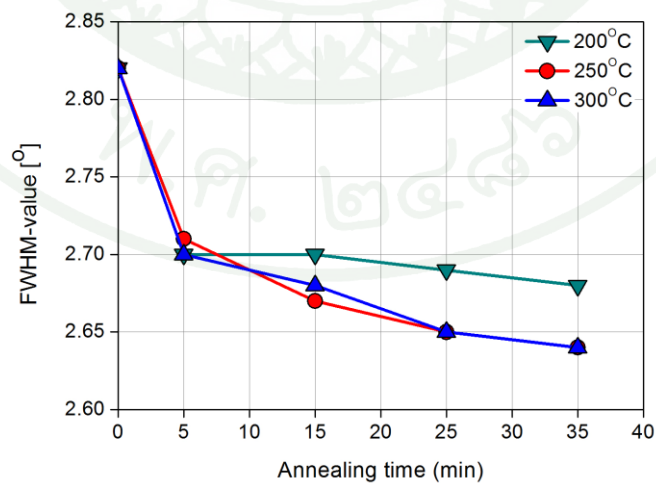
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 28 พบว่า ถ้านำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 มารีดผิวเรียบจะได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้น โดยเลือกวิเคราะห์ที่ความเค้นแอมปริจูด 525 เมกะปาสกาลเป็นหลัก เนื่องจากเป็นค่าความเค้นแอมปริจูดที่ทำให้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเกิดการพังเสียหาย ซึ่งสามารถบันทึกจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายแล้วนำมาวิเคราะห์ต่อไปได้ แต่ถ้าใช้ความเค้นแอมปริจูดที่ต่ำกว่านี้จะทำให้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบไม่พังเสียหาย เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าความเค้นแอมปริจูด 525 เมกะปาสกาล จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ได้รีด 64,516 รอบ เป็น 258,632 รอบ นั่นหมายความว่า วัสดุดังกล่าวเมื่อนำมารีดผิวเรียบแล้วจะทำให้ด้านทานต่อความล้าได้มากกว่าเดิม เนื่องจากที่บริเวณผิวของวัสดุเกิดความเค้นกดตักค้างและความแข็งจากการแปรรูปขึ้นหลังผ่านกระบวนการรีดผิวเรียบ (Jujerm, 2007) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะช่วยสร้างความต้านทานแรงดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิว ทำให้รอยแตกที่เริ่มขึ้นที่ผิวลุกลามต่อไปได้ยาก เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานที่ถูกรใช้งานในลักษณะเป็นแบบวัฏจักรยาวนานขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าลดลง ช่วยในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อความล้าได้ และจากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 มาทำการรีดผิวเรียบ จะทำให้มีขีดจำกัดความล้า (Fatigue limit) เพิ่มขึ้นจากเดิม 400 เมกะปาสกาล เป็น 500 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระบวนการรีดผิวเรียบสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อความล้าได้

2. อิทธิพลของการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

จากการทดลองนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ มาอบที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 – 35 นาที จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30



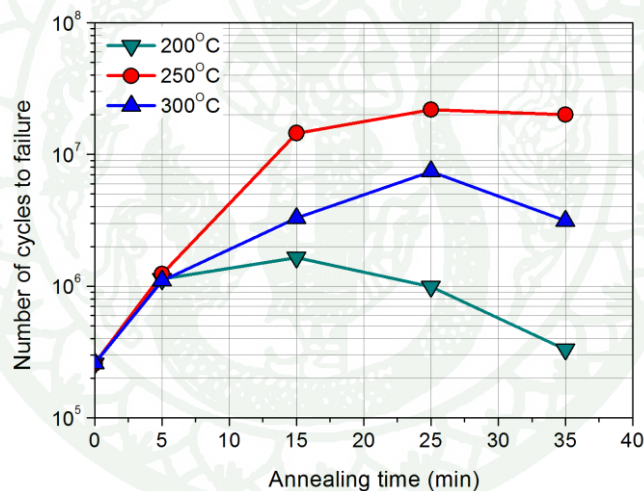
ภาพที่ 29 ค่าความเค้นตกค้างหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ



ภาพที่ 30 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 29 และ 30 พบว่า หลังผ่านการอบแล้วจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 มีค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความแข็งจากการแปรรูปลดลง แล้วถ้าอบที่เวลานานมากขึ้นหรือเพิ่มอุณหภูมิในการอบให้สูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความแข็งจากการแปรรูปลดลงมากขึ้น เนื่องมาจากเมื่อนำวัสดุหรือชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาให้ความร้อน จะทำให้วัสดุมีพลังงานมากพอส่งผลให้ดิสโลเคชันที่อยู่บริเวณผิวของวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนของดิสโลเคชันดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวของวัสดุขึ้น ทำให้วัสดุมีความเค้นกดตกค้างที่ผิวและความแข็งจากการแปรรูปลดลง (Nikitin and Besel, 2008)

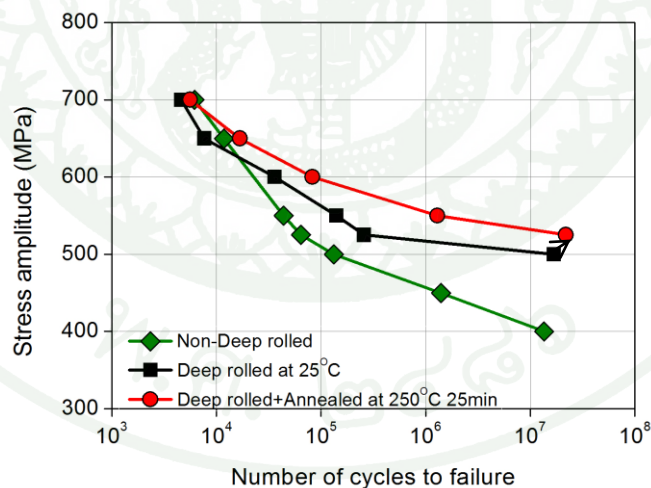
อย่างไรก็ตามเมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันนั้น มาทำการทดสอบความล้าดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังจากอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่รีดผิวเรียบ โดยทดสอบที่ความเค้นแอมปริจูดเท่ากับ 525 เมกะปาสกาล

จากผลการทดลองในภาพที่ 31 พบว่า ชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายต่างกัน ซึ่งอิทธิพลของความร้อนที่ให้ไปนั้นกลับทำให้วัสดุมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้อบ ถึงแม้ว่าความร้อนที่ให้แก่วัสดุนั้นจะทำให้เกิดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้างและค่าความแข็งจากการแปรรูปก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อนแก่วัสดุนั้นสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า

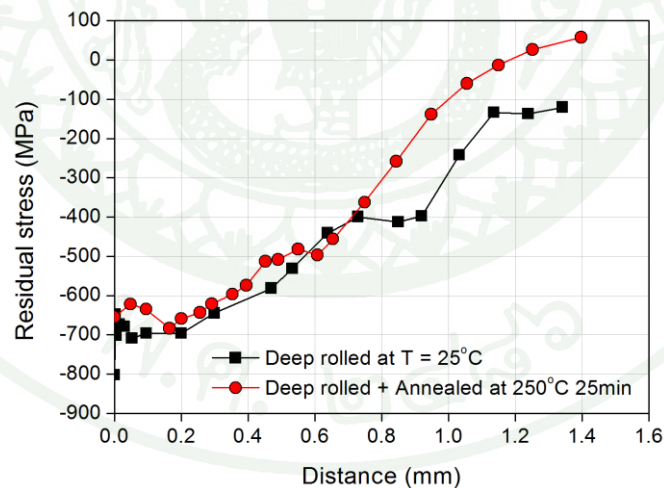
การบ่มเครียดขึ้นได้ (Dieter, 1961) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง ซึ่งในโลหะจะมีอะตอมต่างๆมากมายที่ละลายอยู่ในโครงสร้าง โดยเฉพาะอะตอมของคาร์บอนหรือไนโตรเจนที่แทรกตัวอยู่ในโลหะผสม จะเป็นตัวที่เข้าไปจับหรือล้อมรอบดิสโลเคชัน ทำหน้าที่ตรึง ดิสโลเคชัน ไว้ ถึงแม้ว่าดิสโลเคชันจะมีน้อยลง แต่เมื่อดิสโลเคชันถูกขัดขวางไม่ให้เคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นนั้น จะทำให้การคลายตัวของความเค้นตกค้างลดลง ส่งผลให้ที่บริเวณผิวยังคงมีแรงที่ใช้ในการต้านทานแรงดึงเหลืออยู่ ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวเพิ่มมากขึ้น และทำให้วัสดุนั้นสามารถต้านทานต่อความล้าได้ดีขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 31 จะเห็นว่ากรอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จะทำให้ได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นกว่าตอนที่ยังไม่ได้อบ แต่การที่จะทำให้วัสดุนั้นสามารถต้านทานต่อความล้าได้ดีที่สุดนั้นจะต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลกันของการคลายตัวของความเค้นตกค้างและการเกิดการบ่มเครียด ซึ่งการเกิดการบ่มเครียดนั้นจะต้องมีความคงตัว (Stability) ที่สูงด้วยเช่นกันเพื่อให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันไว้ได้นานที่สุด (Altenberger and Scholtes, 1999) จากภาพที่ 31 พบว่า กรอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ 21,935,616 รอบ



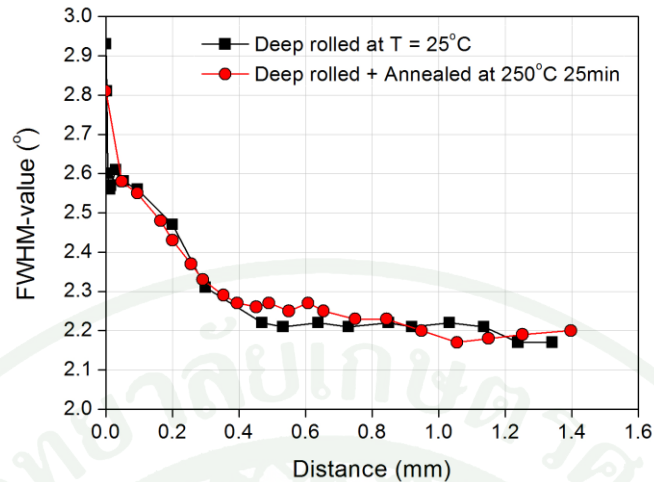
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ใน 3 เงื่อนไข คือ (1) ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ (2) ผ่านการรีดผิวเรียบ และ (3) รีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ใน 3 เงื่อนไขดังแสดงในภาพที่ 32 คือ (1) ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ (2) ผ่านการรีดผิวเรียบ และ (3) รีดผิวเรียบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านรีดผิวเรียบแล้วอบที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการอบจะทำให้ สามารถปรับปรุงสมบัติทางด้านความล้าได้ เนื่องจากได้จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด ซึ่งเห็นได้จากการเปรียบเทียบที่ความเค้นแอมปริจูด 525 เมกะปาสกาล จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ได้รีดและอบ 64,516 รอบ เป็น 21,935,616 รอบ นั้นหมายความว่า การรีดผิวเรียบแล้วอบที่เงื่อนไขที่เหมาะสมจะทำให้วัสดุสามารถต้านทานต่อความล้าได้เพิ่มมากขึ้น และจากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 มาทำการรีดผิว เรียบและอบ จะทำให้มีขีดจำกัดความล้าเพิ่มขึ้นจากเดิม 400 เมกะปาสกาล เป็น 520 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระบวนการรีดผิวเรียบแล้วนำมาอบ สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อ ความล้าได้

จากผลการทดลองในภาพที่ 33 และ 34 เป็นการเปรียบเทียบความลึกของค่าความเค้นกด ตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงพีก ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่าน การรีดผิวเรียบและรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที



ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบความลึกค่าความเค้นกดตกค้างระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบและรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที



ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบความลึกค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบและรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จะทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคมีค่าลดลงจากเดิม -801.7 เป็น -654.6 เมกะปาสกาล และ 2.93 เป็น 2.81 องศา ตามลำดับ เนื่องมาจากพลังงานความร้อนที่มีอยู่สามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ ส่งผลให้เกิดการคลายตัวของความเค้นกดตกค้าง ทำให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคลดลงอย่างที่แสดงในภาพ 33 และ 34 แต่จากภาพที่ 32 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที กลับมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้อบ ทั้งนี้ที่ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคลดลง เนื่องมาจากการอบเป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ การบ่มเครียด และการอบด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมเข้าไปขัดขวางหรือตรึงดิสโลเคชันเอาไว้ ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก การคลายตัวของความเค้นกดตกค้างก็จะเป็นไปได้ยาก (Residual stress stability) ส่งผลให้มีความแข็งแรงที่ใช้ในการต้านแรงดึงยังคงอยู่ ทำให้สามารถต้านทานการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้ดีขึ้นกว่าเดิม

สรุปและข้อเสนอแนะ

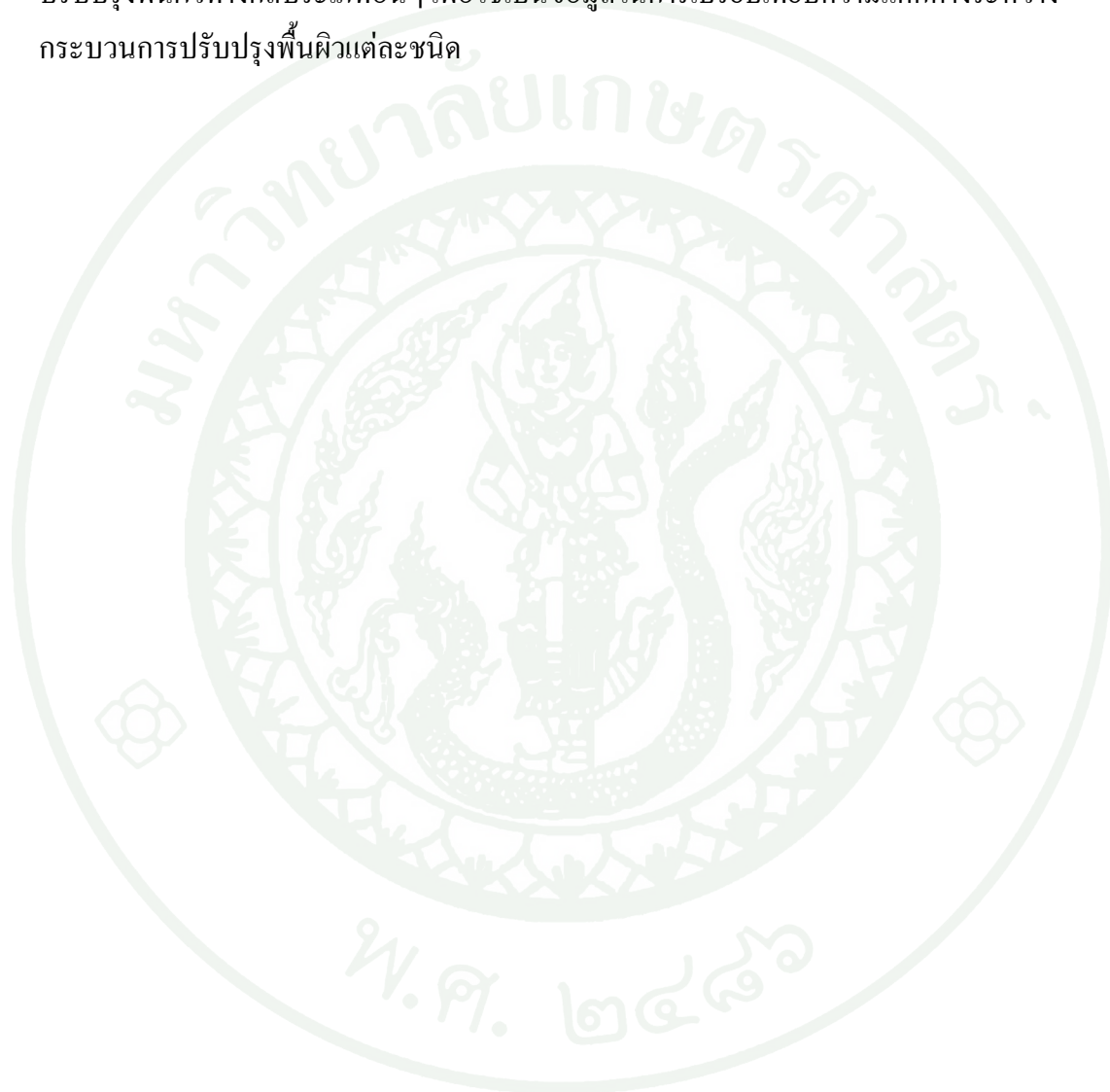
สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ โดยนำมาอบที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 – 35 นาที สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการรีดผิวเรียบบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ก่อให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวรที่บริเวณผิว ทำให้เกิดความเค้นกดตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิวซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคมีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าความเค้นตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคมีค่าเท่ากับ -653.58 เมกะปาสกาล และ 2.82 องศาตามลำดับ
2. เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบมาอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคที่บริเวณผิวมีค่าลดลง
3. ถ้าอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ ด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จะทำให้สามารถต้านทานความเสียหายที่เกิดจากความล้าได้สูงที่สุด ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบ คือ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าหลังผ่านการอบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกลประเภทอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวแต่ละชนิด



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พจน์พิชานนท์ ขนรกุล. 2553. การหาค่าตัวแปรการรีดผิวเรียบที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค AISI 420. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Altenberger, I. and B. Scholtes. 1999. Improvement of fatigue behavior of mechanically surface treated materials by annealing. **Scripta Materialia**. 41: 873-881.

_____, B. Scholtes, U. Martin and H. Oettel. 1999. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304. **Materials Science and Engineering A**. 264: 1-16.

Bhadeshia, H.K.D.H. and R.W.K. Honeycombe. 2006. **Steels Microstructure and Properties**. Elsevier Ltd., USA.

Callister, W. D. Jr. 2000. **Materials Science and engineering an Introduction**. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Chandler, H. 1995. **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. ASM International, USA.

Cottrell, A.H. 1949. Dislocation Theory of Yielding and Strain Ageing of Iron. **Proceeding of the Physical Society**. 62(1): 49-62.

Davis, J.R. 2000. **Alloy digest sourcebook: stainless steels**. ASM International, USA.

Dieter, George E. Jr. 1961. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Company, New York.

Juijerm, P. 2007. Fatigue Performance Enhancement of Steel using Mechanical Surface Treatments. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. 17(1): 59-65.

Nikitin, I. and M. Besel. 2008. Residual stress relaxation of deep-rolled austenitic steel.

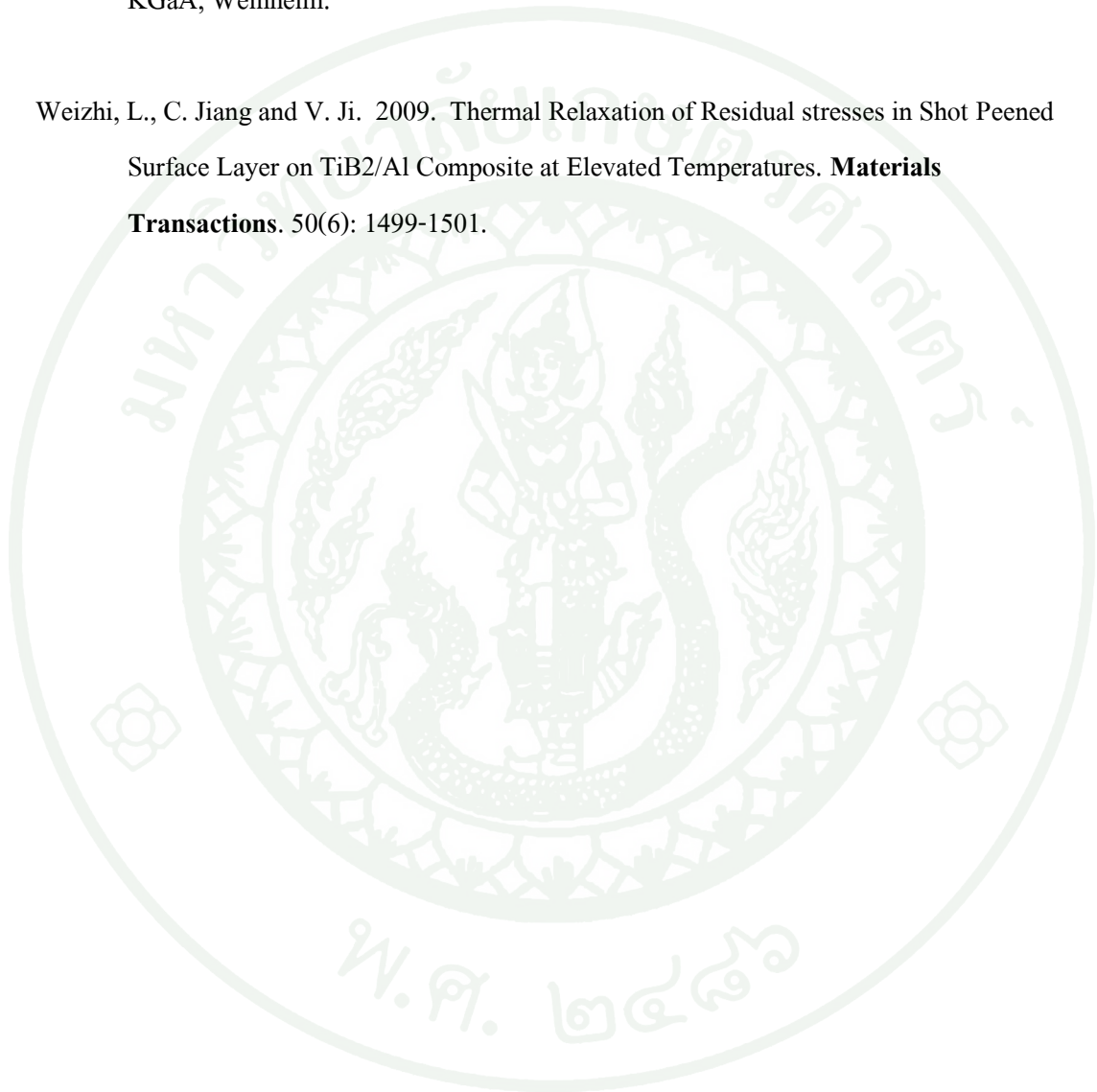
Scripta Materialia. 58: 239-242.

Schulze, V. 2006. **Modern mechanical surface treatment.** Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.

KGaA, Weinheim.

Weizhi, L., C. Jiang and V. Ji. 2009. Thermal Relaxation of Residual stresses in Shot Peened Surface Layer on TiB₂/Al Composite at Elevated Temperatures. **Materials**

Transactions. 50(6): 1499-1501.





ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420
ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ระยะห่างจากผิว (มิลลิเมตร)	ความเค้นตกค้าง (เมกะปาสกาล)
0	-801.7
0.003	-647.4
0.006	-702.0
0.012	-676.8
0.015	-672.6
0.03	-678.3
0.053	-708.8
0.096	-695.8
0.201	-696.0
0.3	-644.9
0.47	-581.8
0.533	-531.0
0.638	-440.8
0.73	-399.6
0.85	-412.4
0.92	-398.0
1.033	-242.5
1.136	-133.7
1.239	-137.4
1.342	-120.8

ตารางผนวกที่ ก2 ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 25 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420
ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ระยะห่างจากผิว (มิลลิเมตร)	ความเค้นตกค้าง (เมกะปาสกาล)
0	-654.6
0.048	-621.6
0.095	-634.7
0.165	-683.3
0.2	-658.7
0.256	-643.4
0.292	-620.9
0.353	-596.4
0.395	-573.7
0.452	-513.3
0.49	-508.4
0.55	-481.7
0.608	-497.0
0.654	-456.1
0.749	-362.3
0.844	-258.2
0.948	-138.5
1.055	-60.2
1.15	-13.4
1.252	26.3
1.397	57.3

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ความเค้นตกค้าง (เมกะปาสกาล)
0	-653.6
5	-604.8
15	-569.8
25	-555.3
35	-544.7

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ความเค้นตกค้าง (เมกะปาสกาล)
0	-653.6
5	-556.7
15	-545.8
25	-545.8
35	-526.1

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าความเค้นกดตกค้างหลังอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ความเค้นตกค้าง (เมกะปาสกาล)
0	-653.6
5	-554.2
15	-526.4
25	-504.5
35	-503.0



ภาคผนวก ข
ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพิก

ตารางผนวกที่ ข1 ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคของเหล็กกล้าไร้สนิม
มาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ระยะห่างจากผิว (มิลลิเมตร)	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (องศา)
0	2.93
0.003	2.81
0.006	2.60
0.012	2.56
0.015	2.57
0.03	2.61
0.053	2.58
0.096	2.56
0.201	2.47
0.3	2.31
0.47	2.22
0.533	2.21
0.638	2.22
0.73	2.21
0.85	2.22
0.92	2.21
1.033	2.22
1.136	2.21
1.239	2.17
1.342	2.17

ตารางผนวกที่ ข2 ความลึกของค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพืดหลังอบที่อุณหภูมิ
250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาทีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก
AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ระยะห่างจากผิว (มิลลิเมตร)	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพืด (องศา)
0	2.81
0.048	2.58
0.165	2.48
0.2	2.43
0.256	2.37
0.292	2.33
0.353	2.29
0.395	2.27
0.452	2.26
0.49	2.27
0.55	2.25
0.608	2.27
0.654	2.25
0.749	2.23
0.844	2.23
0.948	2.20
1.055	2.17
1.15	2.18
1.252	2.19
1.397	2.20

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก (องศา)
0	2.82
5	2.70
15	2.70
25	2.69
35	2.68

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีกหลังอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
เป็นเวลาที่ต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่าน
การรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก (องศา)
0	2.82
5	2.71
15	2.67
25	2.65
35	2.64

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคหลังอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
เป็นเวลาที่ต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่าน
การรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (องศา)
0	2.82
5	2.70
15	2.68
25	2.65
35	2.64



ภาคผนวก ค
ผลการต้านทานต่อความล้า

ตารางผนวกที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ยังไม่ได้รีดผิวเรียบ

ความเค้นแอมปริจูด (เมกะปาสกาล)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
700	6,196
650	11,862
550	44,028
525	64,516
500	132,908
450	1,406,011
400	13,585,657

ตารางผนวกที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

ความเค้นแอมปริจูด (เมกะปาสกาล)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
700	4,631
650	7,665
600	35,896
550	140,505
525	258,632
500	16,856,980

ตารางผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 หลังผ่านการรีดผิวเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

ความเค้นแอมปริจูด (เมกะปาสกาล)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
700	5,593
650	16,809
600	83,222
550	1,300,510
525	21,935,616

ตารางผนวกที่ ค4 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสที่
เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาท)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
0	258,632
5	1,132,263
15	1,646,359
25	988,810
35	330,460

ตารางผนวกที่ ค5 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่
เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาทึ)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
0	258,632
5	1,236,051
15	14,524,635
25	21,935,616
35	20,046,771

ตารางผนวกที่ ค6 จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายหลังการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสที่
เวลาต่างๆกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดผิวเรียบ

เวลาในการอบ (นาที)	จำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหาย
0	258,632
5	1,109,403
15	3,285,104
25	7,440,014
35	3,132,725

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายทศพร นิมิตรบัญชา
เกิดวันที่	27 มีนาคม 2533
สถานที่เกิด	อำเภอจอมทอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนเรียนดีเยี่ยมจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2556) ได้รับทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Technology Institute (Public Organization), DTI) (พ.ศ. 2556)