

ผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความเค้นตกค้างและสมบัติทางด้านความล้าของเหล็กกล้า ไร้สนิม  
มาร์เทนซิทิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก

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

ทศพร นิมิตรบัญชา\* และปฏิภาณ จุ้ยเจิม

Tossaporn Nimitbunchar<sup>1\*</sup> and Patiphan Juijerm<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>2</sup>อาจารย์ที่ปรึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

\*Corresponding author, E-mail: nimitbunchar@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิทิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก (deep rolling) โดยนำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 200-250°C เป็นระยะเวลา 5-35 นาที แล้วตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างและความแข็งจากการแปรรูป (work hardening) จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (Full Width half maximum, FWHM) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction, XRD) จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบการต้านทานความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัด (Rotating bending fatigue test) จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนส่งผลให้ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM มีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการคลายตัวของความเค้นตกค้าง แต่ค่าการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 250°C โดยใช้เวลา 25 นาที พบว่ามีค่าความต้านทานความล้าสูงขึ้นเป็นผลมาจากกลไกของการบ่มเครียด (strain aging)

คำสำคัญ: กรรมวิธีทางความร้อน เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิทิก AISI420 การรีดลึก ความเค้นตกค้าง

Abstract

In this research, an optimization of heat treatments on a deep rolled martensitic stainless steel AISI 420 was investigated. The annealing process was performed in the temperature range of 200-250°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 showed beneficial effects on the fatigue lifetimes because of a strain aging concept. Thus, higher fatigue lifetime could be expected as compared to the deep rolled condition.

**Keywords:** heat treatment, martensitic stainless steel AISI 420, deep rolling, residual stress

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมได้รับความนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ทนการกัดกร่อนได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความแข็งแรงสูง (Chandler, 1995) ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้ในการผลิตงานโครงสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น (Callister, 2000) ซึ่งมีลักษณะการใช้งานส่วนใหญ่เน้นไปในงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูง อีกทั้งยังได้รับแรงกระทำแบบซ้ำๆ เป็นวัฏจักร (cyclic load) และความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นในลักษณะความเสียหายแบบความล้า (fatigue failures) ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นกระบวนการปรับปรุงผิวของโลหะจึงมีความจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เป็นโลหะ

กระบวนการรีดลึกเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล (mechanical surface treatment) วิธีหนึ่งที่ก่อให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวรที่ผิว ทำให้เกิดความเค้นตกค้างแบบกด (compressive residual stress) และเกิดความแข็งโดยการแปรรูป (Schulze, 2006 ; Juijerm, 2007) เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของดิสโลเคชัน (dislocation) ที่บริเวณผิว ซึ่งดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปได้ยาก

เนื่องจากการขัดขวางการเคลื่อนที่กันเองของดิสโลเคชัน เป็นผลทำให้อายุการใช้งานในลักษณะเป็นแบบวัฏจักรยาวนานขึ้น และเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าลดลงอย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้งานในรูปแบบวัฏจักรไปเรื่อยๆ พบว่าความเค้นตกค้างที่ผิวลดลง เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (dislocation movement) ทำให้เกิดการคลายตัวของความเค้นตกค้าง (residual stress relaxation) (Nikitin and Besel, 2008) (Weizhi et al., 2009) จึงได้มีการศึกษาและนำกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้ค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวยังคงอยู่ได้นาน กระบวนการอบอ่อน (annealing process) เป็นกรรมวิธีทางความร้อนรูปแบบหนึ่งซึ่งมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงานหลังจากทำการรีดลึกมาแล้ว ทำให้ดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีดลึกเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น อันเนื่องมาจากอะตอมของธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้างของวัสดุจำพวกโลหะ (solute atom) เช่น อะตอมของคาร์บอน (C) หรือไนโตรเจน (N) ที่แทรกตัวอยู่ในโลหะ จะไปล้อมรอบดิสโลเคชัน ทำให้ดิสโลเคชันถูกตรึง (Lock/Pin) เป็นผลให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นการที่จะทำให้ดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ได้ต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นทำให้เกิด Upper/Lower Yield point สูงกว่าค่าเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า การบ่มเครียด (Strain aging) (Dieter, 1961) หากดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก การคลายตัวของความเค้นตกค้างก็จะ

เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ความเค้นกดดก้างที่บริเวณผิวยังคงอยู่ได้นานยิ่งขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของวัสดุเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้อะตอมในสารละลายของแข็งเคลื่อนที่มาล้อมรอบดิสโลเคชัน เกิดปรากฏการณ์ การบ่มเกร็ดขึ้นมาได้และจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อความต้านทานต่อความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยกระบวนการรีดลึก

## 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมของกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้ค่าความต้านทานความล้าสูงที่สุดของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวโลหะด้วยกระบวนการรีดลึก

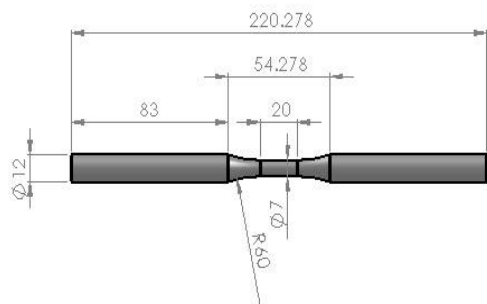
## 3. อุปกรณ์และวิธีการ

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 เป็นแท่งทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 220

มิลลิเมตร โดยนำไปตัดแต่งขึ้นรูปให้ได้รูปทรงตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM E466-96 มีลักษณะดังรูปที่ 1 หลังจากนั้นนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 มาทำการรีดผิวลึกที่อุณหภูมิปกติ โดยใช้แรงกดที่ผิว 0.75 kN และรอบการหมุนชิ้นงาน 85 rpm นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้ไปวัดค่าความเค้นกดดก้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิว โดยค่าความแข็งโดยการแปรรูปจะพิจารณาจากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีก (Full Width half maximum, FWHM) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray Diffraction) ซึ่งทำการวัดด้วยวิธี  $\sin^2\psi$  ด้วยรังสี  $\text{CrK}\alpha = 0.2291 \text{ \AA}$  ที่ระนาบ  $\{221\}$   $2\theta = 156.4^\circ$  และค่าคงตัวยืดหยุ่น (Elastic constant,  $\frac{1}{2}S_2$ )  $= 6.16 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกไปอบที่อุณหภูมิ 200-250°C เป็นเวลา 5, 15, 25 และ 35 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดมาวัดค่าความเค้นตกค้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction) สุดท้ายนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆเข้าเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัด (rotating bending fatigue testing machine) โดยใช้ค่าความเค้นแอมพลิจูด (stress amplitude) เท่ากับ 525 MPa (พิกัดเพจ จันทร์สวัสดิ์, 2556) แล้วบันทึกจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของชิ้นงาน

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 420 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

| เกรดเหล็ก | C   | Cr    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Fe   |
|-----------|-----|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| AISI 420  | 0.3 | 12.15 | 0.25 | 0.43 | 0.018 | 0.028 | 0.32 | Bal. |



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E466-96 ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4. ผลการวิจัย

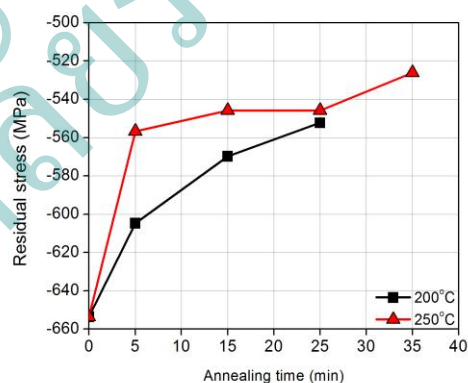
4.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึก

เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก มาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ พบว่าค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้มีค่าเท่ากับ  $-653.58$  MPa และ  $2.82^\circ$  ตามลำดับ หลังจากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวไปทดสอบความล้าโดยใช้ค่าความเค้นแอมพลิจูด  $525$  MPa พบว่าจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของชิ้นงานมีค่า  $2.58 \times 10^5$  รอบ (ดังแสดงผลในรูปที่ 4)

4.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึก แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึก มาอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แล้วทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ พบว่าค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบมีแนวโน้มที่จะลดลงดังที่แสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ซึ่งการคลายตัว

ของค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  จะเกิดการคลายตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิ  $250^\circ\text{C}$  และเมื่อใช้เวลายาวนานขึ้น อัตราการคลายตัวของความเค้นตกค้างและค่า FWHM จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวมาทดสอบความล้า โดยใช้ค่าความเค้นแอมพลิจูด  $525$  MPa จะได้ค่าจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายดังรูปที่ 4 จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ  $250^\circ\text{C}$  เป็นเวลา  $25$  นาที จะเป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ  $2.1 \times 10^7$  รอบ

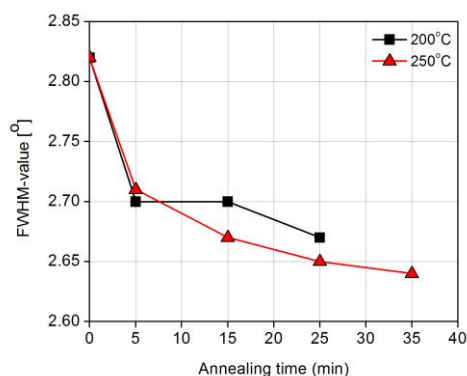


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

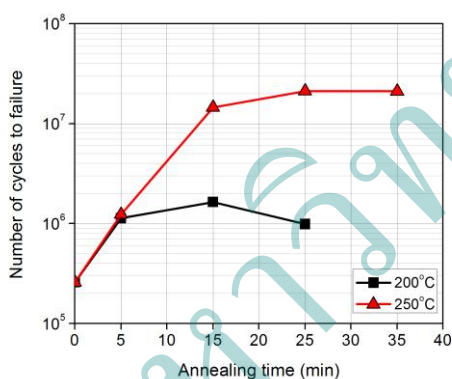
#### 5. การอภิปรายผล

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 มาทำการรีดลึกจะทำให้ที่บริเวณผิวเกิดการแปรรูปถาวร เกรนถูกอัดตัวเกิด ดิสโลเคชั่นเพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชั่นเกิดยากขึ้นเนื่องจากเกิดการขัดขวางกันเองของดิสโลเคชั่นที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเค้นกดตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิวขึ้น (Juijerm, 2007) จะเห็นได้จากค่าความ

เส้นตกค้างและค่า FWHM ที่วัดได้มีค่าที่สูง (ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 )



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เมื่อนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จะพบว่าค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Schulze, 2006) (Nikitin and Besel, 2008) ความร้อนจะส่งผลให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นทำให้ดิสโลเคชันมีการจัดเรียงตัวใหม่ให้เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้นจึงทำให้ค่าความเค้นตกค้างและ

ค่า FWHM ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามถ้าชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะทำให้อะตอมในสารละลายของแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาล้อมรอบดิสโลเคชันทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชันจึงเกิดได้ยาก ดังนั้นค่าความเค้นตกค้างที่ผิวจึงยังคงอยู่หรือลดลงช้าทำให้ชิ้นงานสามารถต้านทานการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้ดี ชิ้นงานจึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (Altenberger and Scholtes, 1999) ซึ่งดูได้จากการอบที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 25 นาทีจะเป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด

## 6. บทสรุป

จากการทดลองโดยการนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึงมาอบที่อุณหภูมิ 200-250°C เป็นเวลา 5-35 นาที เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการรีดลึงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ก่อให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวรที่บริเวณผิว ทำให้เกิดความเค้นกดตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิว ส่งผลให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่า FWHM มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าความเค้นตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปมีค่าเท่ากับ -653.58 MPa และ 2.82° ตามลำดับ

2. เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึงมาอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเค้นกดตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิวมีค่าลดลง แต่ถ้าอบที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จะทำให้สามารถต้านทานความเสียหายที่เกิดจากความล้าได้จำนวนรอบที่จะเสียหายสูงที่สุด ซึ่ง

อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบเหล็กกล้าไร้  
สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึก คือ 250°C  
เป็นเวลา 25 นาที

## 7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก  
สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.)  
ปีงบประมาณ 2556 ภายใต้สัญญาเลขที่ 570302

## 8. เอกสารอ้างอิง

พงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์. (2556). อุณหภูมิที่เหมาะสมใน  
การรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม  
AISI 420. การประชุมวิชาการทางโลหะ  
วิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. 24-25  
ตุลาคม 2556 จังหวัด กระบี่.

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

Callister, William 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 2: 27-810.

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

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

Nikitin, I., and Besel, M. (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., Jiang, C., and Ji, V. (2009). Thermal  
Relaxation of Residual stresses in Shot  
Peened Surface Layer on TiB2/Al  
Composite at Elevated Temperatures.  
Materials Transactions 50(6):1499-1501.