



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

High Temperature Deep Rolling on Stainless Steels AISI 420

นามผู้วิจัย ว่าที่ร้อยตรีพงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริญญา จ้อยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พิชรพันธ์, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

High Temperature Deep Rolling on Stainless Steels
AISI 420

โดย

ว่าที่ร้อยตรีพงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์, ว่าที่ร้อยตรี 2557: การรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูงบน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฎิภาณ จ้อยเจิม, Dr.-Ing. 51 หน้า

กระบวนการรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูงถูกพัฒนามาจากกระบวนการรีดลึกลูกที่อุณหภูมิห้องและถูกใช้กับวัสดุโลหะหลายชนิด งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูงให้มีความเหมาะสมต่อการต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 โดยใช้อุณหภูมิในการรีดลึกลูกที่ต่างกันตั้งแต่ 150 ถึง 400 °C แล้วทำการตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ (X-Ray diffraction) จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัด ส่วนผลการทดลองจะพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดกับจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายและค่าความเค้นตกค้างจะถูกเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึกลูก, รีดลึกลูกที่อุณหภูมิห้อง, และรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูง จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM มีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการคลายตัวของความเค้นตกค้าง แต่ค่าขีดจำกัดความล้าของชิ้นงานรีดลึกลูกที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200 °C พบว่ามีค่าการต้านทานความล้าสูงขึ้นเป็นผลมาจากกลไกของการบ่มเครียด (Stain aging)

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pongthep Jansawat, Acting Sub Lt. 2014: High Temperature Deep Rolling on Stainless Steels AISI 420. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Patipan Juijerm, Dr.-Ing. 51 pages.

High temperature deep rolling was developed from deep rolling at room temperature and performed on various metallic materials. In the present paper, optimization of high temperatures deep rolling on stainless steel AISI 420 has been investigated. The high temperatures deep rolling was performed with temperature range of 150 to 400°C. Residual stresses and Full width at half maximum (FWHM-values) were determined using X-ray diffraction method. The fatigue tests have been tested using rotary bending fatigue test. The results of the investigations, e.g. s/n curve and residual stress of the high temperatures deep rolled were compared to untreated, deep rolled at room temperature and high temperature deep rolled conditions. Thermal affected on decreasing of residual stress and work hardening because of thermal residual stress relaxation. However, deep rolling at 200°C induced beneficial effects on increasing the fatigue lifetimes because of mechanism of strain aging.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. ปฏิภาณ จ้อยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆเรื่อง รวมทั้งความช่วยเหลือในด้านการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับข้อมูลในงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์และการสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือต่างๆ อาทิเช่น เครื่องรีดลึก (Deep rolling)

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการและบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนและมอบความรู้ รวมทั้งการให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอขอบแต่คุณพ่อคุณแม่ ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา สนับสนุนด้านการศึกษา คอยให้คำแนะนำทุกๆเรื่องที่ผ่านมาในชีวิต และกำลังใจที่มอบให้ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

พงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์

กุมภาพันธ์ 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	39
สรุป	39
ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	41
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ค่าความเค้นตกค้าง และค่า FWHM	44
ภาคผนวก ข จำนวนรอบของความเสียหายจากเครื่องทดสอบความล้า	48
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	51

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบผลการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล	7
2	คุณสมบัติที่เหมาะสมใรการรีดล็กที่อุณหภูมิสูงของแต่ละวัสดุ	17
3	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420	20
ตารางผนวกที่		
ก1	ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่ล็กเข้ามาในเนื้อวัสดุของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดล็ก	45
ก2	ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่ล็กเข้ามาในเนื้อวัสดุของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดล็กที่อุณหภูมิ 200° C	46
ก3	ค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิต่างๆ	47
ข1	จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ด้วยความเค้นแอมปริจูดต่างๆ	49
ข2	จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดล็กที่อุณหภูมิห้องด้วยความเค้นแอมปริจูดต่างๆ	50
ข3	จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดล็กที่อุณหภูมิ 200° C ด้วยความเค้นแอมปริจูดต่างๆ	50

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงกลไกการเกิดความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของชิ้นงาน	7
2	จำนวนรอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการที่ต่างกัน	8
3	แสดงระยะจากผิวที่มีค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM หลังการรีดลึกของ AISI 304 และ SAE 1045	9
4	แสดงความแข็งที่ผิวของ AISI 304 ที่ผ่านการรีดลึก	10
5	S-N Curve ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึก	10
6	ปรากฏการณ์ การบ่มเครียด (Strain ageing) ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	12
7	การเกิด การบ่มเครียด (Strain ageing) ในช่วงต่างๆของอุณหภูมิ	13
8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความเค้นตกค้าง และค่า FWHM (a) ค่าความเค้นกดตกค้างกับความลึกเข้ามาที่ผิว (b) ค่า FWHM กับความลึกเข้ามาที่ผิว	14
9	ค่าอายุการใช้งานจากความล้าที่ทดสอบการใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆโดยที่ชิ้นงานทดสอบการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง	15
10	ค่าความแข็งจากบริเวณผิวเข้ามาในเนื้อชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ	16
11	แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานจากกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงกับชิ้นงานที่รีดลึกที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ได้ผ่านการรีดลึก	17
12	ค่าความเค้นกดตกค้างที่ลึกเข้ามาในผิวเหล็กอัลลอย AISI 4140 ที่ผ่านกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กที่เงื่อนไขต่างๆ	18
13	แสดงอายุการใช้งานจากความล้าที่ผ่านกระบวนการยิงผิวเหล็กที่เงื่อนไขต่างกัน	19
14	รูปแบบและลักษณะชิ้นงานตามมาตรฐานในการทดสอบความล้าเครื่อง	21
15	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	แผนภาพงานวิจัยการรีดลิกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420	24
17	S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลิก	25
18	ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง	26
19	ความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง	27
20	S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง	28
21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เมื่อทำการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ	29
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เมื่อทำการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ	29
23	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ	30
24	ความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C	31
25	ความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C	32
26	S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิสูง (200 °C)	33
27	S-N curve เปรียบเทียบขีดจำกัดความล้าระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลิกและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง	34
28	เปรียบเทียบความลึกของค่าความเค้นกดตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิห้องและรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C	36
29	เปรียบเทียบความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิห้องและรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C	37

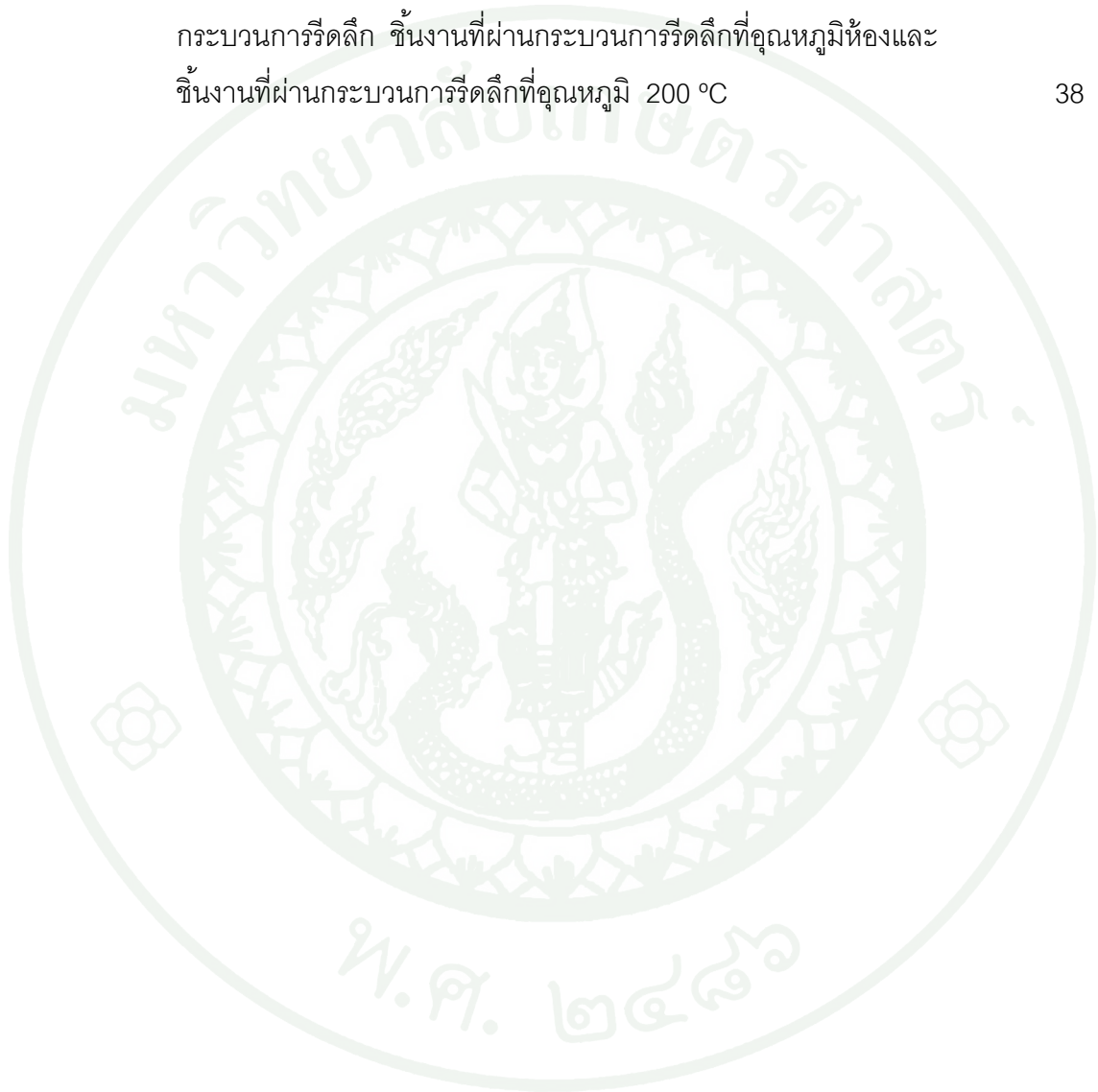
สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 30 S-N curve เปรียบเทียบขีดจำกัดความล้าระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึก ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้องและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C

38



การรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

High Temperature Deep Rolling on Stainless Steels AISI 420

คำนำ

ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ หรืองานโครงสร้างที่มีชิ้นส่วนประกอบที่เป็นโลหะรวมไปถึงชิ้นส่วนของเครื่องจักรภายในโรงงาน มักเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue) เป็นส่วนใหญ่ สาเหตุมาจากภาระงานที่มากกระทำต่อวัสดุโลหะหรือส่วนประกอบในเครื่องจักรเป็นแบบวัฏจักร หรือเป็นแรงแบบซ้ำๆ (cyclic load) จึงทำให้เกิดความเสียหายจากความล้า (Fatigue Failures) ซึ่งในขณะที่วัสดุได้รับแรงกระทำแบบซ้ำๆ นั้นจะทำให้เกิดจุดศูนย์กลางของความเค้นขึ้นที่ผิว (Stress Concentration) จึงทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรนั้นเริ่มเกิดความเสียหาย โคนจุดเริ่มต้นของความเสียหายจากความล้าจะเริ่มขึ้นที่ผิว โดยที่ผิวจะเริ่มเกิดรอยแตก (Crack Initial) ซึ่งแรงที่ใช้ในการเปิดรอยแตกบริเวณที่ผิวคือแรงดึง (Tensile Stress) และเมื่อชิ้นงานยังคงถูกใช้งานแบบวัฏจักรไปเรื่อยๆ รอยแตกจะเริ่มโตขึ้น (Crack Propagation) ลุกกลมเข้าไปภายในชิ้นงานทำให้พื้นที่ในการรับแรงของวัสดุหรือชิ้นงานลดลง และเมื่อภาระงานที่มากกระทำต่อวัสดุยังคงที่ แต่พื้นที่รับแรงลดลงความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดความเสียหายในที่สุด ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ส่งสัญญาณออกมา และไม่สามารถตรวจสอบได้ หรือทำการตรวจสอบได้ยาก จึงเป็นอันตรายต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก

หากมีการทำให้ที่บริเวณผิวสามารถต้านทานแรงดึงได้จะส่งผลทำให้การเริ่มเกิดรอยแตกร้าวขึ้นที่ผิวได้ยาก โดยทำให้ที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีความเค้นกดตกค้าง (Compressive Residual Stress) เพื่อช่วยต้านแรงดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิว ทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นที่ผิวลุกลามต่อไปได้ยาก ซึ่งการเพิ่มความเค้นกดตกค้างที่ผิวผิวสามารถทำได้โดยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล (mechanical surface treatment) เช่น กระบวนการยิงด้วยลูกเหล็ก (Shot Peening) และกระบวนการรีดลึก (Deep rolling) จะช่วยทำให้ที่บริเวณผิวมีความเค้นกดตกค้างขึ้นต้านทานการเกิดรอยแตกที่บริเวณผิว และทำให้ที่ผิวมีปริมาณของดิสโลเคชัน (Dislocation)

เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น ทำให้ที่ผิวมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Work hardening) เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานที่มีผลมาจากความล้าสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น (Juijerm, 2007)

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้งานชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลจะพบว่า ดิสโลเคชันที่บริเวณผิวจะเกิดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดการคลายตัวของความเค้นตกค้างที่ผิว (Residual stress relaxation) (Weizhi et al., 2009) จึงได้มีการพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลโดยอาศัยหลักการ การบ่มเครียด (Strain Ageing) โดยอะตอมในโครงสร้างของวัสดุจะไปล้อมรอบดิสโลเคชัน ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น หากดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก นั้นหมายถึงการเกิดการเสียรูปแบบถาวรก็จะยากยิ่งขึ้น ทำให้วัสดุสามารถต้านทานการเกิดการเสียรูปอย่างถาวรได้ รวมไปถึงการเกิดรอยแตกที่บริเวณผิว จึงส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานยาวนานขึ้น ทั้งนี้ปัจจัยในการทำให้เกิดผลของการบ่มเครียด คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ผสมอยู่ในโครงสร้างของวัสดุ (Solute Atom) และ อุณหภูมิที่วัสดุหรือชิ้นงานได้รับ โดยอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยในการเร่งการเคลื่อนที่ของอะตอมไปล้อมดิสโลเคชัน

ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ขึ้น (High temperature deep rolling on Stainless Steels AISI 420) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ให้มีการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้กันอย่างแพร่หลาย โดยการศึกษากระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงจะมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมทางด้านความร้อนที่ใช้ในกระบวนการรีดลึก เนื่องจากอุณหภูมินั้นจะส่งผลต่อการลดลงของปริมาณดิสโลเคชันที่เกิดขึ้น จึงต้องมีการพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิอย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการรีดลึงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิต่างๆ
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลึงที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420
3. เพื่อเป็นการพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล (Mechanical surface treatment) ให้มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการใช้งานจากการเกิดคราบน้ำมัน

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าไร้สนิม

ในปัจจุบัน เหล็กกล้าไร้สนิมได้นิยมใช้กันแพร่หลาย ทั้งในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น อันเนื่องมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป โดยมีธาตุโครเมียม นิกเกิล และคาร์บอน เป็นธาตุหลัก โคนสัดส่วนของธาตุโครเมียมต้องไม่ต่ำกว่า 12% จึงจะทำให้เกิดการสร้างแผ่นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าทำให้สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศได้

โดยทั่วไปมีการแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออกเป็น 5 กลุ่มหลัก คือ

1.1 กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์ ส่วนใหญ่มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 12-17% มีสมบัติที่แม่เหล็กดูดติดได้ และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูง ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ปานกลาง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 403, 409 เป็นต้น แต่ไม่สามารถชุบแข็งได้และทำการขึ้นรูปได้ยาก ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกจึงมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก (มโนส, 2542, 2543)

1.2 กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกลุ่มนี้เป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 14-30% นิกเกิลประมาณ 8-35% และมีปริมาณของคาร์บอนไม่เกิน 0.15% โดยน้ำหนัก ซึ่งการที่ผสมนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ และบางครั้งก็มีการผสมธาตุอื่นๆอีก เช่น โมลิบดีนัม ซิลิกอน และแมงกานีส เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆให้ดีขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทาง

ความร้อน มีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากใกล้เคียงกับของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความยืด(Elongation) สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก จึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก(มันส์, 2542, 2543) ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เช่น เกรด AISI 403, 316L และ 301 เป็นต้น

1.3 กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียมและคาร์บอนในปริมาณที่พอเหมาะเพื่อสามารถเปลี่ยนโครงสร้างสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ โดยทั่วไปส่วนผสมของปริมาณโครเมียมจะอยู่ในช่วงประมาณ 12-18% และมีปริมาณของคาร์บอนอยู่ในช่วงประมาณ 0.15-1% ทำให้มีสมบัติที่แม่เหล็กดูดติดได้ มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง และสามารถชุบแข็งได้ ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงมาก แต่จะมีค่าความยืดต่ำ (มันส์, 2542, 2543) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จึงนิยมใช้ในงานแม่พิมพ์พลาสติก วาล์ว เครื่องตัด เช่น มีด กรรไกรใบพัดเรือ กังหัน เป็นต้น และอุปกรณ์เครื่องมือทางการแพทย์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เช่น เกรด AISI 403, 410, 420, 431, และ 440 เป็นต้น

1.4 กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นเหล็กกล้าที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยมีโครงสร้างผลระหว่างออสเทนไนต์และเฟอไรต์ ซึ่งมีปริมาณของโครเมียมผสมประมาณ 21-28% และปริมาณของนิกเกิลผสมประมาณ 3-7.5 % เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว(Ductility) สูง สามารถเชื่อมและหล่อได้ง่าย เนื่องจากมีปริมาณของเฟอไรต์อยู่ในโครงสร้างค่อนข้างมาก แต่ข้อเสียของเหล็กกลุ่มนี้คือขึ้นรูปได้ยากเพราะมีโครงสร้างทั้งสองเฟส และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนดีมาก (มันส์, 2542) ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เช่น เกรด 2304, 2205 และ 2507 เป็นต้น

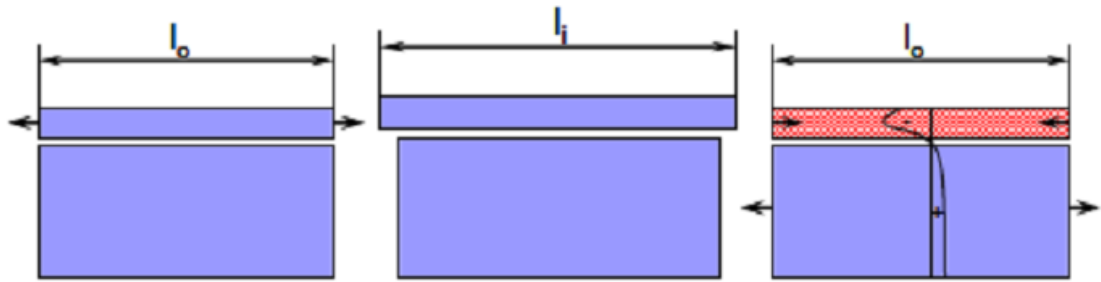
1.5 กลุ่มทนความร้อนสูง (Precipitation Hardening: PH)

เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่สามารถอบชุบให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยอาศัยการตกผลึก โดยที่ความเหนียวของเหล็กไม่ลดลงมาก และไม่สูญเสียสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งมีปริมาณของโครเมียมผสมประมาณ 15-18% และปริมาณของนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 3-8% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปั๊ม และหัววาล์ว เป็นต้น ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึกนี้ได้แก่ เกรด AISI 630, 635, PH13-9Mo, และ AM-350 เป็นต้น (มนัส, 2542)

ดังนั้น การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้งานต่างๆที่มีความซับซ้อนและรับภาระทางกลที่สูงเพิ่มมากขึ้น จึงประสบปัญหาด้านการสึกหรอของชิ้นงานหรือเกิดการแตกหักในระหว่างการใช้งาน ทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นและสร้างความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่เน้นงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงต้องมีการปรับปรุงผิวให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการใช้งานในการต้านทานความล้าที่สูงขึ้น และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

2. กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล

เป็นกระบวนการในการปรับปรุงผิวโลหะให้มีประสิทธิภาพในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติในการต้านทานต่อความล้ารวมไปถึงการเพิ่มสมบัติการต้านทานการสึกกร่อนของวัสดุ ซึ่งหลักการของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล คือ ทำให้เกิดการเสียดสีอย่างถาวรในบริเวณที่ผิวแต่ในขณะเดียวกันวัสดุไม่สามารถขยายตัวออกได้เนื่องจากเนื้อของวัสดุด้านในยึดติดเอาไว้ จึงทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้น เกินคิสิกส์เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 1 ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การยิงด้วยเม็ดโลหะ (Shot Peening), การยิงด้วยเลเซอร์ (Laser Shock Peening), การบวกรีดลึก (Deep Rolling) เป็นต้น



ภาพที่ 1 แสดงกลไกการเกิดความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

ที่มา: (Juijerm, 2007)

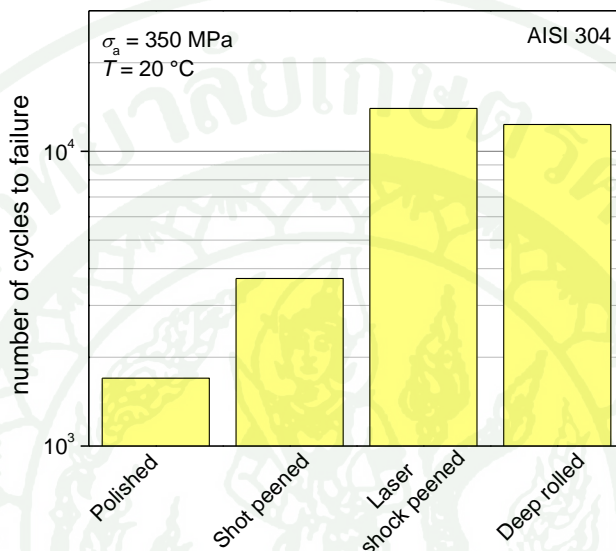
ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นการปรับปรุงสมบัติบริเวณผิว เช่นทำให้เกิดความเค้นตกค้าง หรือเกิดสภาวะความแข็งโดยการแปรรูป (Work Hardening) ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน และความเรียบพื้นผิว ที่แตกต่างกันตามกรรมวิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการทางกล แสดงดังในตาราง 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล

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

ที่มา: (Juijerm, 2007)

จากงานวิจัยของ Juijerm (2007) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 ด้วยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางกล 3 ชนิด คือ กระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ กระบวนการยิงด้วยเลเซอร์และกระบวนการรีดลึก โดยจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลแล้วจะทำให้มีจำนวนรอบที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2 จำนวนรอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ที่มา: (Juijerm, 2007)

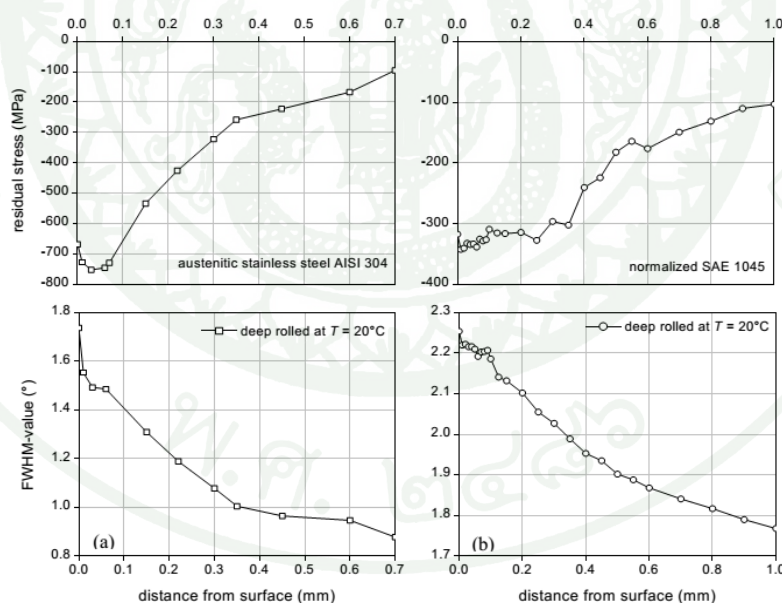
จากกราฟพบว่าค่าความต้านทานความล้าของกระบวนการยิงด้วยเลเซอร์จะมีค่าการใช้งานได้นานที่สุด รองลงมาคือกระบวนการรีดลึก และสุดท้ายคือกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็ก แต่เนื่องจากกระบวนการยิงด้วยเลเซอร์นั้นเป็นเทคนิคที่สูง มีค่าใช้จ่ายที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการรีดลึก ดังนั้นกระบวนการรีดลึกจึงเป็นที่นิยมมากกว่าการยิงด้วยเลเซอร์

2.1 กระบวนการรีดลึก (Deep Rolling)

เป็นหนึ่งในกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลมีหลักการคือ ใช้ลูกรีด (roller) รีดที่ผิวของโลหะทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ส่งผลให้เกิดความเค้นกดตกค้าง ชั้นที่บริเวณผิว กระบวนการรีดลึกเป็นกระบวนการที่ให้ความเรียบสูงและมีค่าความลึกของความเค้นกดตกค้าง

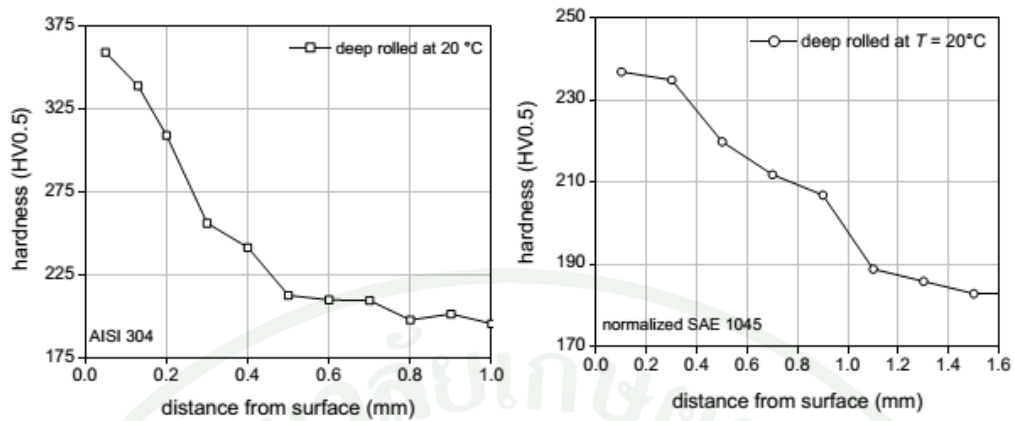
มากกว่าเทคนิคอื่นๆจึงช่วยในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานความล้า (Fatigue) ของวัสดุได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยของ Juijerm (2007) จากศึกษากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการทางกล(โดยเฉพาะการรีดลึก) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 และเหล็กกล้าคาร์บอน SAE 1045 เพื่อดูประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยสมบัติทางกลของชิ้นงานพบว่า จากการตรวจวัด XRD ความเค้นตกค้างและความแข็งโดยแสดงผลในรูปของค่า FWHM ดังรูปที่ 2.1 ความเค้นตกค้างสูงสุดคือ -750 และ -340 MPa ที่ระยะลึก 30 และ 20 μm ของการรีดลึก AISI 304 และ SAE 1045 ตามลำดับดังภาพที่ 3 และพบว่า การรีดลึกช่วยเพิ่มความแข็งที่ผิวดังแสดงในภาพที่ 4 (a) และ (b) AISI 304 และ SAE 1045 เพิ่มขึ้นประมาณ 125 และ 50HV ตามลำดับ และพบว่า การรีดลึกช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อความล้า แสดงผลในภาพที่ 5 (a) และ (b) ซึ่งแสดงในรูปกราฟ S-N Curve ของการรีดลึก AISI 304 และ SAE 1045 ตามลำดับ



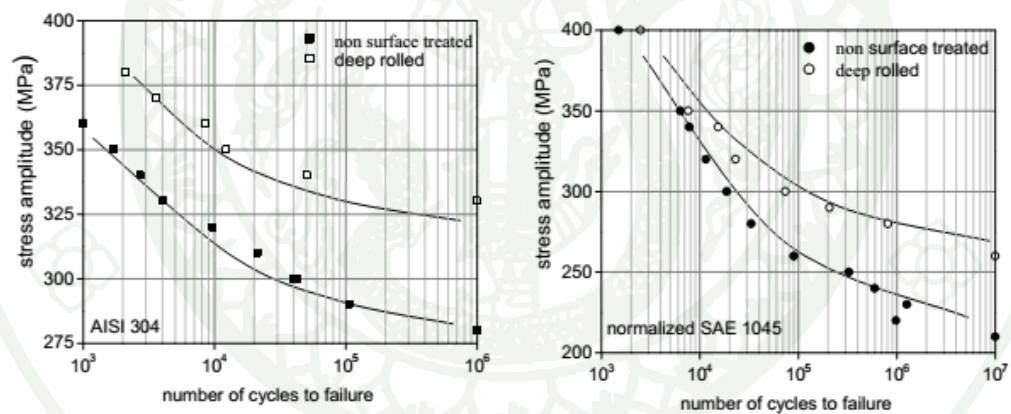
ภาพที่ 3 แสดงระยะจากผิวที่มีค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM หลังการรีดลึกของ AISI 304 และ SAE 1045

ที่มา: (Juijerm, 2007)



ภาพที่ 4 แสดงความแข็งที่ผิวของ AISI 304 และ SAE 1045 ที่ผ่านการรีดลึก

ที่มา: (Juijerm, 2007)



ภาพที่ 5 S-N Curve ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึก

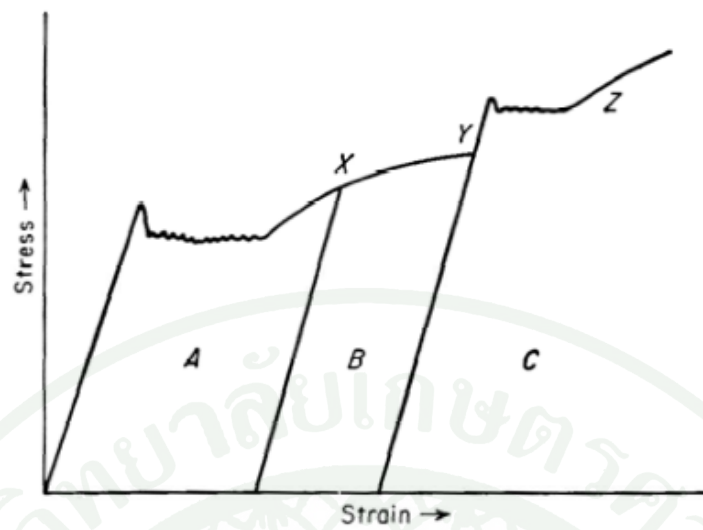
ที่มา: (Juijerm, 2007)

จากหลักการดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุประเภทโลหะได้ อันเนื่องมาจากกลไกการเกิดความเสียหายแบบความล้าจะเกิดขึ้นจากบริเวณผิวเป็นอันดับแรก โดยจะเริ่มเกิดรอยแตกขึ้นที่ผิวซึ่งรอยแตกนั้นเกิดมาจากการใช้งานที่ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นที่ผิวและทำให้รอยแตกลุกลามเข้าไปด้านในของชิ้นงานเรื่อยๆ จนเกิดความเสียหายในที่สุดดังนั้นหากมีการ

ป้องกันการเกิดรอยแตกที่ผิวได้ดีก็จะช่วยยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานยิ่งขึ้นรวมไปถึงการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันให้มีการเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้นและการรักษาประมาณของดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลให้คงอยู่ในวัสดุให้ยาวนานที่สุด ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลให้ดียิ่งขึ้น เช่น กระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Deep Rolling), การยิงลูกเหล็กที่อุณหภูมิสูง (Warm Shot Peening) เป็นต้น

3. การพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกล

เป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่พัฒนามาจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลแบบปรกติ แต่ได้มีการเพิ่มปัจจัยทางด้านอุณหภูมิเข้าไปเกี่ยวข้อง หลักการคือในระหว่างกระบวนการปรับปรุงพื้นผิว จะมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดิสโลเคชันที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวจะถูกอะตอมในโลหะผสมที่ละลายอยู่ในโครงสร้าง (Solution atom) จะเคลื่อนที่เข้ามาจับหรือล้อมรอบดิสโลเคชันที่เกิดขึ้น ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า การบ่มเครียด (Strain ageing) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) ซึ่งในโลหะจะมีอะตอมต่างๆมากมายโดยเฉพาะอะตอมของคาร์บอนหรือไนโตรเจนที่แทรกตัวอยู่ในโลหะผสม เป็นตัวทำหน้าที่ตรึง (Lock/Pin) ดังนั้นการที่จะทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่จำเป็นต้องมีแรงเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ออกมาจากการถูกตรึงจึงทำให้เกิดเป็นจุดครากสูงสุด (Upper Yield Point) และเมื่อดิสโลเคชันเคลื่อนที่ต่อไปได้จะทำให้เกิดเป็นจุดครากต่ำสุด (Lower Yield Point) จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การบ่มเครียด (Dieter, 1961)

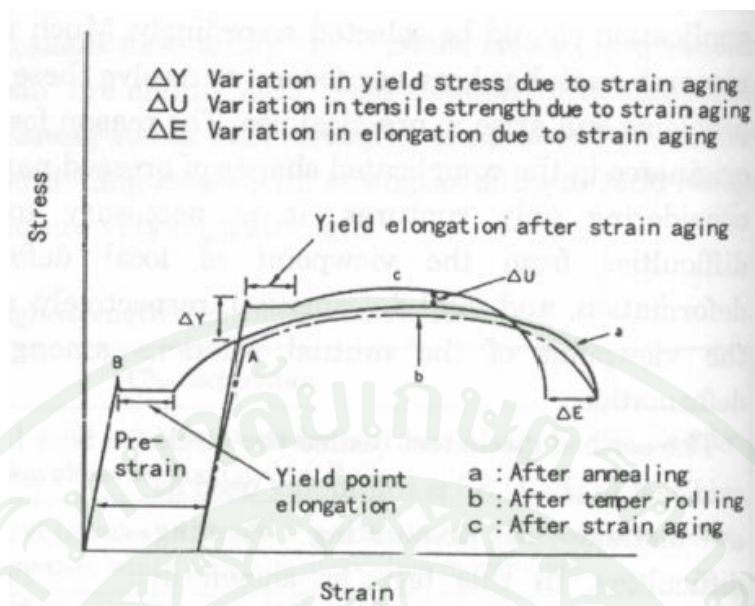


ภาพที่ 6 ปรากฏการณ์ การบ่มเครียด (Strain ageing) ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ที่มา: Dieter (1961)

จากรูปภาพ แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ได้รับแรงกระทำจนกระทั่งผ่านจุดคราก (Yield Point) จนถึงจุด X แล้วปล่อยแรงกระทำ หลังจากนั้นออกแรงกระทำต่อไปจนถึงจุด Y (โดยไม่ปล่อยให้เกิดการบ่ม (Ageing) หรือใช้ความร้อนกระตุ้น) จะพบว่าไม่เกิดเห็นจุดคราก แต่เมื่อปล่อยชิ้นงานไว้หลายวันให้เกิดการบ่ม หรือใช้ความร้อนกระตุ้น เมื่อออกแรงกระทำกับชิ้นงานอีกครั้งจะพบว่า มีค่าที่จุดครากสูงกว่าค่าเดิม

จากการที่จุดครากมีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่า จะต้องใช้แรงในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปอย่างถาวรยากขึ้น วัสดุจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดัดยืดจะลดลง



ภาพที่ 7 การเกิด การบ่มเครียด (Strain ageing) ในช่วงต่างๆของอุณหภูมิ

ที่มา: Dieter (1961)

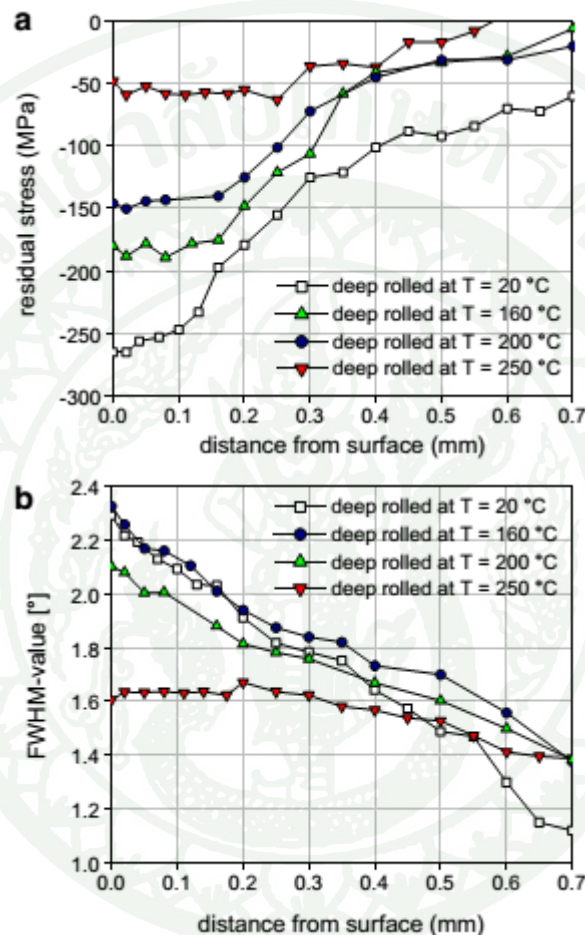
ปรากฏการณ์ การบ่มเครียด ที่เกิดขึ้น ในอุตสาหกรรมรีดเหล็กจะไม่นิยมให้เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อนำชิ้นงานไปแปรรูป จะเกิดเป็นรอยที่ผิวเหล็ก เรียกว่า Stretcher strain หรือ Lueders band (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย)

3.1 การรีดลึกที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Deep Rolling)

เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากการรีดลึกที่อุณหภูมิต่ำ แต่ได้มีการเพิ่มปัจจัยทางด้านอุณหภูมิเข้าไปเกี่ยวข้องในระหว่างกระบวนการรีดลึก ทำให้เกิดดิสโลเคชันขึ้นที่บริเวณผิวไปพร้อมๆกับการที่อะตอมในสารละลายของแข็งจะเคลื่อนที่มาล้อมจับดิสโลเคชันที่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าปริมาณของดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นจะลดลงจากผลกระทบของความร้อนในกระบวนการรีดลึก แต่อิทธิพลของการบ่มแข็งก็ส่งผลให้ค่าจํานวนรอบการใช้งานสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการคงอยู่ของดิสโลเคชัน และค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นที่ผิวอยู่ได้นานขึ้น (Juijerm and Altenberger, 2007)

จากงานวิจัยของ Juijerm and Altenberger, (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนอลูมิเนียมอัลลอย AA6110 (Al-Mg-Si-Cu) โดย

งานวิจัยนี้ได้ทำการรีดลึกลงที่อุณหภูมิสูง ตั้งแต่อุณหภูมิ 20 °C, 160 °C, 200 °C และ 250 °C โดยชิ้นงาน AA6110 ได้ผ่านกระบวนการอบทางความร้อนมาก่อนที่อุณหภูมิ 525 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แรงในการลึกลงที่ 0.27 kN หลังจากนั้นนำไปทดสอบ วัดค่าความเค้นกดตกค้างด้วยเครื่อง X-ray diffraction ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 8

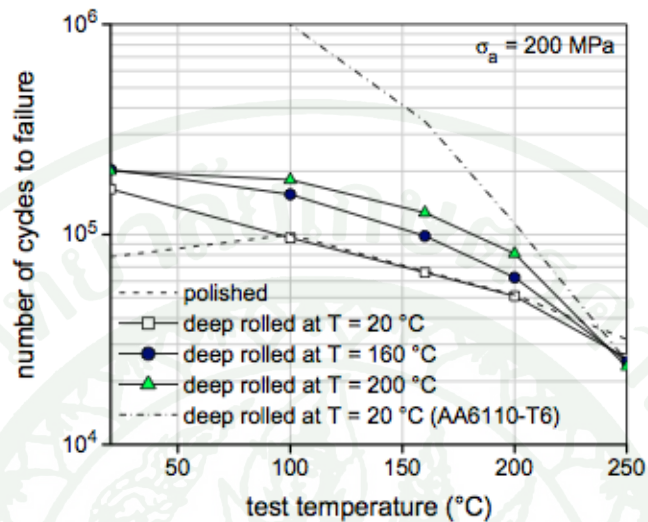


ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในการรีดลึกลงที่ส่งผลต่อค่าความเค้นตกค้าง และค่า FWHM (a) ค่าความเค้นกดตกค้างกับความลึกเข้ามาที่ผิว (b) ค่า FWHM กับความลึกเข้ามาที่ผิว

ที่มา: Juijerm and Altenberger, (2006)

โดยจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 20 °C จะมีค่าความเค้นกดตกค้างมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความเค้นกดตกค้างลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 250 °C ค่าความเค้นกด

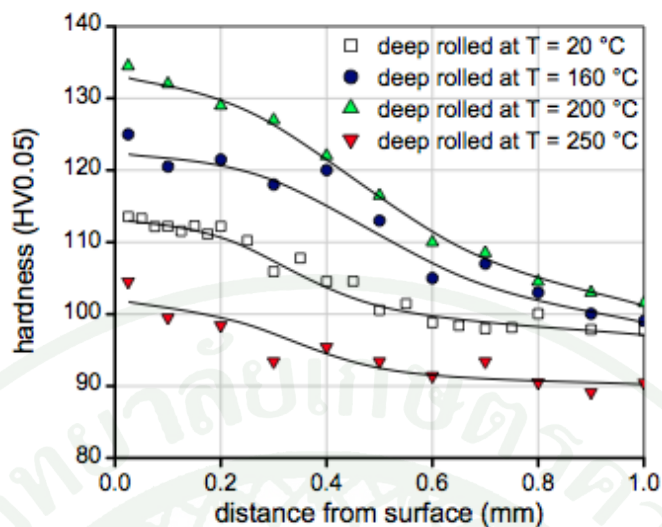
ตกค้างจะต่ำที่สุด และทำการทดสอบความล้าด้วย เครื่องทดสอบความล้าแบบ ดึง-กด ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ค่าอายุการใช้งานจากความล้าที่ทดสอบการใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆโดยที่ชิ้นงานทดสอบการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง

ที่มา: Juijerm and Altenberger, (2006)

ซึ่งจากผลการทดสอบความล้าแสดงให้เห็นถึงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 160 °C - 200 °C ทั้งนี้เป็นผลมาจาก อะตอมของสารละลายของแข็งที่อยู่ในโครงสร้างมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนส่วนหนึ่งและมีการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน อายุการใช้งานของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 250 °C กลุ่มของตะกอนมีขนาดใหญ่การขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันส่งผลได้น้อย โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ค่าความแข็งจากบริเวณผิวเข้ามาในเนื้อชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Juijerm and Altenberger, (2006)

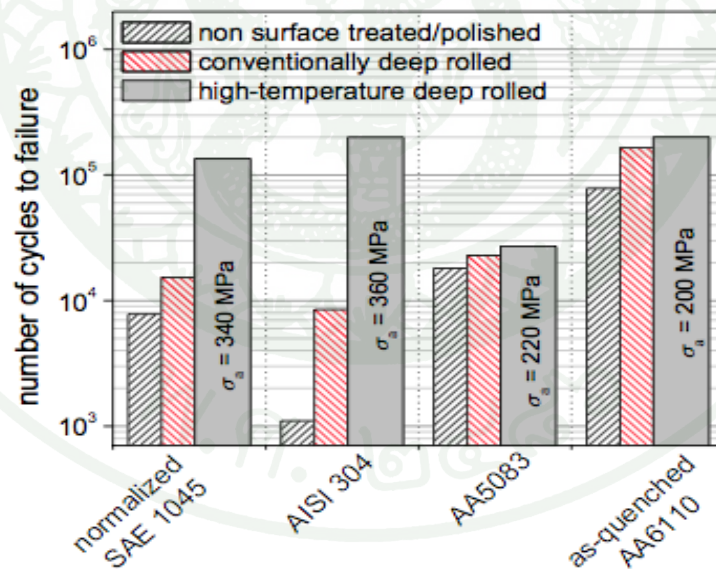
ดังนั้น ในกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงในแต่ละวัสดุ ก็จะมีค่าของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของแต่ละวัสดุ ทำให้มีการศึกษาในวัสดุอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงให้ดียิ่งขึ้น

จากงานวิจัยของ Juijerm and Altenberger, (2007) ได้ทดสอบความล้ากับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงโดยทำการเปรียบเทียบกระบวนการดังกล่าวด้วยชิ้นงาน 4 ชนิด คือ Normalized SAE 1045, AISI 304, AA5083, และ as-quenched AA6110 โดยทำการทดสอบด้วยกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละวัสดุ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติที่เหมาะสมใการรีดล็กที่อุณหภูมิสูงของแต่ละวัสดุ

Materials	Optimized temperature (°C)
Normalized SAE 1045	350
AISI 304	550
AA5083	150
as-quenched AA6110	200

หลังจากการทดลอง ได้ทำการเปรียบเทียบกระบวนการรีดล็กที่อุณหภูมิห้องและรีดล็กที่อุณหภูมิสูง ในแต่ละวัสดุพบว่าอายุการใช้งานจากความล้าในกระบวนการรีดล็กสูงกว่กระบวนการรีดล็กที่อุณหภูมิห้องและมากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการรีดล็ก ดังภาพที่ 11

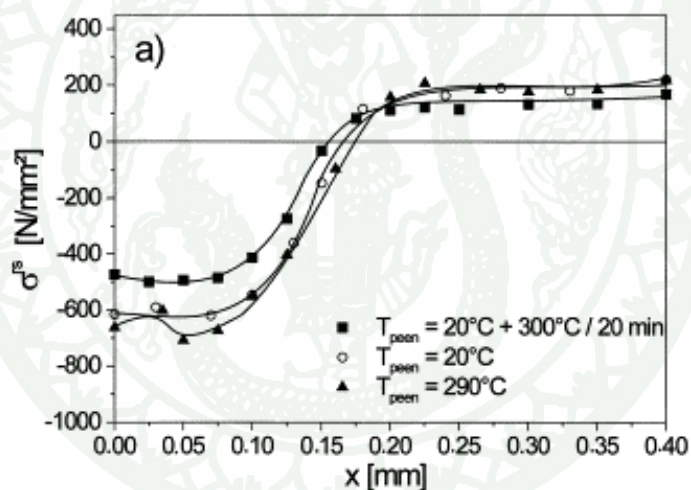


ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานจากกระบวนการรีดล็กที่อุณหภูมิสูงกับชิ้นงานที่รีดล็กที่อุณหภูมิห้อง และไม่ได้ผ่านการรีดล็ก

ที่มา: Juijerm and Altenberger, (2007)

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการรีดลึงที่อุณหภูมิสูงสามารถปรับปรุงสมบัติการใช้งานอันมีผลมาจากความล้าให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น มากกว่ากระบวนการรีดลึงที่อุณหภูมิต่ำและชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึง ซึ่งแต่ละอุณหภูมิในการรีดลึงของแต่ละวัสดุก็จะแตกต่างกันไปอาจมีผลมาจากพฤติกรรมทางด้านความร้อนของแต่ละวัสดุ

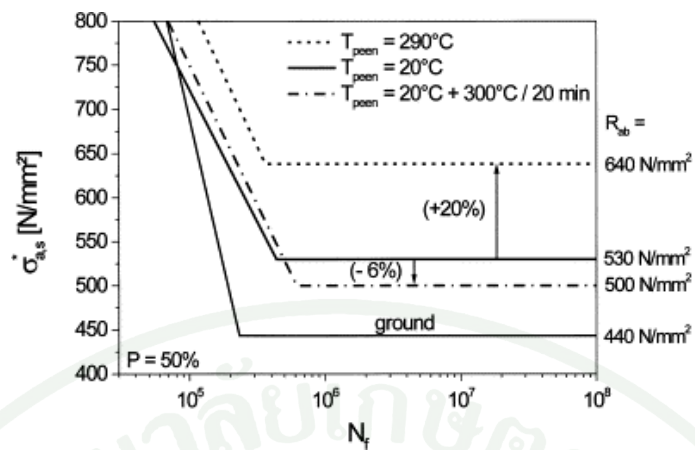
จากงานวิจัยของ Wick, VSchulze, and Vohringer, (2000) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแรงทางกลที่อุณหภูมิสูง โดยกระบวนการที่สนใจคือกระบวนการยิงผิวเหล็กที่อุณหภูมิสูง (Warm peening) บนเหล็กอัลลอย AISI 4140 ที่อุณหภูมิ 290 °C เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ให้ความร้อนหรือที่อุณหภูมิห้อง (20 °C) และให้ความร้อน 300 °C (Annealed) หลังกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็ก (Shot peening) ด้วยเครื่องทดสอบความเค้นตกค้าง (X-ray) ดังที่แสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ค่าความเค้นกดตกค้างที่ลึกเข้ามาในผิวเหล็กอัลลอย AISI 4140 ที่ผ่านกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กที่เงื่อนไขต่างๆ

ที่มา: Wick, VSchulze, and Vohringer, (2000)

โดยค่าความเค้นกดตกค้างที่วัดได้จากกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กที่อุณหภูมิ 290 °C มีค่าสูงสุด ประมาณ -610 N /mm² และหลังจากทดสอบความล้าจะพบว่า การยิงด้วยลูกเหล็กที่อุณหภูมิ 290 °C ได้ค่าอายุการใช้งานสูงสุดเพิ่มขึ้น 20% จากการยิงผิวเหล็กที่อุณหภูมิต่ำ ดังที่แสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงอายุการใช้งานจากความล้าที่ผ่านกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กที่เงื่อนไขต่างกัน

ที่มา: Wick, VSchulze, and Vohringer, (2000)

และเมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบจำนวนรอบของความเสียหายพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการยิงด้วยลูกเหล็กที่อุณหภูมิ 290 °C มีจำนวนรอบของความเสียหายที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานปกติเนื่องมาจากกลไกของหลักการ การบ่มเครียด ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการยิงที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 20 นาที จะพบว่าชิ้นงานมีจำนวนรอบของความเสียหายที่ลดลงเนื่องมาจากในขณะอบเกิดการการคลายตัวของความเค้นตกค้างในชิ้นงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ซึ่งผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardend & Tempered) มีส่วนผสมทางเคมีดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

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

1.2 เครื่องกลึง (Lathe Machine)

1.3 เครื่องรีดลึก (Deep rolling) รุ่น EG5-1-SL

1.4 เครื่องให้ความร้อนขึ้นงานแบบเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating Machine)

1.5 เครื่องมือสำหรับวัดค่าความร้อน (Thermo couple)

2. เครื่องมือวิเคราะห์

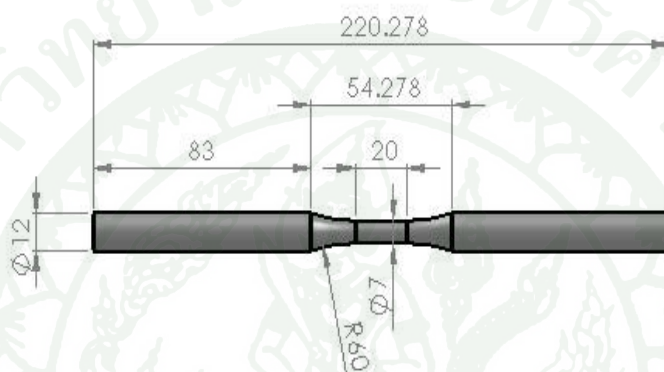
2.1 เครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซเรย์ (X-ray Diffraction,)

2.2 เครื่องทดสอบความล้าแบบดัดหมุน (Rotary Bending Fatigue Testing Machine, Model PQ-6)

วิธีการ

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

เตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3 เป็นแท่งทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปตัดแต่งขึ้นรูป ให้ได้รูปทรงตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM E466-96 มีลักษณะดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบและลักษณะชิ้นงานตามมาตรฐานในการทดสอบความล้า

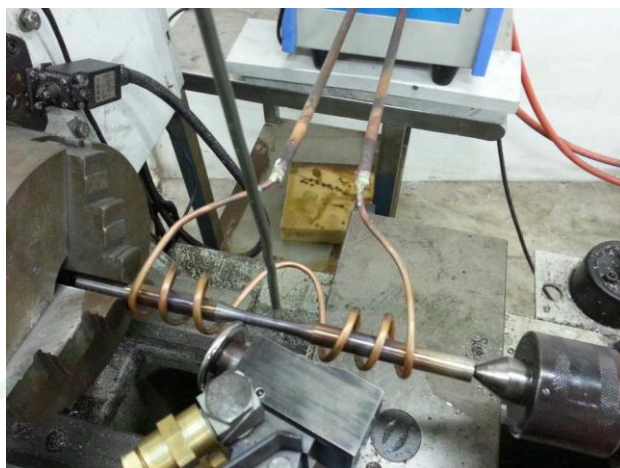
ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานส่วนที่สำคัญคือขนาดและความยาวของชิ้นงานทดสอบ ต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และยาว 220 มิลลิเมตร จึงจะนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดได้ ส่วนระยะความยาวที่ใช้ในการทดสอบนั้น จะต้องเตรียมให้มีระยะ 20 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร

2. ขั้นตอนการรีดลิก

ติดตั้งอุปกรณ์รีดลิกและยึดจับชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมตามมาตรฐานเข้ากับเครื่องกลึง และทำการรีดลิกที่อุณหภูมิห้องด้วยแรงกดที่ผิว 0.75 kN และใช้รอบการหมุนชิ้นงาน 85 rpm โดยทำการรีดลิกชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องทั้งหมด 6 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปทดสอบค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray Diffraction) และนำไปทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัด (Rotary Bending Fatigue Testing Machine) จนชิ้นงานเกิดความเสียหาย และทำการบันทึกค่าจำนวนรอบของความเสียหาย

3. ขั้นตอนการรีดลิกที่อุณหภูมิสูง

ติดตั้งอุปกรณ์รีดลิก, อุปกรณ์วัดค่าความร้อน และเครื่องให้ความร้อนกับชิ้นงานเข้ากับเครื่องกลึงโดยให้ระดับขดลวดให้ความร้อนอยู่ในระดับเดียวกันกับตัวยึดจับชิ้นงานของเครื่องกลึง และยึดจับชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมตามมาตรฐานเข้ากับเครื่องกลึง โดยให้ชิ้นงานอยู่ภายในขดลวดให้ความร้อน ดังภาพที่ 15 จากนั้นเปิดเครื่องให้ความร้อนและควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยอ่านค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัดความร้อน โดยอุณหภูมิที่ทำการรีดลิกเริ่มจาก 150, 200, 250, 300, 350, และ 400 °C อย่างละ 2 ชิ้น ตามลำดับ ซึ่งแรงและความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานจะเป็นไปเสถียรเช่นเดียวกับการรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง และนำชิ้นงานไปทดสอบค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิว และทดสอบความล้า เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลิกที่อุณหภูมิสูง และเมื่อได้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว นำชิ้นงานมารีดลิกที่อุณหภูมิสูงด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมจำนวน 5 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความล้าและบันทึกค่าจำนวนรอบความเสียหายที่เกิดขึ้น

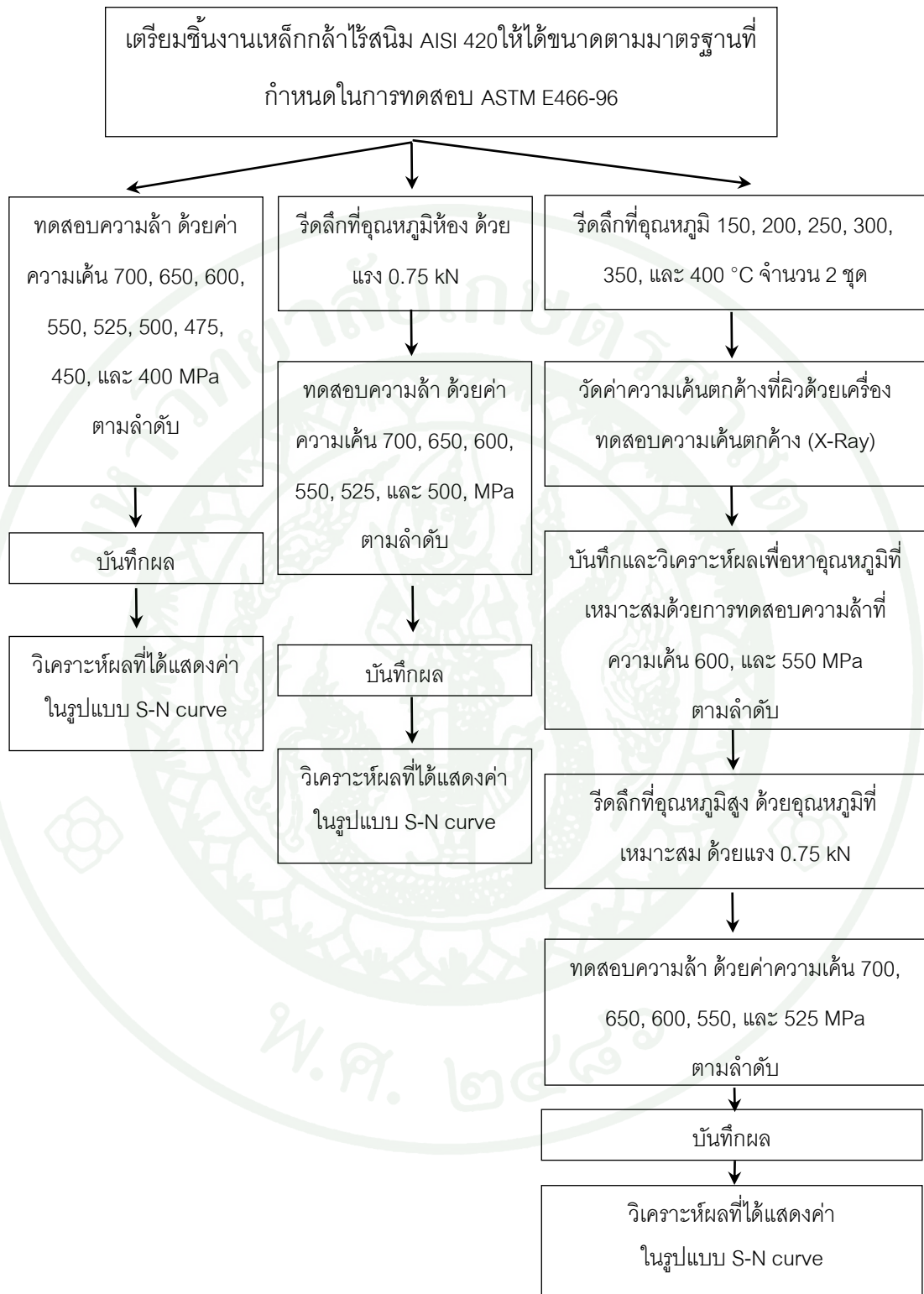


ภาพที่ 15 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในการรีดลึงที่อุณหภูมิสูง

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์

4.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึงที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง มาตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างและค่าความแข็งจากการแปรรูป ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบอิเล็กทรอนิกส์

4.2 นำชิ้นงานมาทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัด โดยใช้ค่าความเค้นแอมปริจูดในช่วง 400-700 MPa



ภาพที่ 16 แผนภาพงานวิจัยการรีดล็กที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

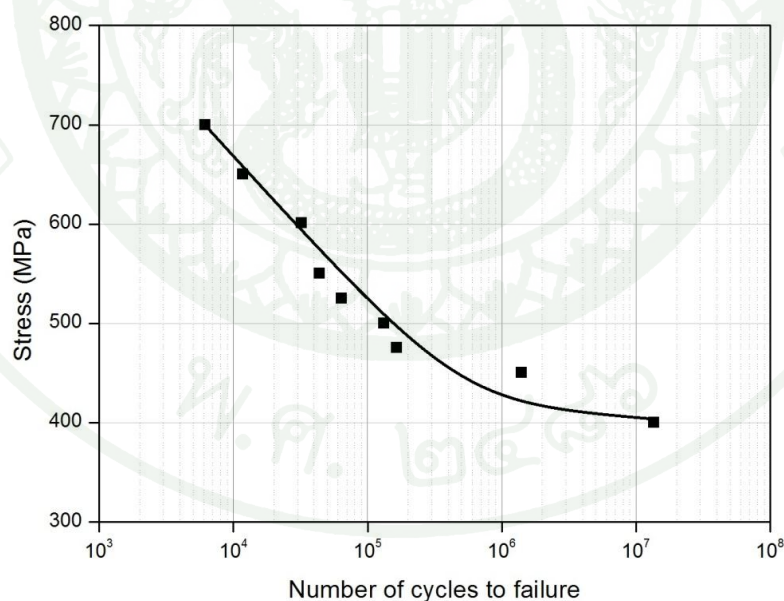
ผลและวิจารณ์

ผล

1. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

1.1 ความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

จากการทดสอบความล้าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดล็กด้วยค่าความเค้นต่างๆ โดยเริ่มจากค่าความเค้นแอมปริจูด 700, 650, 600, 550, 525, 500, 475, 450, และ 400 MPa โดยเมื่อทดสอบจนชิ้นงานเกิดความเสียหาย จะได้ค่าจำนวนรอบของความเสียหาย และเมื่อนำมาแสดงผลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแอมปริจูดและจำนวนรอบความเสียหาย (S-N curve) ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ดังภาพที่ 17 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีขีดจำกัดความล้าประมาณ 400 MPa

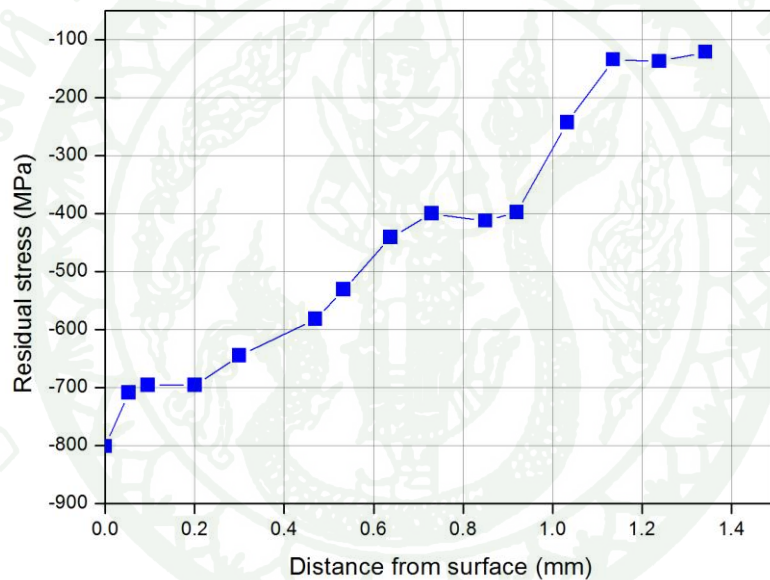


ภาพที่ 17 S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดล็ก

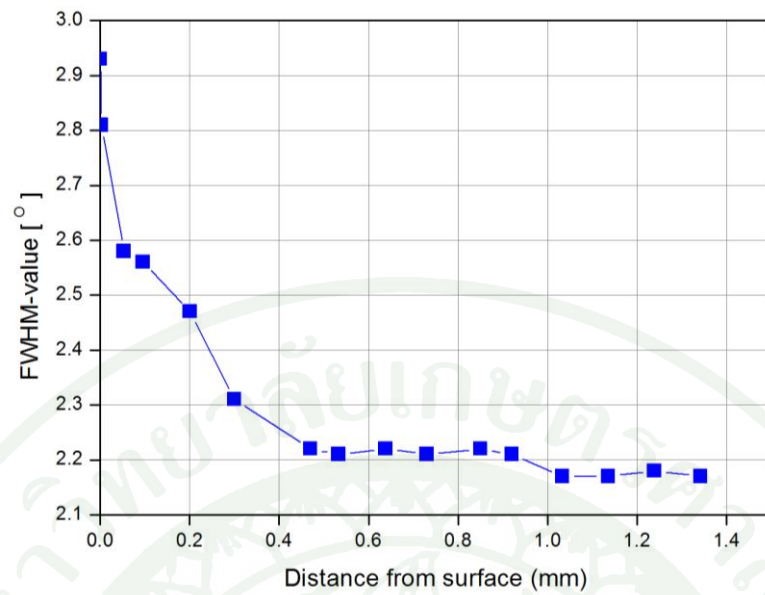
2. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง

2.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง

จากการทดสอบวัดค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิวและลึกเข้ามาในชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้องพบว่า ค่าความเค้นตกค้าง และค่า FWHM มีแนวโน้มที่ลดลง ดังที่แสดงในภาพที่ 18 และภาพที่ 19



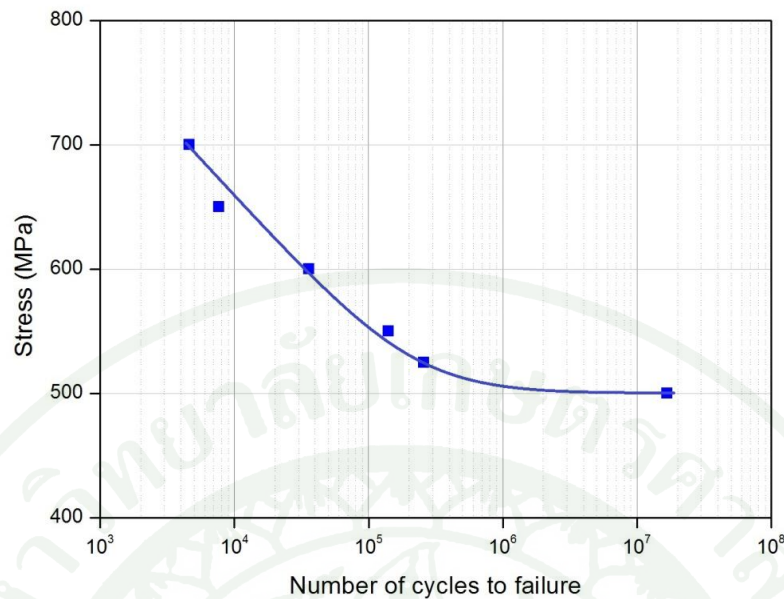
ภาพที่ 18 ความลึกของค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 19 ความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง

2.2 ความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง

หลังจากนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง ด้วยแรงกด 0.75 kN ด้วยความเร็วรอบ 85 rpm แล้วนำมาทดสอบความล้าด้วยค่าความเค้นที่ใช้ทดสอบ 700, 650, 600, 550, 525 และ 500 MPa โดยจะทำการทดสอบจนชิ้นงานเกิดความเสียหาย แต่จะพบว่าที่ 500 MPa ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย จึงหยุดการทดสอบแล้วทำการบันทึกค่าจำนวนรอบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 20

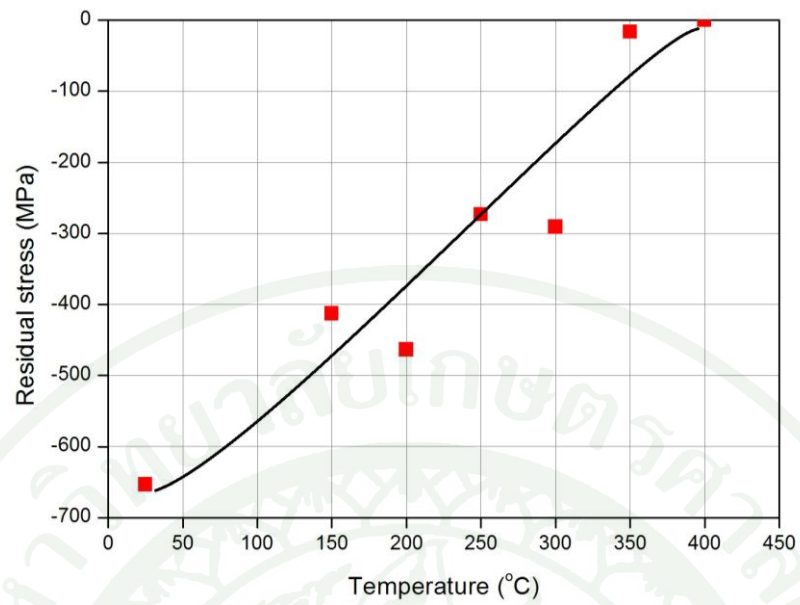


ภาพที่ 20 S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง

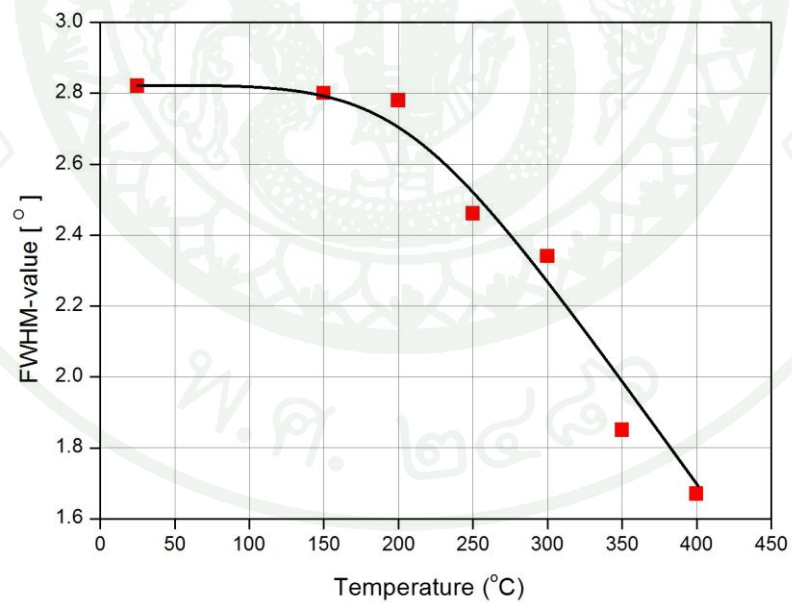
3. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลึกเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

3.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดสอบวัดค่าความเค้นตกค้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูป (FWHM) ที่บริเวณผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการรีดลึกสูงขึ้น ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิว มีแนวโน้มที่จะลดลงดังที่แสดงในภาพที่ 21 และภาพที่ 22 ค่าความเค้นที่วัดได้มีค่าติดลบ แสดงถึงความเป็นค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิว



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เมื่อทำการรีดลึงที่อุณหภูมิต่างๆ

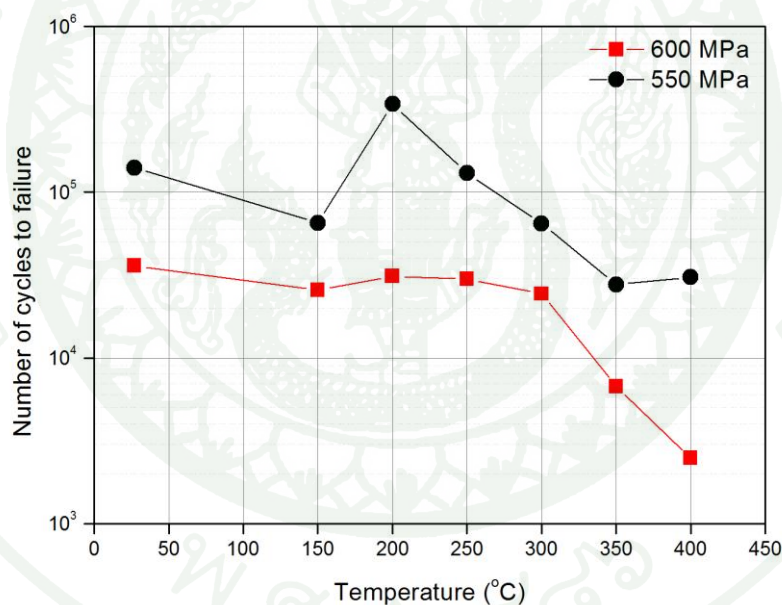


ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เมื่อทำการรีดลึงที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการวัดค่าความเค้นกดตกค้างที่บริเวณผิวพบว่า การรีดลิกที่อุณหภูมิห้องให้ค่าความเค้นกดตกค้างสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการรีดลิกเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 400 °C ค่าความเค้นกดตกค้างที่ผิวจะหายไปจนหมด

3.2 ความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ

หลังจากรีดลิกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ด้วยอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 °C อย่างละ 2 ชิ้น นำชิ้นงานชุดแรกมาทดสอบความล้าด้วยความเค้น 600 MPa และชุดที่ 2 ทดสอบด้วยความเค้น 550 MPa เพื่อหาจำนวนรอบความเสียหายที่ดีที่สุด โดยได้ค่าจำนวนรอบความเสียหายที่แสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ

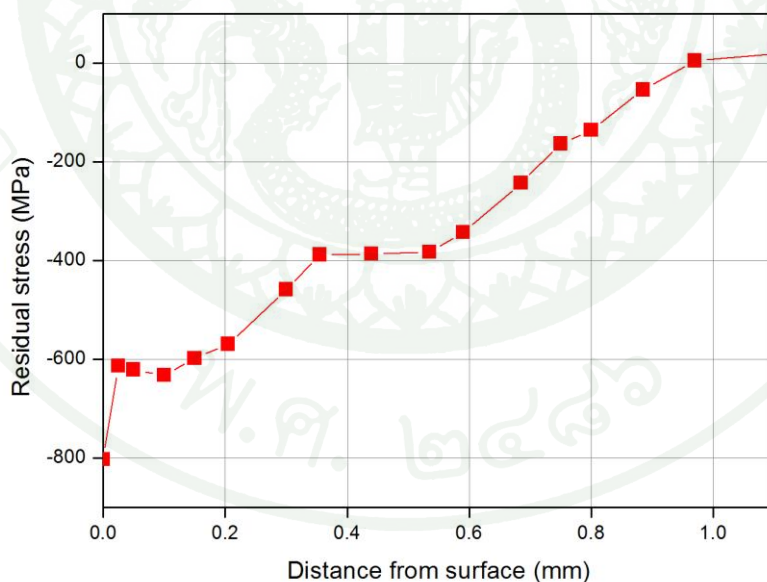
จากการทดสอบความล้าของชิ้นงานด้วยค่าความเค้น 600 MPa พบว่าค่าที่สูงที่สุดคือชิ้นงานรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง 35,896 รอบ ส่วนชิ้นงานรีดลิกที่อุณหภูมิสูงขึ้นจำนวนรอบความเสียหายในช่วงอุณหภูมิต่ำ 150 - 300 °C มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 30,000 รอบ แต่ที่อุณหภูมิสูง 350 - 400 °C จำนวนรอบความเสียหายมีค่าต่ำมาก ส่วนจำนวนรอบความเสียหายของ

ชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยค่าความเค้น 550 MPa พบว่า ชิ้นงานที่รีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าจำนวนรอบของความเสียหายสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 340,662 รอบ จึงคาดว่า ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

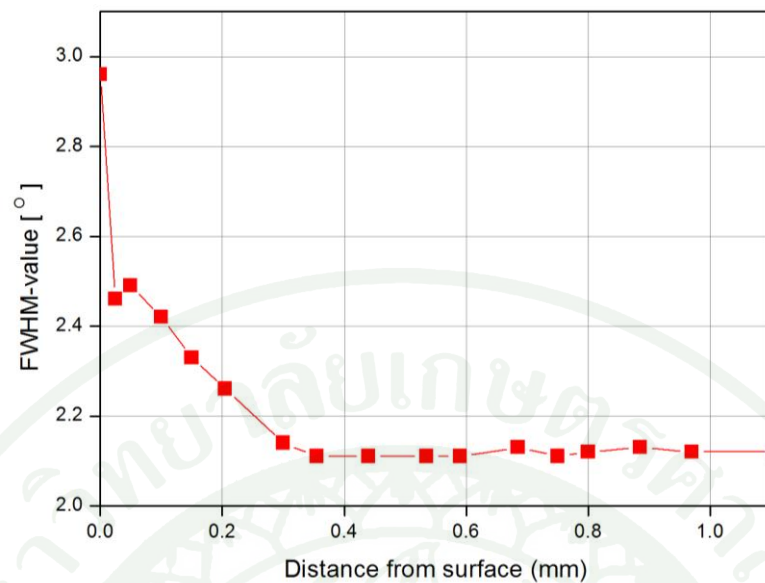
4. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง (200 °C)

4.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C

จากการทดสอบวัดค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิวและลึกเข้ามาในชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้างแบบเอ็กซ์เรย์ ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C พบว่า ค่าความเค้นตกค้าง และค่า FWHM มีแนวโน้มที่ลดลง ดังที่แสดงในภาพที่ 24 และภาพที่ 25



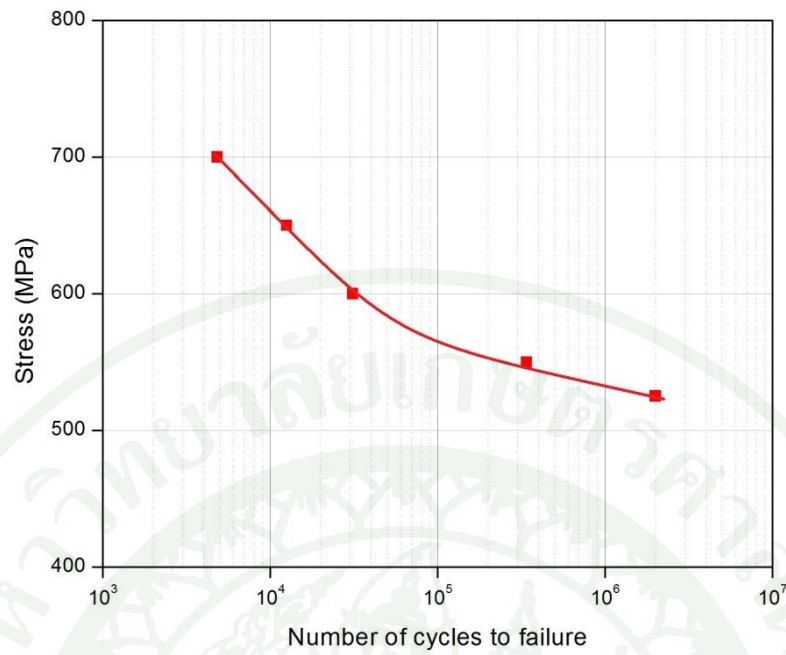
ภาพที่ 24 ความลึกของค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C



ภาพที่ 25 ความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่ อุณหภูมิ 200 °C

4.2 ความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่ อุณหภูมิ 200 °C

เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงด้วย อุณหภูมิที่เหมาะสม (200 °C) มาเข้าสู่กระบวนการทดสอบความล้า โดยใช้ค่าความเค้น 700, 650, 600, 550 และ 525 MPa โดยทดสอบชิ้นงานจนเกิดความเสียหาย และบันทึกค่าจำนวนรอบ ความเสียหาย และแสดงผลในรูปแบบ S-N curve แสดงในภาพที่ 26

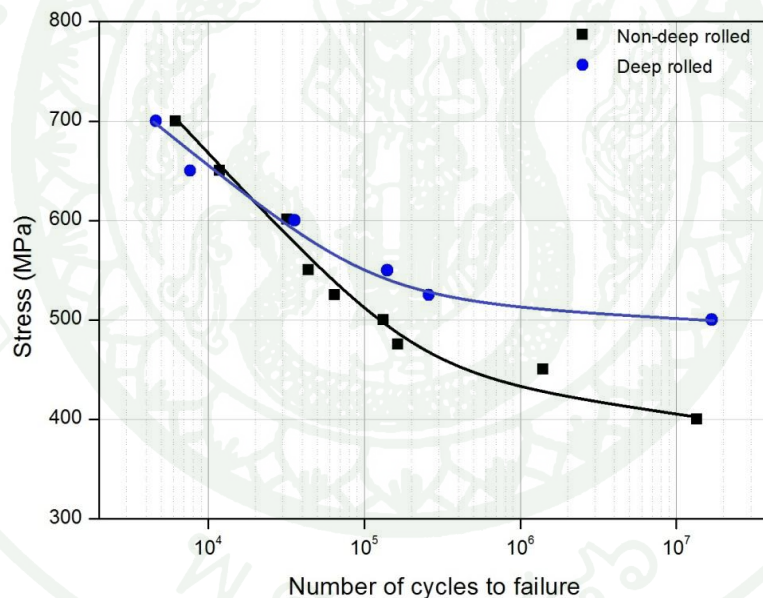


ภาพที่ 26 S-N curve ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง (200 °C)

วิจารณ์

1. อิทธิพลของการรีดลึกลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิห้อง

จากการทดสอบความล้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกลงที่อุณหภูมิห้องพบว่า ชิ้นงานมีขีดจำกัดความล้าที่เพิ่มขึ้น โดยขีดจำกัดความล้าของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกลงที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ 500 MPa แต่ขีดจำกัดความล้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึกลงจะอยู่ที่ประมาณ 400 MPa หากทำการเปรียบเทียบ S-N curve ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการรีดลึกลงกับชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกลงที่อุณหภูมิห้อง จะพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกลงมีขีดจำกัดความล้าที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการรีดลึกลง ดังที่แสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 S-N curve เปรียบเทียบขีดจำกัดความล้าระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึกลงและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกลงที่อุณหภูมิห้อง

จากกราฟ พบว่าการรีดลึกลงส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีขีดจำกัดความล้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เพราะที่บริเวณผิวจะมีการบีบอัดกันของเกรน ทำให้ที่บริเวณผิวมีความเค้นกดตักสูงขึ้น และเกิดกลไกความแข็งแรงโดยการแปรรูป ทำให้สามารถต้านทานการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้มากขึ้น

2. อิทธิพลของอุณหภูมิในการรีดลิกที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างและอายุการใช้งานจากความล้า

2.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดลองนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการรีดลิกสูงขึ้น ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่บริเวณผิว มีแนวโน้มที่จะลดลง ดังผลที่ได้แสดงในภาพที่ 21 และ 22 โดยที่อุณหภูมิ 400 °C ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM หายไปจนหมด เนื่องมาจากอุณหภูมิส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชันให้เป็นระเบียบมากขึ้น ปริมาณของดิสโลเคชันลดลงเป็นผลทำให้กลไกความแข็งแรงโดยการแปรรูปลดลง เป็นผลมาจากการคืนสภาพโครงสร้าง (Recovery) แต่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200 °C พบว่า ค่า FWHM ยังมีค่าคงอยู่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่รีดลิกที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ 2.8° ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเกิดกลไกการบ่มเครียดในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 (Dieter, 1961)

2.2 ค่าความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ

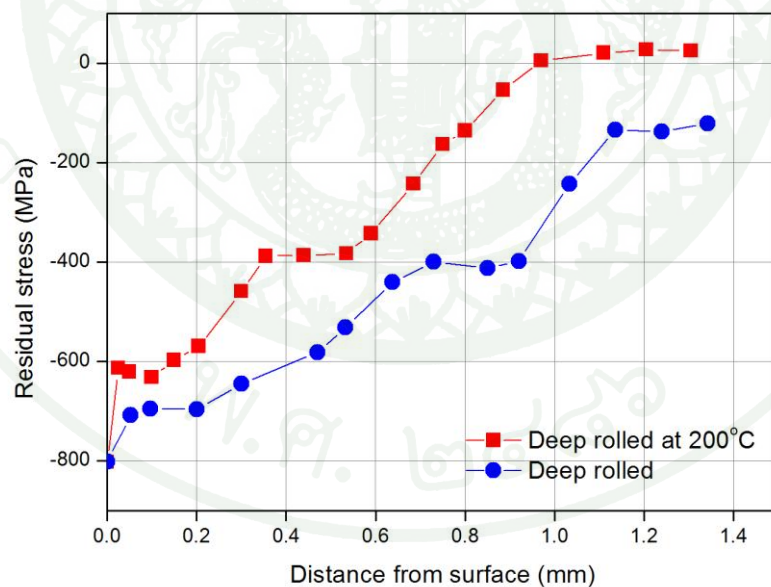
จากการทดสอบความล้าของชิ้นงานด้วยค่าความเค้นแอมป์ริจูด 600 และ 550 MPa ได้ผลที่แสดงในภาพที่ 23 ซึ่งแสดงให้เห็นจำนวนรอบความเสียหายสูงสุด คือที่อุณหภูมิ 200 °C แต่ที่อุณหภูมิสูง 350 – 400 °C จำนวนรอบความเสียหายมีค่าต่ำมากเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เกิดการคืนสภาพโครงสร้าง ความสามารถในการต้านทานความล้าจึงลดลง ส่วนจำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยค่าความเค้น 550 MPa พบว่า ชิ้นงานที่รีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าจำนวนรอบของความเสียหายสูงสุดอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 340,662 รอบ จึงคาดว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้อะตอมในสารละลายของแข็งในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มาล้อมรอบดิสโลเคชันได้ดี ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยาก ทำให้ค่าความเค้นตกค้างที่อยู่ผิวชิ้นงานจึงยังคงอยู่หรือลดลงช้าทำให้ชิ้นงานสามารถต้านทานการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้ดี ชิ้นงานจึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (Juijerm and Altenberger, 2007)

หากพิจารณาจากค่าความเค้นแอมปริจูดในการทดสอบที่ 600 และ 550 MPa จะพบว่าที่ความเค้นแอมปริจูด 600 MPa จะไม่เห็นความแตกต่างของจำนวนรอบความเสียหาย เนื่องจากความเค้นดังกล่าวอยู่ในช่วงความล้ารอบต่ำ (Low Cycle Fatigue) ซึ่งกระบวนการรีดลิกจะเห็นผลไม่ชัดเจน แต่ที่ความเค้นแอมปริจูด 550 MPa จะอยู่ในช่วง ความล้ารอบสูง (High Cycle Fatigue) จึงทำให้เห็นผลได้ชัดเจนกว่า (Juijerm and Altenberger, 2007)

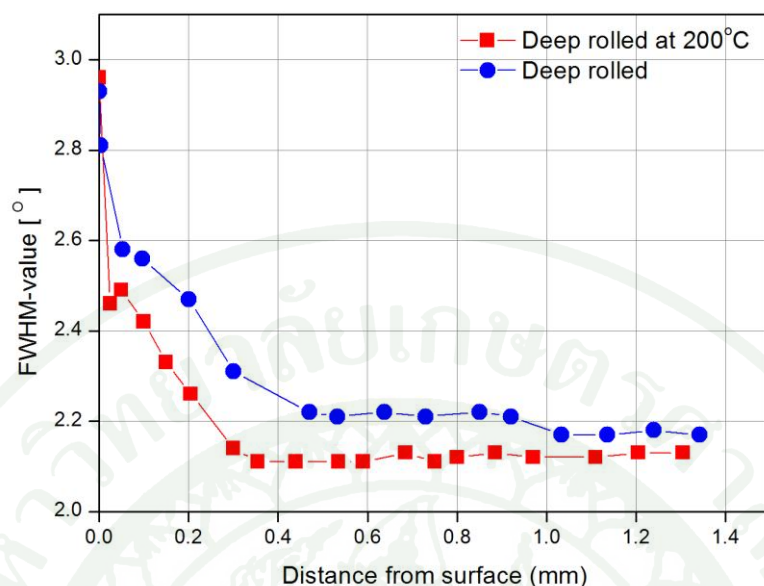
3. อิทธิพลของการรีดลิกบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิสูง (200 °C)

3.1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C

จากการทดลองวัดค่าความเค้นตกค้างที่ผิวและลึกเข้ามาในเนื้อวัสดุ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานรีดลิกที่อุณหภูมิห้อง และชิ้นงานที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิสูง (200 °C) ได้ผลดังภาพที่ 28 และ 29



ภาพที่ 28 เปรียบเทียบความลึกของค่าความเค้นตกค้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีดลิกที่อุณหภูมิห้องและรีดลิกที่อุณหภูมิ 200 °C



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบความลึกของค่า FWHM ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้องและรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C

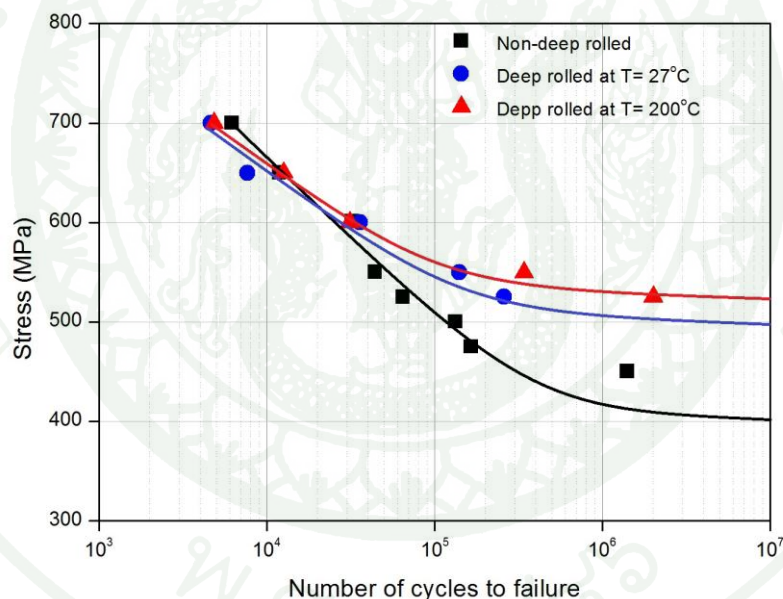
จากกราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความเค้นตกค้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูปที่ลึกเข้ามาในเนื้อวัสดุ โดยการรีดลึกที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าความเค้นตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปสูงกว่า การรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C และมีความลึกของค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM อยู่ที่ประมาณ 0.6 มิลลิเมตร แต่การรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C ถึงแม้จะมีค่าความเค้นตกค้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูปลดลงแต่ก็ไม่ถึงกับหายไปจนหมด แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปรากฏการณ์ การปมเครียด ซึ่งทำให้ค่าความเค้นตกค้างและค่าความแข็งโดยการแปรรูป ยังคงอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการยืดอายุการใช้งานของวัสดุ ดังที่แสดงในภาพที่ 21 และ 22

3.2 ความต้านทานความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C

จากการทดสอบความล้าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิที่เหมาะสม (อ้างอิงจากการทดลองการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง) พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C มีความสามารถในการต้านทานความ

เสียหายอันเนื่องมาจากความล้าได้สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการรีดลึกและชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง โดยชิ้นงานที่ผ่านการรีดลึกที่อุณหภูมิสูง มีขีดจำกัดความล้าอยู่ที่ประมาณ 525 MPa หากเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้อง และไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึก พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงมีขีดจำกัดความล้าสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 30

จากขีดจำกัดความล้าที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิสูง อะตอมของคาร์บอน ที่ละลายผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีการเคลื่อนที่มาล้อมรอบดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการรีดลึก ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น การคลายตัวของดิสโลเคชันก็จะเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้ดิสโลเคชันยังคงอยู่ได้นานขึ้น ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีสมบัติต้านทานความล้าได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 30 S-N curve เปรียบเทียบขีดจำกัดความล้าระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดลึก ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิห้องและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200 °C

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษากระบวนการรีดล็กที่อุณหภูมิสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการรีดล็กชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 จะทำให้ความเค้นกดตกค้างและความแข็งโดยการแปรรูปที่บริเวณผิวมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความร้อนส่งผลให้เกิดการคืนสภาพโครงสร้าง
2. ในกระบวนการรีดล็กเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิสูง พบว่า ช่วงอุณหภูมิประมาณ (200 °C) เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดล็ก เป็นผลมาจากอิทธิพลของการบ่มเครียดในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420
3. การรีดล็กที่อุณหภูมิ (200 °C) ส่งผลให้การต้านทานความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 เพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง เหนี่ยวนำความร้อนซึ่งจะเกิดขึ้นในส่วนของขั้นตอนการรีดลึกที่อุณหภูมิสูงโดยจะใช้การควบคุม อุณหภูมิด้วยมือและสายตาของผู้วิจัยและคณะ ทำให้มีอุณหภูมิแกว่งในบางช่วง อาจทำให้มีค่า ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 5 – 10 °C ซึ่งถ้าหากใช้ชุดกล่องควบคุมอุณหภูมิจะ ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการรีดลึกมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่านี้



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

มนัส สติรจินดา. 2542. **เหล็กกล้า**. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มนัส สติรจินดา. 2543. **วิศวกรรมการอบชุบ**. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

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

Juijerm, P.and I. Altenberger. Effect of high-temperature deep rolling on cyclic deformation behavior of solution-heat-treated Al-Mg-Si-Cu alloy. **Scripta Materialia** 56 : 285-288 : (2006)

Juijerm, P.and I. Altenberger. Fatigue Performance Enhancement of steels using Mechanical Surface Treatment. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol.17 : 59-65 : (2007)

Juijerm, P.and I. Altenberger. Fatigue Performance of High-Temperature Deep-Rolled Metallic Materials. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol.17 : 37-41 : (2007)

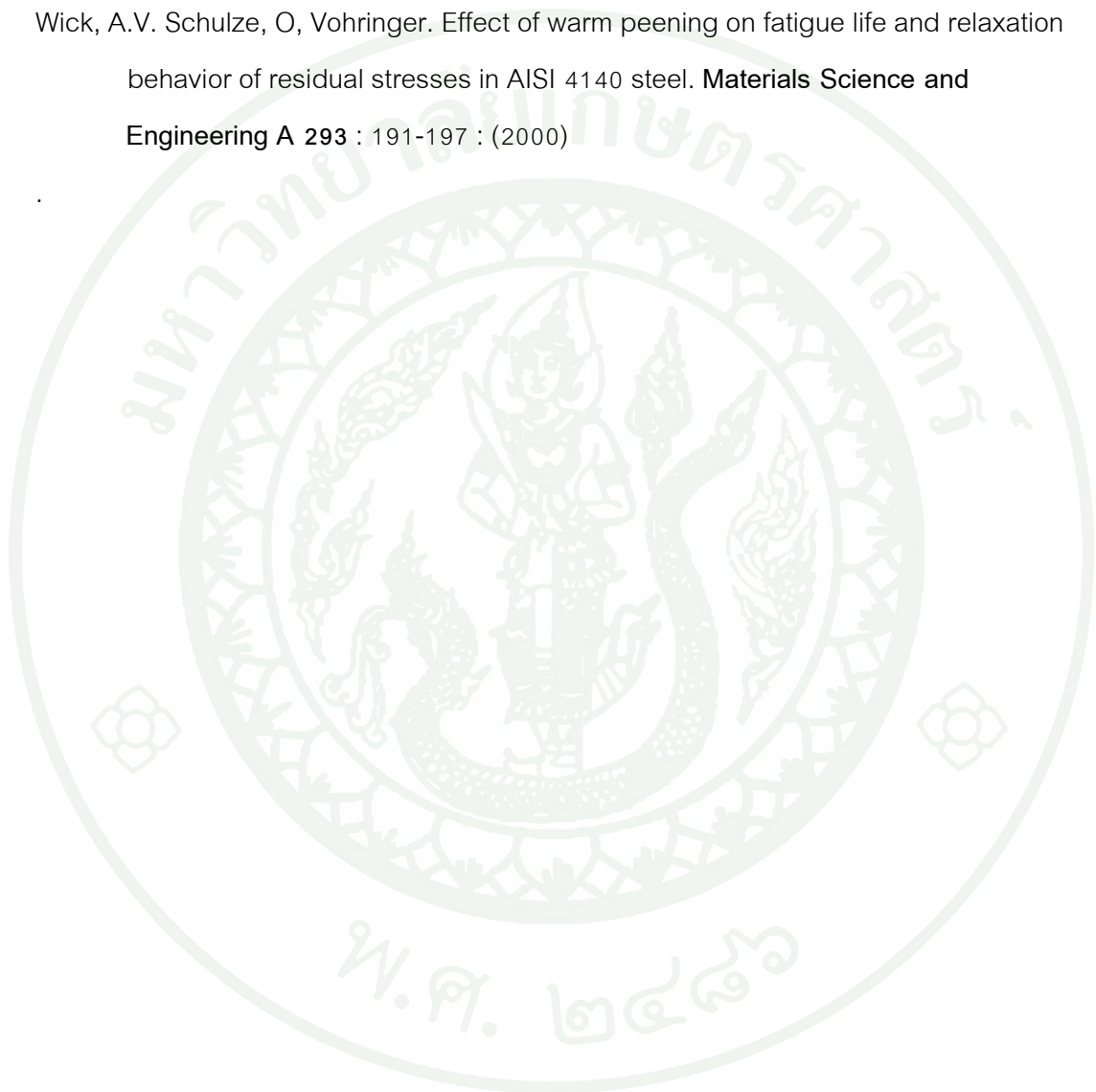
Majzoobi, G.H., K. Azadikhah and J. Nemati. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 . **Materials Science and Engineering A** 516 : 235-247 : (2009)

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.

Wick, A.V. Schulze, O, Vohringer. Effect of warm peening on fatigue life and relaxation behavior of residual stresses in AISI 4140 steel. **Materials Science and**

Engineering A 293 : 191-197 : (2000)







ตารางผนวกที่ ก1 ค่าความเค้นตกค้างและค่า FWHM ที่ลึกเข้ามาในเนื้อวัสดุของเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึก

ความเค้น (MPa)	FWHM (°)	ระยะที่เข้าไปในเนื้อวัสดุ (mm)
-801.7	2.93	0.000
-647.4	2.81	0.003
-702.0	2.6	0.006
-676.8	2.56	0.012
-672.6	2.57	0.015
-678.3	2.61	0.030
-708.8	2.58	0.053
-695.8	2.56	0.096
-696.0	2.47	0.201
-644.9	2.31	0.300
-581.8	2.22	0.470
-531.0	2.21	0.533
-440.8	2.22	0.638
-399.6	2.21	0.730
-412.4	2.22	0.850
-398.0	2.21	0.920
-242.5	2.17	1.033
-133.7	2.17	1.136
-137.4	2.18	1.239
-120.8	2.17	1.342

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าความเค้นตกค้างที่ลึกเข้ามาในเนื้อวัสดุของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการรีดลึกที่อุณหภูมิ 200° C

ความเค้น (MPa)	FWHM (°)	ระยะที่เข้าไปในเนื้อวัสดุ (mm)
-802.8	2.96	0.000
-613.7	2.46	0.025
-621.2	2.49	0.050
-623.2	2.42	0.100
-597.8	2.33	0.150
-569.5	2.26	0.205
-402.9	2.3	0.255
-458.9	2.14	0.300
-387.9	2.11	0.355
-386.4	2.11	0.440
-382.9	2.11	0.535
-342.6	2.11	0.590
-242.6	2.13	0.685
-162.9	2.11	0.750
-135.8	2.12	0.80
-53.5	2.13	0.885
5.1	2.12	0.970
20.8	2.12	1.11
27.3	2.13	1.205
25.	2.13	1.305

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

ความเค้น (MPa)	FWHM (°)	อุณหภูมิ (°C)
-412.9	2.80	150
-463.8	2.83	200
-273.7	2.46	250
-291.0	2.34	300
-16.4	1.85	350
-0.2	1.67	400



ตารางผนวกที่ ข1 จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ด้วยความ
เค้นแอมปริจูดต่างๆ

จำนวนรอบความเสียหาย	ความเค้นแอมปริจูด (MPa)
6196	700
11862	650
32182	601
44028	550
64519	525
132908	500
164948	475
1406011	450
13585657	400

ตารางผนวกที่ ข2 จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีด
ลึกที่อุณหภูมิห้องด้วยความเค้นแอมปริจูดต่างๆ

จำนวนรอบความเสียหาย	ความเค้นแอมปริจูด (MPa)
4631	700
7665	650
35896	601
140505	550
258632	525
16856980	500

ตารางผนวกที่ ข3 จำนวนรอบความเสียหายของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านการรีด
ลึกที่อุณหภูมิ 200° C ด้วยความเค้นแอมปริจูดต่างๆ

จำนวนรอบความเสียหาย	ความเค้นแอมปริจูด (MPa)
4839	700
12554	650
31144	601
340662	550
2007556	525

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	ว่าที่ รต. พงศ์เทพ จันทร์สวัสดิ์
เกิดวันที่	23 มีนาคม 2531
สถานที่เกิด	เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประวัติการทำงาน	ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนวิจัยจากกลุ่มวิจัย MT-B-53-MET-11-237-G ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)