



ความต้านทานการล้าแบบหมุนดัดของอลูมิเนียมผสม(AC8A-F)
Rotating Bending Fatigue Strength of Aluminium Alloy AC8A-F



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 037004

ความต้านทานการล้าแบบหมุนดัดของอลูมิเนียมผสม(AC8A-F)
Rotating Bending Fatigue Strength of Aluminium Alloy AC8A-F



ปริญญาานิพนธ์นี้สำหรับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ความต้านทานความล้าแบบหมุนตัดของอลูมิเนียมผสม AC8A-F

ผู้จัดทำ

1. นายเชาวน์เนตร บุญไชย
2. นายบัณฑิต พงษ์ศิริชัย
3. นางสาวชัชวราภรณ์ โคตรโสภาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานการล้าแบบหมุนดัด
โลหะออสเทนนิซึม (AC8A-F)

นายเชาวน์เนตร บุญไชย รหัส 35104128

นายบัณฑิต พงษ์ศิริณ รหัส 35104231

นางสาวชिरาภรณ์ โคตรโสภา รหัส 35104358

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช

บทคัดย่อ

การทดสอบ fatigue เป็นการทดสอบ ชนิดไดนามิก (dynamic type) เพื่อแสดงพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อได้รับแรงกระทำ เป็นรอบซ้ำๆกัน

การทดสอบจะสร้างสภาพความเค้นที่เกิดขึ้น ในชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากแรงแปรกลับไปกลับมา, ขนาดความเค้น, ชนิดของความเค้น(ความเค้นดึง, ความเค้นกด, ความเค้นดัด หรือความเค้นบิด) จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ตามชนิดของเครื่องทดสอบ และแบบของ specimen

Specimen จะถูกกระทำด้วยความเค้น 2 ค่าสลับกัน ค่าความเค้นที่มากที่สุดโดยปกติจะต่ำกว่าค่า yield strength ของวัสดุ ความเค้นแปรจะทำให้ทดสอบจนกระทั่ง specimen แตกหัก (failure) หรือ จนกระทั่งถึงจำนวนรอบที่จำกัดไว้

ผลการทดสอบทั้งหมด จะเขียนลงบน semilogarithmic scale มีค่าความเค้น S เป็นแกน y และ จำนวนรอบ N ที่วัสดุขาดหรือแตกหักเป็นแกน x

Endurance limit ของวัสดุใดๆ คือ ค่าความเค้นจำกัดสูงสุด ซึ่งถ้ามีค่าต่ำกว่าช่วงนี้แล้ว วัสดุจะสามารถทนความเค้นเป็นรอบได้ เป็นจำนวนรอบตามกำหนด โดยปราศจากการแตกหัก ที่จุดนี้ในกราฟ S-N curve กราฟจะขนานกับแกน x

อย่างไรก็ตาม โลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก (non ferrous alloy) บางชนิด เส้นกราฟ จะไม่เป็นเส้นตรง และ endurance limit จะกำหนดโดยการใช้ค่า stress ที่สามารถรับได้ เมื่อใช้แรงกระทำตามจำนวนครั้งที่กำหนด

การทดสอบ fatigue นี้ ถูกใช้อย่างกว้างขวาง ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ ไม่เพียงแต่ลักษณะ หรือ ช่วงระยะของแรงแปร แต่ยังศึกษาถึงผลกระทบของการสุกร่อน, ลักษณะของผิวหน้า, อุณหภูมิ, ขนาด และ stress concentration

Rotating Bending Fatigue Strength of

Aluminium Alloy AC8A -F

By. Mr. Chaowanetr Bunchai

Mr. Bandit Phonghirun

Ms. Wachiraphorn Kotsopha

Supervisor : Mr. Pomsak Attavanich

Abstract

The Fatigue Test is dynamic type testing to show behavior of materials during cyclical stress.

In the testing, fatigue stress to occur in structural of machine , magnitude or type for stress (tensile stress, compression stress and bending stress) be changed to followed testing machine and specimen.

Specimen is acted by two stress for alternated. The maximum stress was less than yield strength of materials. Will be tested until a fracture of specimen or cyclical of limit setting.

Result of a fracture is plotted on semilogarithmic scale. given stress: S in y-axis and cycle: N in x-axis.

Endurance limit of material was a maximum limit stress. if lower than cause materials be fatigue resistance to more or higher cycle by unless fracture. On this position S-N curve had parallel with x-axis

However some non ferrous alloys had non linear curve and endurance limit is fixed by maximum stress.

The Fatigue Test is used to study behavior of materials, characteristic and period for delivered variable force. and studying in result of erosion. surface. temperature, magnitude and stress concentration.

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
ความล้า	
- ทฤษฎีความล้า	2
- การคำนวณ	5
- การคำนวณความต้านทานในการล้า	7
- อัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากการล้า	17
- วิธีการเตรียมชิ้นงานและการทดลอง	22
- ผลการทดลอง(ตาราง และ กราฟ)	24
การทดสอบแรงดึง	
- หลักการและวิธีการทดสอบ	51
- ผลการทดสอบ	52
การตรวจสอบโครงสร้าง	
- หลักการและวิธีการทดสอบ	55
- ผลการทดสอบ	59
ผลการตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้เครื่อง Scanning	
- แสดงภาพขยายของชิ้นงาน โดยผ่านเครื่อง scanning	67
- SEM scaling for video graphic printing	79
สรุปผลการทดลอง	80
วิจารณ์ผลการทดลอง	81
ภาคผนวก	
- การตั้งอุณหภูมิ	82
- โปรแกรมในการกลึงชิ้นงานทดสอบความล้า โดยเครื่อง CNC	84
- โปรแกรมในการกลึงชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยเครื่อง CNC	86
กิตติกรรมประกาศ	88
หนังสืออ้างอิง	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

Heat Resisting Aluminium Alloy AC8A มักจะใช้ผลิตลูกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในกันอย่างแพร่หลาย และในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน ปริมาตรของลูกสูบส่วนบนจะขยายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (ขึ้นกับรูปร่าง และ ความหนาของส่วน piston head) เนื่องมาจากความร้อน ที่เกิดขึ้นจากก๊าซที่ลุกไหม้ จะเกิดขึ้นซ้ำๆ กันเป็นรอบ ทำให้เกิด โมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ส่วน piston head โดยเฉพาะที่บริเวณ cavity (groove ring) จะเกิดรอยร้าวและแตกหักได้

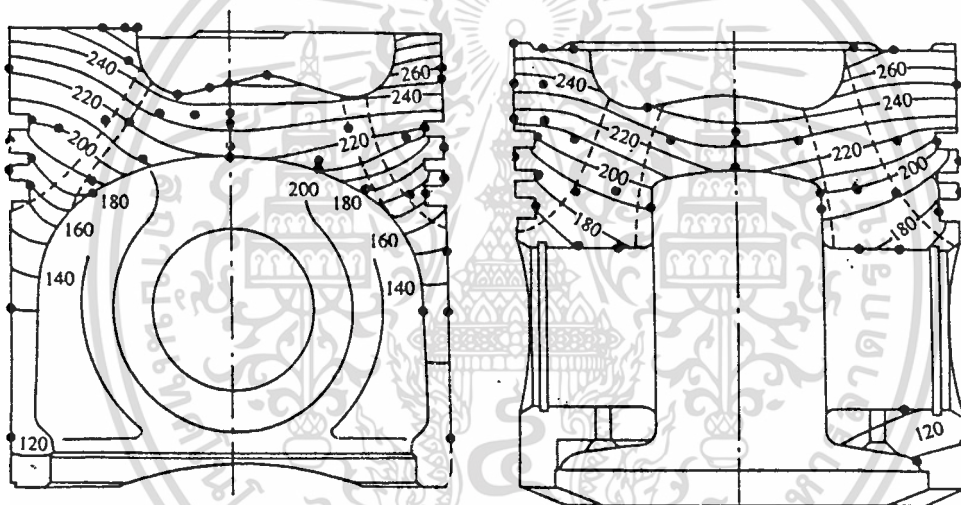
ความสำคัญของการศึกษาเรื่อง fatigue failure ในปัจจุบัน เพิ่มมากขึ้น ตามการพัฒนาของเทคโนโลยี เครื่องจักรกลต่างๆ เช่น ยานพาหนะ เครื่องบิน หรือ ปัมป์ ซึ่งมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของการเกิด failure มักเป็น fatigue failure

ดังนั้น คุณสมบัติทางด้าน ความต้านทานต่อการล้าแบบหมุนดัด เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญ ที่นักออกแบบเครื่องยนต์ต้องพิจารณา รวมทั้งการนำไปประยุกต์สำหรับการใช้งานทั่วไป



โลหะผสม อลูมิเนียม AC8A

ใช้ในการทำลูกสูบเครื่องยนต์ซึ่งจะต้องรับความเค้นเนื่องจากแรงแปรแบบสลับที่อุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา สภาพของลูกสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานโดยปกติแล้วจะมีจังหวะ ดูด อัด ระเบิด คาย ทำให้เกิดความดันสูง และต่ำสลับกันไป และอุณหภูมิขณะเครื่องยนต์ทำงานนั้น มีค่าสูงตลอดเวลา การกระจายของอุณหภูมิโดยทั่วไปแล้ว heat flux จะสูงสุดที่หัวกระบอกสูบ ตำแหน่งที่วาล์วไอเสีย และบริเวณศูนย์กลางของกระบอกสูบ และต่ำสุดที่ผนังของกระบอกสูบ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วลูกสูบเหล็กหล่อจะทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า อลูมิเนียม ประมาณ $40-80^{\circ}\text{C}$ ในกรณีของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ลูกสูบจะร้อนที่สุดบริเวณตรงศูนย์กลาง ส่วนเครื่องยนต์ดีเซล จะร้อนที่สุดบริเวณผิวขอบ และบริเวณ Pre Chamber ดังรูป วิศวกรรมการกระจายของอุณหภูมิของลูกสูบที่ 3,000 รอบ/นาที ระยะชัก 125 mm อัตราส่วนกำลังอัด เท่ากับ 17.



รูปที่ 1 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในกระบอกสูบ

อุณหภูมิสูงสุดตามที่เห็นในรูป ใช้เป็นสถานะในการทดสอบความล้าของ อลูมิเนียมอัลลอยด์ (AC8A) ที่อุณหภูมิสูง

ความล้าของวัสดุ

ปัจจุบันความเสียหายของวัสดุจะเกิดจากความเสียหายเนื่องจากความล้า คือการที่วัสดุถูกกระทำด้วยแรงแปร (cycle or fluctuating load) ซึ่งจะมีผลให้ ชิ้นงานเกิดความเสียหายที่ค่าความเค้นต่ำกว่าการกระทำด้วยแรงคงที่

สาเหตุสำคัญของ fatigue failure ได้แก่

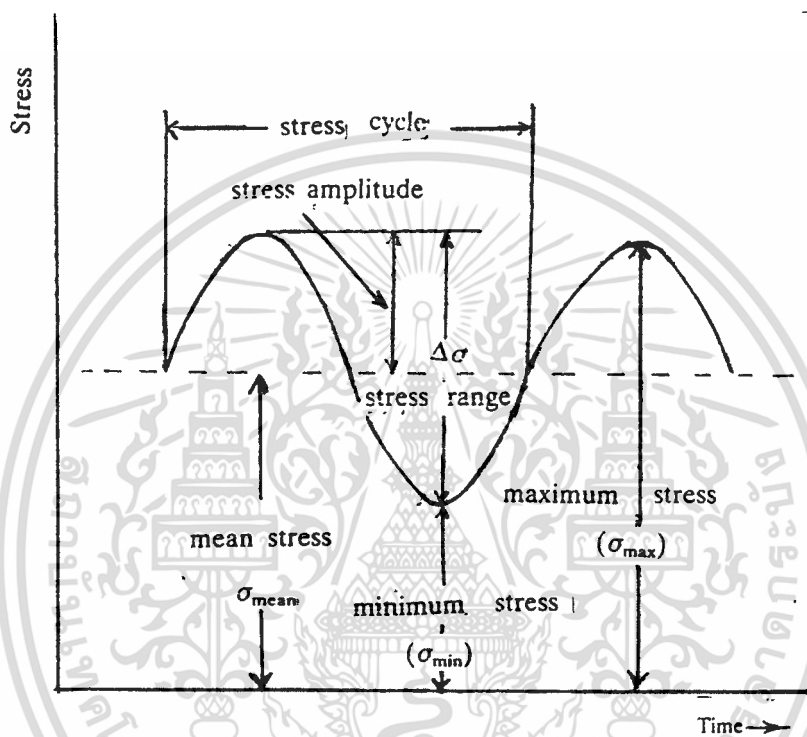
1. ค่า Maximum Tensile Stress ที่สูงพอ

2. แรงแปรที่มีขนาดใหญ่มากที่กระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

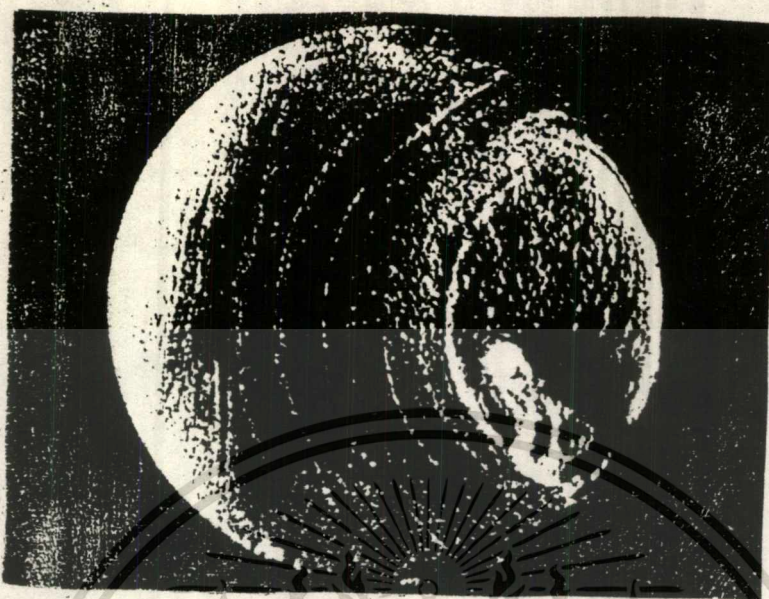
3. จำนวนครั้งหรือรอบมากพอ

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีก เช่น การสึกหรอ , อุณหภูมิ การโอเวอร์โหลด เป็นต้น ในเรื่องความล้านี้ สมมติรูปของความสัมพันธ์ที่กระทำต่อวัสดุเป็นแบบวัฏจักร (stress cycle) กระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะคำนวณได้ เพราะโดยทั่วไปแล้วแรงจะเปลี่ยนในลักษณะที่ไม่ทราบแน่นอน สามารถสมมติแรงแทนโดยการกระทำเป็น cycle ดังรูป



รูปที่ 2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นต่อเวลา

การที่วัสดุถูกกระทำด้วยแรงความเค้นสลับกันไป จะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักได้ แม้ว่าแรงที่มากระทำนั้นต่ำกว่า yield strength ก็ตามหากทำการทดสอบความล้า สามารถนำผลการทดลองมาเขียนลงบน Semilogarithmic scale



รูปที่ 3 โครงสร้างที่เปลี่ยนไปในระหว่างเกิดกระบวนการลำของโลหะ

โครงสร้างที่เปลี่ยนไปในระหว่างเกิดกระบวนการลำของโลหะ

เมื่อชิ้นงานทดสอบของโลหะอยู่ภายใต้ความเค้นเป็นรอบ ๆ พื้นผิวของความเสียหายเนื่องจากการลำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

- 1) การเริ่มต้นเกิดรอยร้าว โดยทั่วไปจะมีสาเหตุมาจากตำหนิหรือจุดบกพร่องในชิ้นงาน เช่น การแทรกตัวของสารเจือปน หรือรูเข็ม (pin holes) ที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเค้นสูง เป็นเหตุให้เกิดการเลื่อนระนาบเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น
- 2) การขยายตัวของรอยร้าว จะเป็นรูปแบบคล้ายหาคทราศ การลำจะเกิดเป็นรอยเล็ก ๆ ในขณะที่การร้าวขยายตัวไปข้างหน้าตามพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ แนวเล็ก ๆ ของการลำนี้ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากการลำในการหาจุดเริ่มต้นและทิศทางการกระจายรอยแตกร้าวเนื่องจากการลำ
- 3) การแตกหักอย่างฉับพลัน เมื่อรอยร้าวปกคลุมพื้นที่เพียงพอ โดยที่พื้นที่หน้าตัดที่เหลือของโลหะไม่สามารถต้านทานแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้ ชิ้นงานก็จะขาดจากกันอย่างฉับพลัน

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างของโลหะ

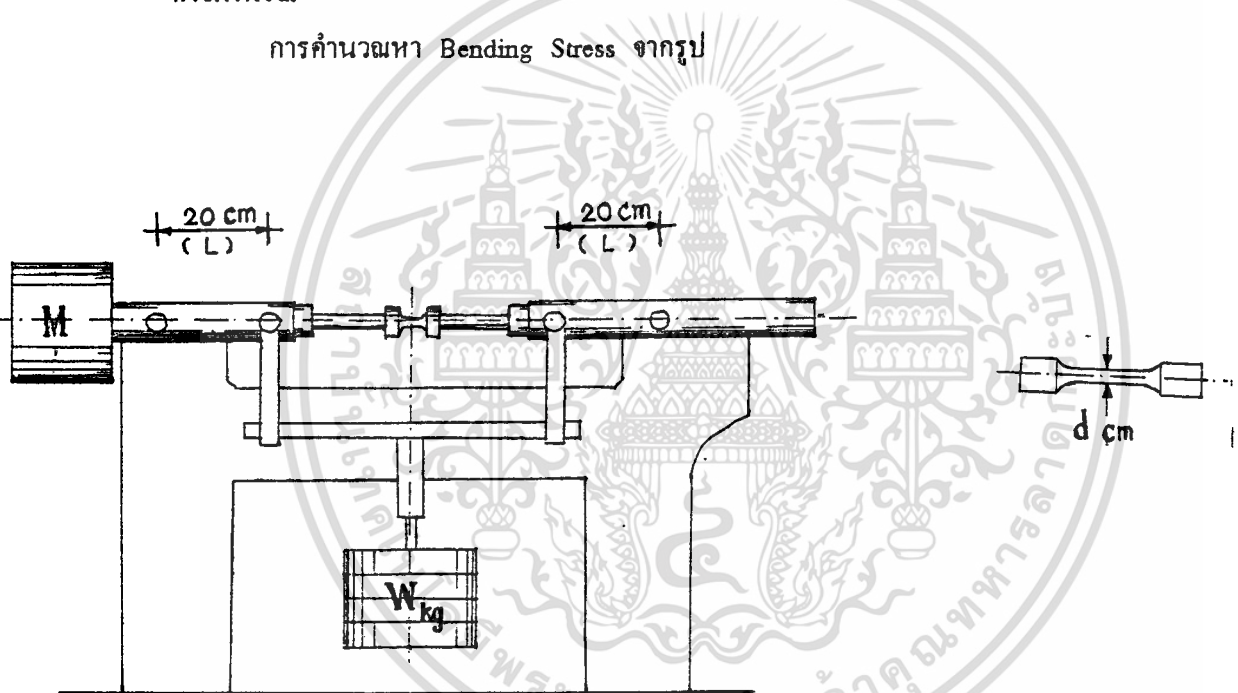
เมื่อชิ้นงานทดลองอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้โครงสร้างของชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงน้อยลง สาเหตุเนื่องจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ

1) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมลดลง เนื่องจากเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นงาน อะตอมและอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างจะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสั่นไหวภายในโครงสร้างมากขึ้น มีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมลดลง

2) การเลื่อน (slide) ระหว่างผลึกในโครงสร้าง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก (ขอบเกรน) จะมีค่าลดลง ทำให้เกิดการเลื่อนระหว่างผลึกง่ายขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายขึ้น

การคำนวณ

การคำนวณหา Bending Stress จากรูป



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบความล้า

กำหนด Distance between Load Supporting Point	: L cm (20 cm)
Weight	: W kg
Diamiter of Specimen	: d cm (0.8 cm)
Uniform bending stress	: M kgf/cm
Bending Stress given to specimen	: S kgf/cm ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$M = WL/2 = 10W$$

$$S = 32 M/\pi d^3$$

$$= 320 W/\pi d^3$$

$$= 101.81 W/d^3 \text{ kgf/cm}^2$$

$$= 992.18 W/d^3 \text{ Mpa}$$

สมมติให้

$$S = A \cdot N^B \quad (1)$$

S = bending stress (Mpa)

N = number of cycle

n = number of data

take in; $\ln S = \ln A + B \ln N$

จาก Regression analysis จะได้ว่า

$$\ln A = \frac{\sum \ln S \cdot \sum (\ln N)^2 - \sum \ln N \cdot \sum \ln N \cdot \ln S}{n \sum (\ln N)^2 - (\sum \ln N)^2} \quad (2)$$

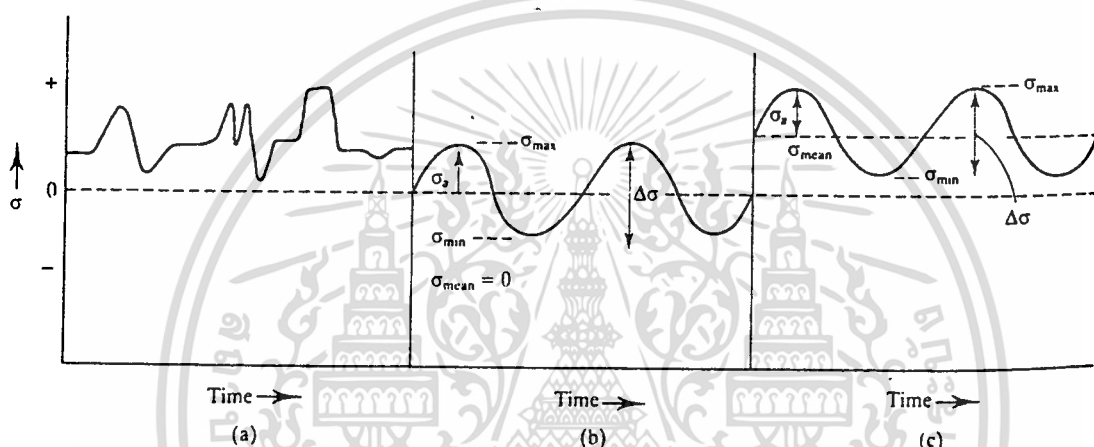
หรือ $\ln A = \ln S - B \ln N$

$$B = \frac{n \sum \ln S \cdot \ln N - \sum \ln N \cdot \sum \ln S}{n \sum (\ln N)^2 - (\sum \ln N)^2} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าความต้านทานในการล้า

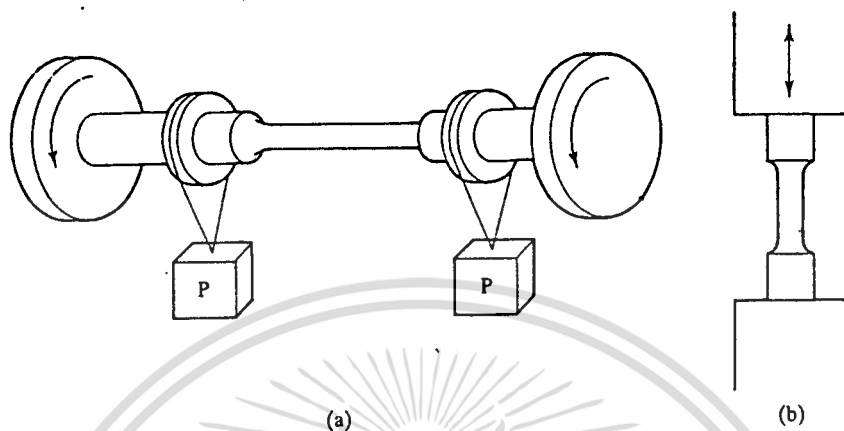
โครงสร้างทางวิศวกรรม ซึ่งเสียหายเนื่องจากความล้า โดยทั่วไปมักเกิดจากแรงที่กระทำภายใน(Stochastic loading) จากการศึกษา ภายใต้พื้นผิวของเครื่องบินเราจะพบว่า เมื่อเครื่องบินบินจะมีความเค้นดึงกระทำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากรูปวิเคราะห์โครงสร้างรูปที่ 5a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและเวลาซึ่งกระทำที่ปีกเครื่องบิน ซึ่งเป็นผลมาจากกรรมวิธีการผลิตและการเคลื่อนที่ของลมแบบเทอร์บูเลนซ์ที่กระทำที่ปีกเครื่องบิน



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเทียบกับเวลา

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเทียบกับเวลา รูป a) แสดงโครงสร้างทางวิศวกรรมขึ้นอยู่กับค่าความเค้นเฉลี่ยค่าบวก ซึ่งกำหนดโดยแรงที่กระทำแบบสุ่ม รูป b) แสดงการทดสอบความล้าเนื่องจากการหมุนของคาน โดยมีการให้ความเค้นกด และความเค้นดึงมีขนาดเท่ากัน รูป c) เป็นการทดสอบแรงดึงในแนวเส้นรอบวงซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเวลา และความเค้นจะเป็นลักษณะฟังก์ชันไซน์ ซึ่งถูกกำหนดโดยค่าความเค้นเฉลี่ยซึ่งมีค่าคงที่ ช่วงค่าความเค้น , ขนาดแอมพลิจูดของความเค้น และค่าความเค้นเฉลี่ยแสดงในรูป b) และ c)

ในการศึกษาถึงค่าความต้านทานการล้าของวัสดุ ต้องมีการประยุกต์ค่าความเค้น และค่าความเครียดเป็นวัฏจักรไป ซึ่งการทดสอบโดยวิธีนี้ยังมีข้อบกพร่อง ดังนั้นเราจะมาทำการศึกษากการทดสอบความล้าของการหมุนของคาน ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าที่สุด แสดงในรูป 6 a)



รูปที่ 6 รูปแสดงลักษณะการทดสอบการด้า

ในการทดสอบโดยวิธีนี้ แรงที่มากกระทำจะทำให้เกิดค่าความเค้นค่าบวกและค่าลบ. ซึ่งเป็นค่าความเค้นดึงและค่าความเค้นกดกระทำที่ พื้นผิวของแกน ซึ่งจะสลับกันไปในขณะที่แกนหมุน ดังแสดงในรูป 6 b)

ค่าความเค้นซึ่งจำเป็นในการทดสอบความล้าแบบหมุนคดของแกน จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเค้นสูงสุด(σ_{max}) และค่าความเค้นต่ำสุด(σ_{min}) ซึ่งเรานำค่าความเค้นสูงสุดและต่ำสุดมาหาค่าความเค้นเฉลี่ย จะได้

$$\sigma_{mean} = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$$

และค่าช่วงของความเค้น $\Delta\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$ และขนาดแอมพลิจูดของความเค้น $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2 = \Delta\sigma / 2$ บ่อยครั้งที่ค่าอัตราส่วนความเค้น (R) ซึ่ง $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งโดยปกติค่า R จะรู้

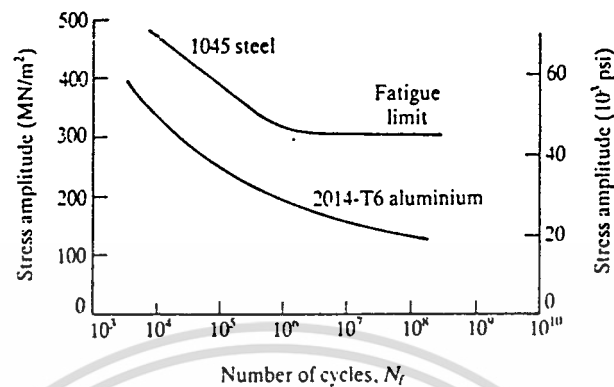
ในการทดสอบการล้าแบบหมุนคดของแกน ถ้าค่า $\sigma_{mean} = 0$ จะทำให้ค่า $\Delta\sigma = 2\sigma_{max}$, $\sigma_a = \sigma_{max}$ และ $R = -1$ จากการศึกษาเราพบว่าในการทดสอบโดยการให้ค่าความเค้นกดและความเค้นดึง ซึ่งมีขนาดเท่ากันกระทำสลับกันไป จะมีโครงสร้างบางส่วนเท่านั้นที่มีการเสียหายเนื่องจากการล้าโดยวิธีนี้ ดังนั้นในการทดสอบความต้านทานการล้าที่ส่วนอื่น ๆ ของแกนจึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นแทนจึงจะเป็น

จะเป็นการเหมาะสมกว่าซึ่งจะเห็นว่าเป็นวิธีการทดสอบโดยใช้ค่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงจะเป็นการเหมาะสมกว่าในการทดสอบส่วนอื่น ๆ ของคานหมุน ดังรูป 6 b)

จากรูปที่ 6 b) จะเห็นว่ามีการกำหนดขนาดแอมพลิจูดของความเค้นในแนวเส้นรอบวงเป็นค่าจำเพาะค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าความเค้นเฉลี่ยขนาดจำกัด รูป 5 c) แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉลี่ย และเวลา

จากการศึกษาเราพบว่าค่าความถี่ ในการประยุกต์ค่าความเค้นจะมีผลกับวัสดุพวก โพลีเมตริก (Polymetric Material) ถึงแม้ว่าค่าความถี่นี้จะมีค่าน้อยก็ตาม อย่างไรก็ตามสำหรับพวกอัลลอยด์อื่น ๆ ลักษณะความล้าจะเกิดขึ้นกับความถี่ในแนวเส้นรอบวง เมื่อค่าความถี่มีค่าสูงเท่านั้น ซึ่งถ้าความถี่มีค่าต่ำประมาณ 200 Hz เราสามารถพิจารณาได้ว่าความถี่ไม่มีผลต่อการล้า เพราะเวลาที่ความถี่ 200 Hz หรือต่ำกว่า เราจะไม่นำมาพิจารณาในการประยุกต์ทางวิศวกรรม

การควบคุมความเค้นในการทดสอบเป็นที่นิยมทำกันและสะดวกในทางปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีนี้ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบทางวิศวกรรมซึ่งเกี่ยวข้องกับกรล้า ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีการใช้ค่าแอมพลิจูดของความเค้นเป็นชุด ซึ่งจะมีการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดและจะมีการกำหนดค่าความเค้นเฉลี่ยไว้ นอกจากนี้ยังมีการวัดจำนวนรอบของความเค้น (N_f) ที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้า ซึ่งผลจากการทดสอบโดยการประยุกต์ค่าแอมพลิจูดเป็นชุดในทางปฏิบัติแสดงในรูป 7 ซึ่งเป็นโลหะ 2 ชนิด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_f และ σ_u ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่า N_f เพิ่มขึ้น ค่า σ_u จะลดลง ในกรณีที่เป็นเหล็ก ลักษณะกราฟในรูป 7 แสดงให้เห็นว่าขนาดแอมพลิจูดของความเค้นจะลดต่ำลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งการเสียหายเนื่องจากความล้าจะไม่เกิดขึ้น โดยค่า N_f จะไม่มีผล จุดที่ขนาดแอมพลิจูดของความเค้นมีค่าคงที่เราเรียกว่า ขอบเขตการล้า (fatigue limit) ของเหล็ก จะเห็นว่าค่าขอบเขตการล้าจะมีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นดึงของเหล็ก ซึ่งขอบเขตนี้ จะได้ว่า ที่ค่า $\sigma_{mean} = 0$ ($R = -1$) สำหรับอลูมิเนียมจะไม่มีขอบเขตการล้า นั่นคือเมื่อจำนวนรอบมีค่ามากอลูมิเนียมจะเสียหายเนื่องจากความล้า



รูปที่ 7 แสดงขนาดแอมพลิจูดของความเค้นตามจำนวนรอบ

ขอบเขตการล้าของโลหะส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการออกแบบ สำหรับโลหะที่ไม่มีขอบเขตการล้า เราจะนำขนาดแอมพลิจูดของความเค้นที่ทำให้เกิดความเสียหาย ที่จำนวนรอบมีค่าสูงมาใช้แทนได้

จะเห็นว่าเมื่อค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าขอบเขตของความล้าหรือแอมพลิจูดของความเค้นวิกฤตจะมีค่าลดลง ดังแสดงใน รูป 8

สมการของ Goodman เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า fatigue limit หรือ critical stress amplitude กับค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress) ดังแสดงในสมการ (4)

$$\sigma_a = \sigma_{fat} \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_{mean}}{T.S} \right) \right\} \quad \dots(4)$$

โดยที่ σ_{fat} = fatigue limit

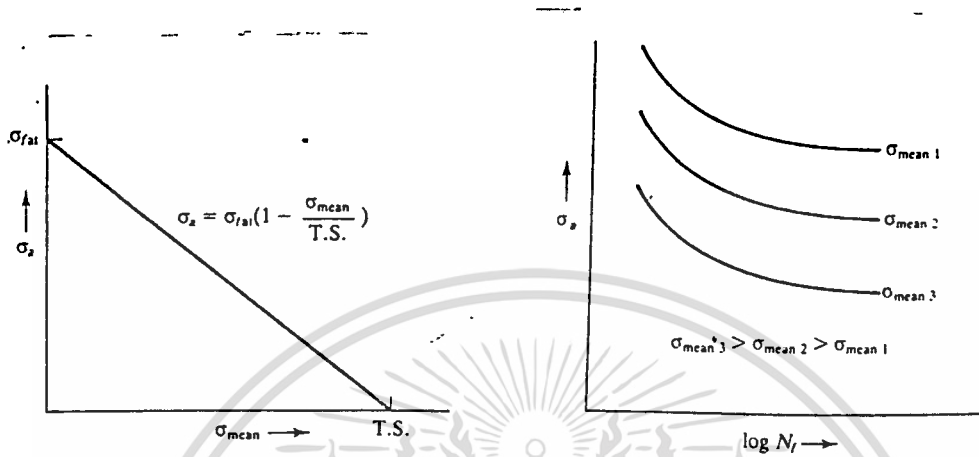
T.S = ค่าความเค้นแรงดึงในแนวแกน

σ_{mean} = ค่าความเค้นเฉลี่ย

σ_a = ค่าความเค้นอนุญาต

กราฟรูป 9 แสดงความสัมพันธ์ของ σ_a และ σ_{mean}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ σ_x และ N รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ σ_x และ σ_{mean}

จากสมการข้างบนจะเห็นว่าจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากการประมาณค่าออกช่วง (extrapolation) จากข้อมูลที่ได้ซึ่งถูกกระทำภายใต้แรงกระทำในแนวเส้นรอบวง ซึ่งเป็นการสุ่มกระทำสำหรับตัวอย่างมีโลหะชนิดที่ใช้ความเค้นในแนวเส้นรอบวง ทดสอบ แทนที่จะเป็นความเค้น เมื่อเราทำการศึกษาต่อไปจะพบว่า ถ้าเราจะศึกษาความต้านทานของโลหะเนื่องจากความเสียหายเนื่องจากการล้า จะเป็นการสะดวกกว่าถ้าเราทำการศึกษาโดยพิจารณาที่ความเค้นในแนวเส้นรอบวง

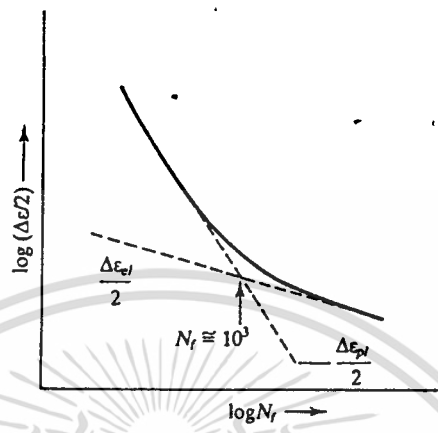
เท่าที่ผ่านมามีการทดสอบจะพบความยุ่งยากมาก ถ้าทดสอบโดยใช้ความเค้นในแนวเส้นรอบวงเพียงอย่างเดียว ซึ่งเราจะเห็นว่าการศึกษาในปัจจุบันจะสะดวกและง่ายขึ้นเมื่อเรานำเอาการทดสอบความเค้นในแนวเส้นรอบวงมาใช้ควบคู่กับการทดสอบโดยใช้ความเค้นในแนวเส้นรอบวง

เราจะเห็นได้ว่าความเค้นและความเค้นในแนวเส้นรอบวงจะมีความสัมพันธ์กัน พิจารณาจากตัวอย่าง ในระหว่างที่จำนวนรอบของความล้ามีค่าสูง ($N_f \geq 10^3$) ค่าของช่วงความเค้นยืดหยุ่น จะสัมพันธ์กับช่วงของความเค้น ดังนี้

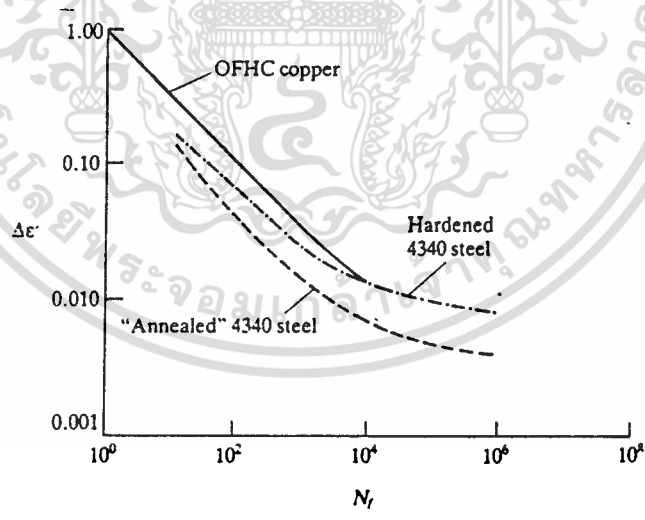
$$\Delta \epsilon_s = \Delta \sigma / E \quad \text{เมื่อค่า } E \text{ คือค่ายังโมดูลัส}$$

ผลจากการควบคุมความเค้นในแนวเส้นรอบวง ในการทดสอบความล้า แสดงใน รูป 10 และสำหรับโลหะทั่ว ๆ ไปแสดงในรูป 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงการควบคุมความเครียดในการทดสอบความล้า



รูปที่ 11 แสดงการควบคุมความเครียดในการทดสอบความล้า

จากรูป 10 การควบคุมค่าความเครียดในการทดสอบความล้า ค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง ($\Delta\epsilon/2$) จะสัมพันธ์กับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย(N_f) โดยเมื่อค่า $N_f > 10^3$ ค่าความชันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\log(\Delta E/2)$ และค่า $\log(N_f)$ จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อค่า $N_f < 10^3$ โดยค่า $\Delta E/2 = (\Delta E_{ct} + \Delta E_{pt})/2$ โดยค่า ΔE_{ct} คิดที่จำนวนรอบมีค่าสูง และ ΔE_{pt} คิดที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ

สิ่งที่น่าสังเกต

จากกราฟจะสังเกตได้ว่า ค่า $\Delta E / 2$ แสดงในรูปของค่าลอก (logarithmically) ในขณะที่ค่าความเค้นอนุญาต (σ_u) จะแสดงในรูปเชิงเส้น

มีสูตรหลายสูตรที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและจำนวนรอบ โดยการกำหนดค่า ที่แตกต่างกันจะได้ว่า ที่จำนวนรอบของความล้ามีค่าสูง นั่นคือค่า $\Delta E \approx \Delta E_{ct}$ ค่าความเครียดยืดหยุ่นจะสัมพันธ์กับค่า N_f ดังนี้

$$\Delta E_{ct} / 2 = \sigma'_f (2 * N_f)^b / E \quad \dots(5)$$

โดย ค่า E = ค่ายังโมดูลัส

ค่า σ'_f และค่า b สามารถหาได้จากการทดลอง

จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่า ΔE และค่า N_f จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า σ'_f มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือโลหะที่มีความทนทานจะสามารถนำมาประยุกต์ที่ค่าจำนวนรอบของความล้ามีค่าสูง

ในการออกแบบทางวิศวกรรม ควรคำนึงถึงความล้าเมื่อจำนวนรอบมีค่าสูง เนื่องจากการแตกร้าวมีสาเหตุมาจากการเสีรูปร่างของพลาสติกที่อยู่กับที่ ซึ่งปกติจะเกิดที่พื้นผิวของโลหะ ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของโลหะจะช่วยทำให้การเกิดรอยร้าวช้าลง การอบเย็นถูกนำมาใช้ในการทำให้คุณสมบัติของความล้าที่จำนวนรอบมีค่าสูงดีขึ้น นอกจากนี้อาจจะใช้วิธีทางเคมี การทำ คาร์ไบด์ (carburrizing) การทำไนไตรดิง (nitriding) การทำมาเทนไซท์ที่พื้นผิวของโลหะ ซึ่งกรรมวิธีทั้งหมดนี้จะทำให้พื้นผิวทนทานขึ้น และเป็นการเพิ่มค่าความเค้นดึง

สำหรับความล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ ($N_f < 10^3$) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง และ ดังนี้

$$\Delta E_{pt} / 2 = \epsilon'_f (2 * N_f)^c \quad \dots(6)$$

โดย ค่า c มีค่า 0.5-0.7 และมีค่าความสัมพันธ์โดยประมาณกับค่า n' โดย

$c \approx 1/(1+5*n')$ และค่า ϵ'_f จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดึงในแนวเส้น ดังนั้นในการออกแบบสำหรับการล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำจำเป็นต้องใช้โลหะที่มีความสามารถดึงเป็นเส้นได้และมีค่าความแข็งแรงในการใช้งานสูง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มค่า N_f

จากสมการที่ (5) และ (6) จะเห็นได้ว่าเป็นการเพียงพอที่จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด และจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการเสียหายสำหรับความล้าที่จำนวนรอบมีค่าสูงและมีค่าต่ำ ดังนั้นเราสามารถสมมติได้ว่า

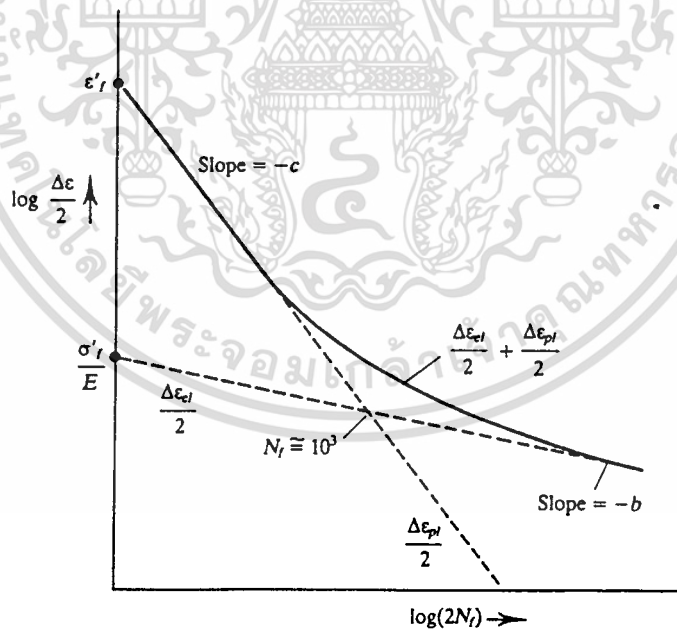
$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{e1} + \Delta \varepsilon_{p1}$$

นั่นคือ

$$\Delta \varepsilon / 2 = \Delta \varepsilon_{e1} / 2 + \Delta \varepsilon_{p1} / 2 = \sigma'_f * (2 * N_f)^b / 2 + \varepsilon'_f * (2 * N_f)^c \quad \dots(7)$$

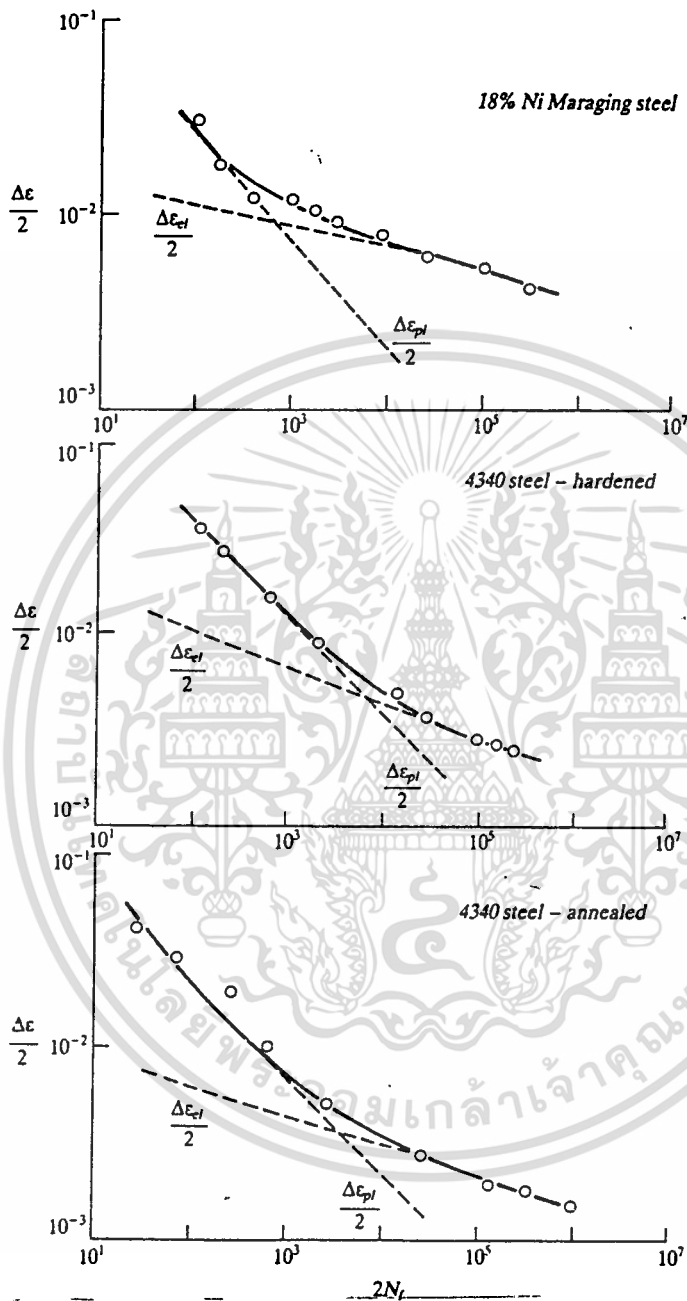
ความสัมพันธ์ของสมการที่ (7) แสดงในรูป 12 ซึ่งเมื่อค่า $N_f \leq 10^3$ และ $\Delta \varepsilon \approx \Delta \varepsilon_{p1}$ สมการ (7) จะลดรูปเป็นสมการ (6) แทน และเมื่อค่า $N_f \geq 10^3$ และค่า $\Delta \varepsilon \approx \Delta \varepsilon_{e1}$ สมการ (7) จะลดรูปเป็นสมการ (6) แทน

การนำสมการที่ (7) ไปประยุกต์ใช้ในปัจจุบันนับว่าประสบความสำเร็จในระดับปานกลาง ซึ่งแสดงในรูป 13



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (7)

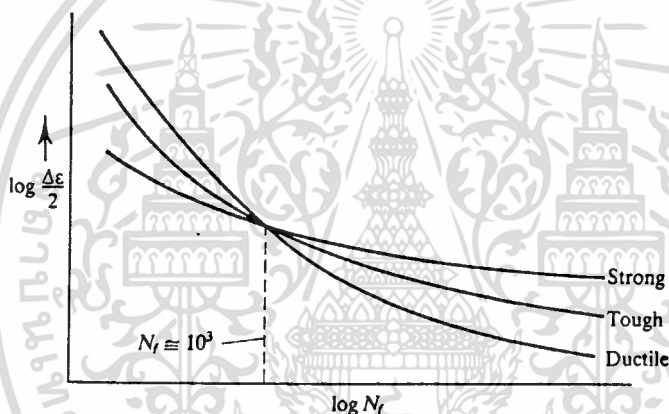
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (7) ในการไปประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถสรุปได้ว่าสำหรับโลหะที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับค่าความล้าที่จำนวนรอบสูงหรือต่ำแตกต่างกัน โดยโลหะที่ดึงเป็นเส้นได้ ต้องมีการประยุกต์ใช้ที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ เพราะความเสียหายเนื่องจากความล้า จะมีการขยายตัวในช่วงต้นของอายุการใช้งานของโลหะ เพราะการทำให้รอยแตกร้าวเกิดขึ้นช้า สามารถทำได้โดยการทำให้โลหะแข็งเพียงพอ และการเลือกใช้โลหะที่สามารถตีแผ่ได้ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จำเป็นต้องประยุกต์ใช้สำหรับความล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามการเกิดขึ้นของรอยแตกร้าวทำให้สามารถเกิดขึ้นช้าได้ โดยการใช้โลหะที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ (7) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง และสำหรับโลหะที่ทนทาน และโลหะที่ดึงเป็นเส้นได้ จากรูปที่ (7) จะเห็นได้ว่าโลหะที่มีความแข็งแรงสูง จะประยุกต์ใช้สำหรับความล้าที่จำนวนรอบสูง และโลหะที่ดึงเป็นเส้นได้ จะประยุกต์ใช้สำหรับความล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ จากกราฟจะเห็นว่าเส้นกราฟจะไขว้กันที่ค่า N_f ซึ่งค่า $\Delta \varepsilon_e \approx \Delta \varepsilon_p$



รูปที่ 14 แสดงคุณสมบัติของโลหะตามความแข็งแรงและความเหนียว

สำหรับโลหะที่เหมาะสมที่สุดเหนือช่วงของความเครียดก็คือโลหะที่มีความเหนียวและแข็งแรง ซึ่งคุณสมบัติของโลหะประเภทนี้แสดงในรูปที่ 14 ซึ่งโลหะประเภทนี้สามารถทำได้โดยการลดระดับความแข็งแรงและเพิ่มความแข็งแรงในการดึงเป็นเส้นได้ เราจะเห็นได้ว่าโลหะซึ่งมีความต้านทานในการล้าในอุดมคติจะต้องมีค่าความแข็งแรงสูงและสามารถดึงเป็นเส้นได้ ซึ่งพื้นฐานนี้เราจะเห็นได้ว่าการเลือกโลหะที่มีความสามารถในการต้านทานความแตกร้าวเนื่องจากความล้าจะไม่แตกต่างจากการเลือกโลหะที่มีความสามารถในการต้านทานความเสียหายเนื่องจากแรงดึง

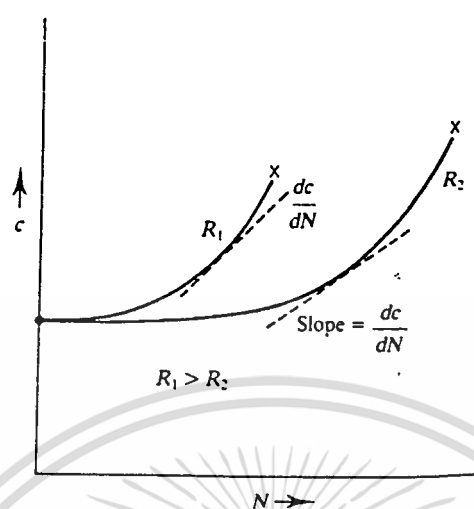
เราจะเห็นได้ว่าการขยายตัวของรอยร้าวอย่างช้าๆ เนื่องจากความล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ จะทำให้การแตกร้าวที่โลหะได้ จากเหตุผลนี้นำไปสู่การทดสอบจำนวนมากซึ่งนำไปสู่ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวสภาวะที่ 2 ซึ่งขึ้นกับขนาดของรอยร้าวและช่วงของความเค้น ซึ่งนำไปสู่การสรรหาข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณอายุใช้งานเนื่องจากความล้าโดยเฉพาะ การประยุกต์สำหรับความล้าที่จำนวนรอบมีค่าต่ำ

ผลจากการทดสอบมีประโยชน์มากในการนำไปศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติโลหะ และการขยายตัวของรอยร้าวที่สภาวะที่ 2

อัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า

การวัดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สภาวะที่ 2 เป็นประโยชน์ในการออกแบบทางวิศวกรรม และยังเป็นการเพิ่มความเข้าใจในขบวนการเกิดความล้ามากยิ่งขึ้น เราจะพบว่าจากการศึกษาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สภาวะที่ 2 ประกอบกับความรู้ขอบเขตความเหนียวในการเสียหายของโลหะ จะเป็นตัวบ่งบอกให้ทราบถึง จำนวนรอบที่สภาวะที่ 2 ที่วัตถุจะเสียหาย

ดังนั้นสำหรับวัตถุที่มีจำนวนรอบเนื่องจากความล้ามีค่าต่ำ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สภาวะที่ 2 จะมีผลต่ออายุการใช้งานของวัตถุสำหรับการวัดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สภาวะที่ 2 กำลังปฏิบัติกันในห้องทดลองทั่วไป ได้มีการใช้ตัวอย่างทดสอบการเกิดรอยร้าวล่วงหน้าในการทดสอบการแตกร้าวทางกล ซึ่งจากการทดสอบโดยวิธีนี้ เป็นการเพียงพอที่จะวัดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้าได้ ซึ่งในการทดสอบนี้จะมีการกำหนดขนาดแอมพลิจูดของความเค้นให้ตายตัว ที่ค่าความเค้นเฉลี่ยจำเพาะหรือที่ค่าอัตราส่วนความเค้น ซึ่งเราจะพบว่าความยาวของรอยร้าวจะเป็นฟังก์ชันของจำนวนรอบ ซึ่งการวัดความยาวของรอยร้าวสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งอาจจะเป็นการวัดโดยตรงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ หรืออาจทำการวัดโดยใช้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ส่วนของรอยแตกร้าว ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูป 15 โดยค่า c คือความยาวของรอยร้าวเนื่องจากความล้าบริเวณพื้นผิว ซึ่งแสดงรวมไว้กับค่าจำนวนรอบของความเค้น



รูปที่ 15 แสดงอัตราอรรถรร่วงหน้าในกราฟระหว่าง C และ N

จากรูป 15 จะเห็นว่า อัตราอรรถรร่วงหน้า ซึ่งก็คือความชันในกราฟระหว่าง c กับ N จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามจำนวนรอบ นอกจากนี้เรายังกล่าวได้ว่าอัตราอรรถรร่วงหน้า จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขนาดของรอยแตกร้า นอกจากนี้เรายังพบว่าเมื่อมีการกำหนดค่าช่วงของความเค้น การแตกร้าล่งหน้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้น

เราจะพบว่าค่าความชันที่แสดงในรูป 15 เป็นการวัดค่าอัตราการขยายตัวของรอยร้าวนื่องจากการล้าโดยตรง เราจะพบว่าค่าความชันจะเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้คือ

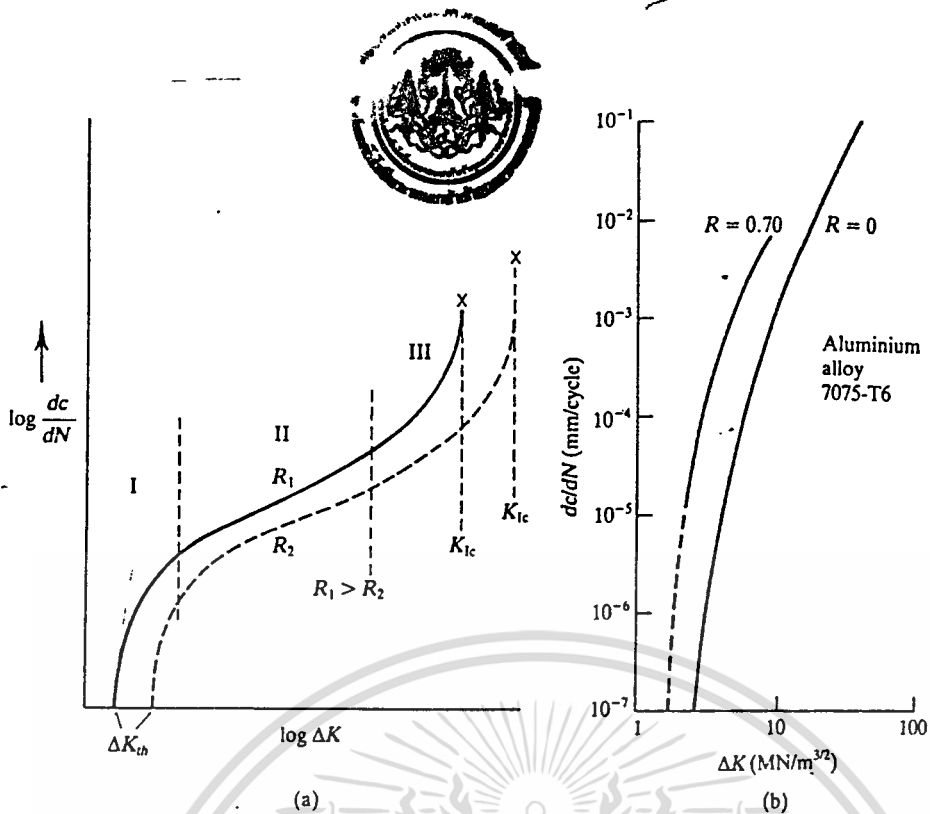
$$dc / dN \sim A*(\Delta k)^m \quad \dots(8)$$

โดยค่า A คือค่าคงที่ ที่ขึ้นกับวัสดุ และค่าอัตราส่วนความเค้น

ค่า m เป็นค่าคงที่สำหรับสมการ ($2 \leq m \leq 7$)

$$\Delta k \approx \Delta \sigma^*(c)^{1/2}$$

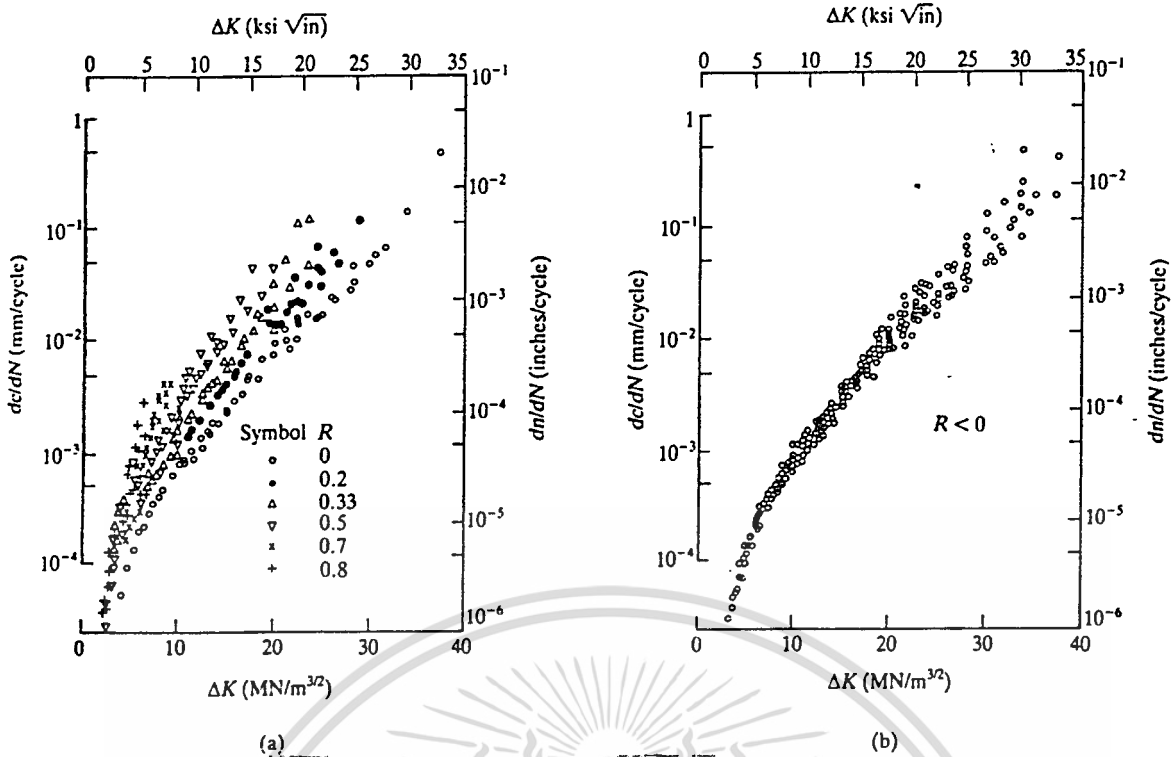
ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า dc/dN กับค่า Δk แสดงในรูป 16



รูปที่ 18 แสดงอัตราการขยายตัวของรอยร้าว

จากรูป 16 จะเห็นว่าเมื่อค่า Δk มีค่าต่ำ อัตราการขยายตัวของรอยแตกร้าวก็จะมีค่าต่ำ (แสดงในบริเวณที่ 1 ของรูป 16 a) ค่า Δk ในช่วงแรกของรูป จะมีค่าต่ำ ให้มีค่าเท่ากับ Δk_{th} ซึ่งในบริเวณอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่สภาวะที่ 2 จะไม่ขยายตัว ซึ่งค่า Δk_{th} จะแสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นในการออกแบบที่เกิดจากความเสียหายเนื่องจากความล้าเราจะเห็นว่าค่า Δk_{th} จะมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของความเค้นวิกฤติ ซึ่งการใช้ค่า Δk ที่มีค่าต่ำจะเพิ่มขีดจำกัดมากขึ้นในการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นในการออกแบบโดยทั่วไปจะยอมรับให้การแตกร้าวเนื่องจากความล้าสามารถขยายตัวได้ แต่จะต้องไม่ทำให้เกิดความเสียหายในช่วงอายุการใช้งาน ขณะที่ค่า Δk_{th} มีค่าเพิ่มขึ้น, $k_{max} (\sim \sigma_{max}(c)^{1/2})$ มีค่าเข้าใกล้ค่าความเข้มของความเค้นวิกฤติ ค่า $\Delta k = k/c$ ซึ่งในช่วงนี้ใกล้จุดที่จะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า (บริเวณที่ 3 ในรูป 16 a)

ในช่วงที่ 2 ของรูป 16 a ค่า R จะมีผลน้อยมากต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าว ซึ่งในความจริงถ้าค่า R มีค่าน้อยกว่าศูนย์ อย่างเช่น เมื่อมีความเค้นกดกระทำที่บางส่วนในวัฏจักร ซึ่งอัตราส่วนความเค้นนี้จะมีผลต่อการขยายตัวของรอยร่วมน้อยมาก ซึ่งแสดงในรูป 17



รูปที่ 17 แสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าว

การรู้ความสัมพันธ์ระหว่าง dc/dN และ Δk จะนำไปสู่การกำหนดจำนวนรอบที่ใช้ในสมการที่ 2 ถ้าเรารู้ความยาววิกฤติที่จะทำให้เกิดรอยร้าววิกฤติ c_f , ซึ่งทำให้เกิดการแตกร้าวในที่สุด และรู้ความยาวของรอยร้าวเริ่มต้น c_o

ในกรณีทั่ว ๆ ไปการวิเคราะห์ต้องทำโดยใช้การคำนวณทางตัวเลขเพราะว่าค่า dc/dN จะไม่สามารถแสดงได้ในกรณีวิเคราะห์ในกรณีที่เกินจากค่า Δk ที่แสดงในระหว่างที่มีการขยายตัวในสภาวะที่ 2

ค่าจำนวนรอบในสภาวะที่ 2 แสดงได้ดังนี้

$$N_H = \int_{c_o}^{c_f} dc / (dc/dN) \quad \dots(9)$$

ซึ่งสมการนี้มีประโยชน์ในการนำมาหาค่า... เมื่อเราแทนค่า... ใน สมการ (8) ลงในสมการ (9) จะได้

$$N_H = \int_{c_o}^{c_f} dc / (A * \alpha^m (\Delta \sigma(c))^{1/2})^n \quad \dots(10)$$

ในสมการที่ (10) ค่า $\Delta k = \alpha \Delta \sigma(c)^{1/2}$ ค่า α ขึ้นกับความลึกของรอยร้าว เมื่ออินทิเกรตสมการ (10) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_H = \left[\frac{A(\alpha\Delta\sigma)^m}{(m/2)-1} \right] \{ (c_0)^{1-(m/2)} - (cf)^{1-(m/2)} \} \dots (11 a)$$

เพราะว่าค่า $c_0 \geq c_f$ ดังนั้นจะได้

$$N_H = \left[\frac{A(\alpha\Delta\sigma)^m}{(m/2)-1} \right] (c_0)^{1-(m/2)} \dots (11 b)$$

หรือ ค่า $N_H(\Delta\sigma)^m =$ ค่าคงที่

สมการที่ (11 b) นำมาใช้ประโยชน์ได้กว้างมาก อย่างเช่นถูกนำมาใช้กำหนดอายุความล้าตามข้อสมมติที่รูปร่างของความเสียหายที่แสดงอยู่



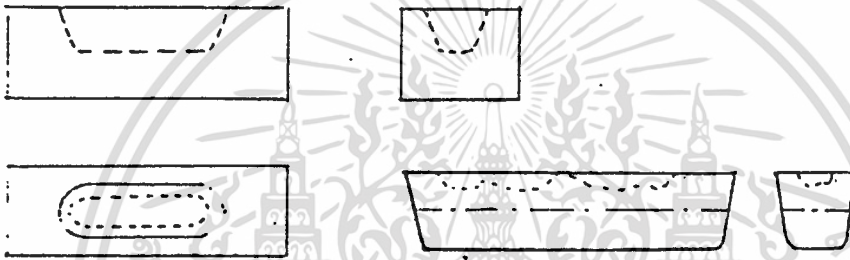
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทดลองและการเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมงาน

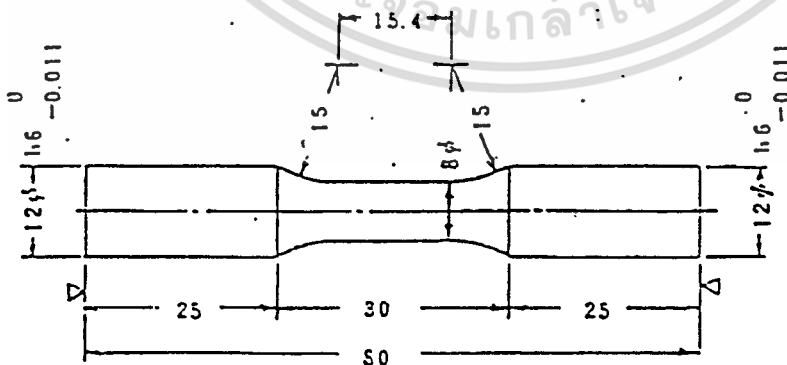
ขบวนการหล่ออลูมิเนียม

1. นำ ingot ของอลูมิเนียม มาหลอมที่เตาหลอมที่อุณหภูมิ 900-950°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง
2. จากนั้นนำมาไว้ที่เตาพักเพื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงที่ประมาณ 750°C จากนั้นจะทำการตัก slag ออกแล้วใส่ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส(แบบก้อน,ผง) เป่าด้วยก๊าซ N_2 เพื่อไล่แก๊ส และสิ่งสกปรก ตัก slag ออกอีกครั้งแล้วทิ้งไว้ 30 นาที
3. นำมาเทลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 250°C



รูปที่ 18 แสดงลักษณะของแบบหล่อ

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบ จะต้องมีความได้มาตรฐานการทดสอบ ดังรูป



รูปที่ 19 แสดงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความด้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรรมวิธีการทำชิ้นงาน

1. นำชิ้นอลูมิเนียมจากบริษัทผู้ผลิต มากถึงหลายเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 mm
2. นำชิ้นงานดังกล่าวมากลึงละเอียดด้วยเครื่อง CNC
3. นำมาขัดผิวตามแนวยาว เพื่อลบรอยที่เกิดจากการกลึงด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 800

วิธีการทดสอบความล้า

เป็นการทดสอบความล้าแบบหมุนตัด ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความล้า One's High Temperature model 7 Rotation Fatigue testing Machine ทดสอบที่อุณหภูมิ 260°C , 200°C , 175°C , 150°C และ 100°C

ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ

1. เครื่องทดสอบความล้า
2. เครื่องตั้งอุณหภูมิ

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ประกอบชิ้นงานเข้ากับหัวจับชิ้นงาน (chucking rod)
2. นำ split nut ประกอบเข้ากับหัวจับชิ้นงาน และสวม cap nut ให้ตรงกับขอบ split nut
3. นำไปสวมเข้ากับแกนหมุน โดยสวมทางด้านซ้ายมือ (ด้านที่มีมอเตอร์) ก่อน จากนั้นจึงสวมทางด้าน

ขวามือ ขึ้นให้แน่น

4. เปิดเครื่องตั้งอุณหภูมิ และรอปรับจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ คือ 100°C , 150°C , 175°C , 200°C และ 260°C

5. เปิดเครื่องให้มอเตอร์หมุน จากนั้นปล่อยน้ำหนักลงอย่างช้า ๆ

6. ปรับ limit switch ให้พอเหมาะเพื่อให้มอเตอร์หยุดหมุน และ ชุดให้ความร้อนหยุดทำงานเมื่อชิ้นงาน

ขาด

7. เมื่อชิ้นงานขาดให้บันทึกจำนวนรอบ และขนาดน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง						
Data for fatigue testing at 100 celcius						
Load	Stress	Cycle	LnS	LnN	LnS.LnN	LnN.LnN
6.5	126.95	100900	4.843793	11.52189	55.80963	132.7538
6.5	126.95	75700	4.843793	11.23453	54.41776	126.2147
6.5	126.95	41100	4.843793	10.62376	51.45931	112.8643
6.5	126.95	20000	4.843793	9.903488	47.97045	98.07907
6.5	126.95	121100	4.843793	11.70437	56.69356	136.9923
6	117.18	75500	4.763711	11.23189	53.50547	126.1553
6	117.18	185300	4.763711	12.12973	57.78254	147.1304
6	117.18	237000	4.763711	12.37582	58.95481	153.1608
6	117.18	153500	4.763711	11.94146	56.88565	142.5984
6	117.18	145000	4.763711	11.88449	56.61427	141.2411
5.5	107.42	130800	4.676746	11.78142	55.09874	138.802
5.5	107.42	326600	4.676746	12.69649	59.37827	161.2009
5.5	107.42	697200	4.676746	13.45483	62.92482	181.0324
5.5	107.42	714000	4.676746	13.47864	63.03617	181.6737
5.5	107.42	105300	4.676746	11.56457	54.08455	133.7392
5	97.65	2268700	4.58139	14.63472	67.04734	214.175
5	97.65	2563800	4.58139	14.757	67.60757	217.7691
5	97.65	5242100	4.58139	15.47223	70.88433	239.39
5	97.65	3957800	4.58139	15.1912	69.5968	230.7725
5	97.65	4565200	4.58139	15.33397	70.2509	235.1307
4.5	87.89	9919800	4.476086	16.11004	72.10994	259.5335
4.5	87.89	8726500	4.476086	15.98187	71.53625	255.4203
4.5	87.89	7515800	4.476086	15.83252	70.86771	250.6686
4.5	87.89	8545000	4.476086	15.96086	71.44217	254.749
4.5	87.89	6223000	4.476086	15.64376	70.02283	244.7273
4	78.12	19645800	4.358246	16.79337	73.18966	282.0174
4	78.12	13546900	4.358246	16.42167	71.56967	269.6712
4	78.12	12348600	4.358246	16.32905	71.16603	266.638
4	78.12	13678500	4.358246	16.43134	71.61181	269.9888
4	78.12	10565700	4.358246	16.17312	70.48645	261.5699

	Total	138.4999	414.5941	1904.005	5865.86
	LnA	5.736582			
	A	310.0031			
	B	-0.08043			

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 100 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง						
Data for fatigue testing at 150 celcius						
Load	Stress	Cycle	LnS	LnN	LnN.LnS	LnN.LnN
6.5	126.95	58400	4.843793	10.97507	53.16098	120.4522
6.5	126.95	69000	4.843793	11.14186	53.96888	124.1411
6.5	126.95	25700	4.843793	10.15425	49.18507	103.1087
6.5	126.95	80400	4.843793	11.29477	54.70953	127.5718
6.5	126.95	44900	4.843793	10.71219	51.88765	114.7511
6	117.18	168800	4.763711	12.03647	57.33827	144.8766
6	117.18	99800	4.763711	11.51092	54.83472	132.5014
6	117.18	36800	4.763711	10.51325	50.0821	110.5285
6	117.18	128100	4.763711	11.76057	56.02394	138.3109
6	117.18	59300	4.763711	10.99036	52.35492	120.7881
5.5	107.42	284300	4.676746	12.55779	58.72958	157.698
5.5	107.42	110100	4.676746	11.60914	54.29302	134.7722
5.5	107.42	305000	4.676746	12.62807	59.05827	159.4681
5.5	107.42	360500	4.676746	12.79525	59.84013	163.7184
5.5	107.42	359100	4.676746	12.79136	59.82193	163.6188
5	97.65	553700	4.58139	13.22438	60.58603	174.8842
5	97.65	512800	4.58139	13.14764	60.23447	172.8605
5	97.65	422400	4.58139	12.95371	59.34598	167.7986
5	97.65	292200	4.58139	12.58519	57.65768	158.3871
5	97.65	635600	4.58139	13.36232	61.21802	178.5517
4.5	87.89	779700	4.476086	13.56666	60.72556	184.0544
4.5	87.89	1188300	4.476086	13.98803	62.61164	195.6651
4.5	87.89	925000	4.476086	13.73755	61.49045	188.7203
4	78.12	12564600	4.358246	16.34639	71.24161	267.2046
4	78.12	14785400	4.358246	16.50915	71.95094	272.5521
4	78.12	11556300	4.358246	16.26274	70.87703	264.4768
		Total	120.8312	329.1551	1523.228	4241.461
		LnA	5.748304			
		A	313.6582			
		B	-0.085964			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ B แปรแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 150 °C

ผลการทดลอง						
Data for fatigue testing at 175 celcius						
Load	Stress	Cycle	LnS	LnN	LnN.LnS	LnN.LnN
5.5	107.42	235700	4.676746	12.37032	57.85282	153.0247
5.5	107.42	177700	4.676746	12.08785	56.53181	146.1162
5.5	107.42	264300	4.676746	12.48484	58.38843	155.8712
5.5	107.42	181000	4.676746	12.10625	56.61787	146.5613
5.5	107.42	254000	4.676746	12.44509	58.20252	154.8803
5	97.65	518100	4.58139	13.15792	60.28158	173.131
5	97.65	748100	4.58139	13.52529	61.96464	182.9335
5	97.65	729500	4.58139	13.50011	61.84929	182.2531
5	97.65	621700	4.58139	13.34021	61.11672	177.9613
5	97.65	581000	4.58139	13.27251	60.80653	176.1594
4.5	87.89	1918000	4.476086	14.46679	64.75461	209.2881
4.5	87.89	2692000	4.476086	14.80579	66.27201	219.2116
4.5	87.89	3553000	4.476086	15.0833	67.51416	227.506
4.5	87.89	1693000	4.476086	14.34201	64.19608	205.6933
4.5	87.89	2430700	4.476086	14.70369	65.81498	216.1985
4	78.12	6324000	4.358246	15.65986	68.24953	245.2313
4	78.12	5498100	4.358246	15.51991	67.6396	240.8677
4	78.12	6778000	4.358246	15.72919	68.55169	247.4075
4	78.12	4380900	4.358246	15.29276	66.64963	233.8687
4	78.12	5218000	4.358246	15.46762	67.41171	239.2474
3.5	68.36	15282700	4.224788	16.54223	69.88742	273.6454
3.5	68.36	19519500	4.224788	16.78692	70.9212	281.8008
3.5	68.36	13478200	4.224788	16.41658	69.35659	269.5042
3.5	68.36	10595100	4.224788	16.1759	68.33976	261.6598
3.5	68.36	14281000	4.224788	16.47444	69.60102	271.4072
		Total	111.5863	361.7574	1608.772	5291.43
		LnA	5.97308			
		A	392.7135			
		B	-0.10433			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีหน่วยงานใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้
 ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 175 °C

ผลการทดลอง						
Data for fatigue testing at 200 celcius						
Load	Stress	Cycle	LnS	LnN	LnS.LnN	LnN.LnN
5.5	107.42	457000	4.676746	13.03244	60.94941	169.8445
5.5	107.42	195600	4.676746	12.18383	56.98066	148.4456
5.5	107.42	197100	4.676746	12.19147	57.01639	148.6319
5.5	107.42	220300	4.676746	12.30275	57.53682	151.3575
5.5	107.42	158100	4.676746	11.97098	55.98525	143.3044
5	97.65	561000	4.58139	13.23748	60.64604	175.2308
5	97.65	723000	4.58139	13.49116	61.80829	182.0115
5	97.65	647000	4.58139	13.3801	61.29946	179.0271
5	97.65	540500	4.58139	13.20025	60.47549	174.2466
5	97.65	513000	4.58139	13.14803	60.23626	172.8707
4.5	87.89	2752700	4.476086	14.82809	66.37182	219.8723
4.5	87.89	1825400	4.476086	14.41731	64.53312	207.8588
4.5	87.89	2196500	4.476086	14.60238	65.36149	213.2294
4.5	87.89	3051100	4.476086	14.93101	66.8325	222.9351
4.5	87.89	1350000	4.476086	14.11562	63.18271	199.2506
4	78.12	2623200	4.358246	14.77991	64.41446	218.4456
4	78.12	3032200	4.358246	14.9248	65.04595	222.7496
4	78.12	2868400	4.358246	14.86926	64.80391	221.095
4	78.12	2795100	4.358246	14.84338	64.69109	220.3259
4	78.12	3025000	4.358246	14.92242	65.03558	222.6787
3.5	68.36	10415300	4.224788	16.15879	68.26745	261.1064
3.5	68.36	9557400	4.224788	16.07283	67.90428	258.3357
3.5	68.36	9364200	4.224788	16.0524	67.81801	257.6797
3.5	68.36	10587100	4.224788	16.17515	68.33657	261.6354
3.5	68.36	8650400	4.224788	15.97312	67.48303	255.1404
		Total	111.5863	355.8049	1583.016	5107.309
		LnA	6.135646			
		A	462.0374			
		B	-0.11749			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลไปยังสื่อมวลชนหรือใช้ข้อมูลนี้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 200 °C ที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 200 °C

ผลการทดลอง						
Data for fatigue testing at 260 celcius						
Load	Stress	Cycle	LnS	LnN	LnN.LnS	LnN.LnN
5	97.65	176300	4.58139	12.07994	55.34292	145.925
5	97.65	153000	4.58139	11.93819	54.69351	142.5205
5	97.65	180200	4.58139	12.10182	55.44317	146.4541
5	97.65	164500	4.58139	12.01067	55.02554	144.2561
5	97.65	163000	4.58139	12.00151	54.98357	144.0361
4.5	87.89	555200	4.476086	13.22708	59.20556	174.9557
4.5	87.89	467300	4.476086	13.05473	58.43408	170.4259
4.5	87.89	426100	4.476086	12.96243	58.02095	168.0246
4.5	87.89	510600	4.476086	13.14334	58.83073	172.7474
4.5	87.89	443000	4.476086	13.00133	58.19505	169.0345
4	78.12	1006200	4.358246	13.82169	60.23833	191.0392
4	78.12	968200	4.358246	13.78319	60.07055	189.9764
4	78.12	987300	4.358246	13.80273	60.15569	190.5153
4	78.12	843200	4.358246	13.64496	59.46809	186.1849
4	78.12	864300	4.358246	13.66968	59.57581	186.86
3.5	68.36	1660400	4.224788	14.32257	60.50982	205.136
3.5	68.36	2119700	4.224788	14.56679	61.54158	212.1912
3.5	68.36	2203100	4.224788	14.60538	61.70462	213.317
3.5	68.36	1547000	4.224788	14.25183	60.21095	203.1146
3.5	68.36	1426900	4.224788	14.17101	59.86953	200.8177
3	58.59	4405800	4.070564	15.29843	62.27325	234.042
3	58.59	4204000	4.070564	15.25155	62.0824	232.6097
3	58.59	4503000	4.070564	15.32025	62.36208	234.7102
3	58.59	5201300	4.070564	15.46442	62.94891	239.1483
3	58.59	4305000	4.070564	15.27529	62.17904	233.3344
2.5	48.83	10022000	3.888345	16.12029	62.68126	259.8639
2.5	48.83	8765000	3.888345	15.98628	62.16016	255.5611
2.5	48.83	7376200	3.888345	15.81377	61.48939	250.0753
2.5	48.83	7895000	3.888345	15.88174	61.75368	252.2297

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

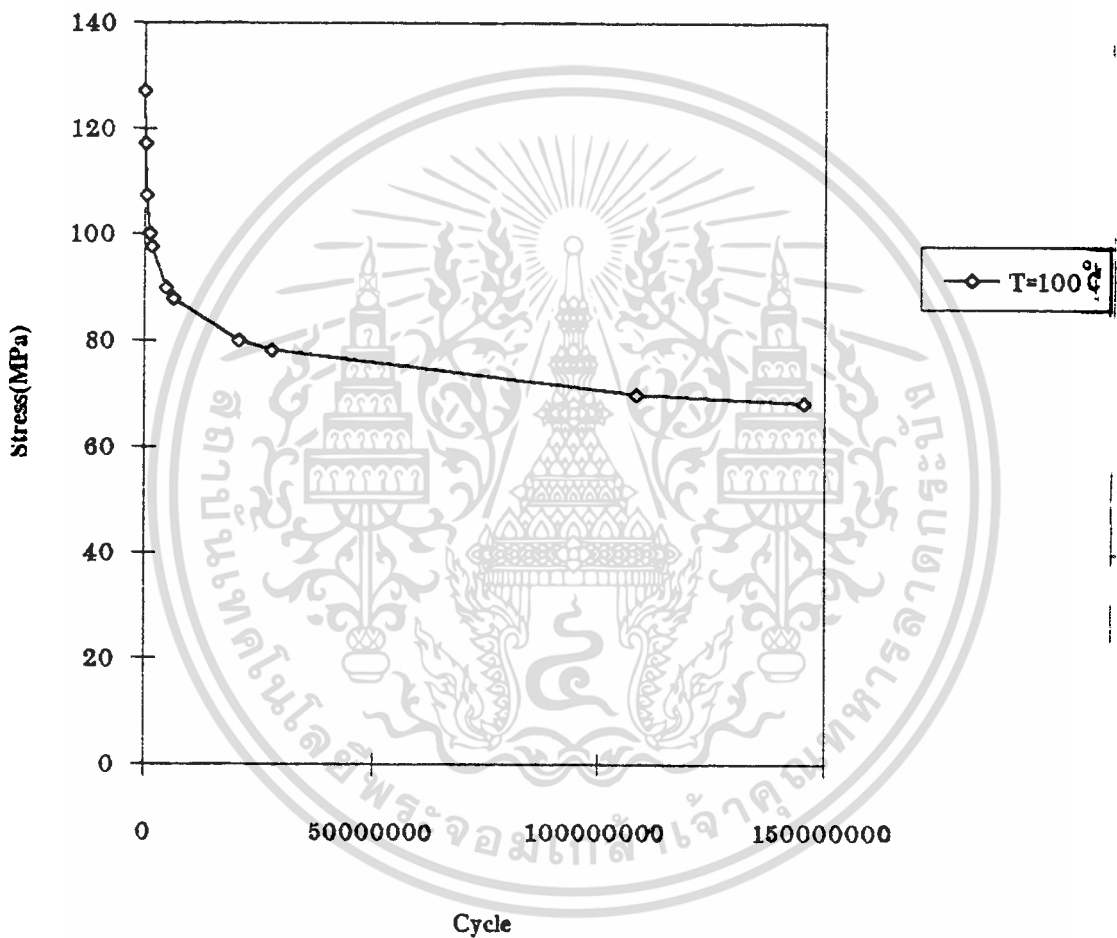
2.5	48.83	8547600	3.888345	15.96116	62.0625	254.7587
2	39.06	13993100	3.665099	16.45407	60.30581	270.7366
2	39.06	11569400	3.665099	16.26387	59.60871	264.5136
2	39.06	10876000	3.665099	16.20207	59.38219	262.507
2	39.06	12360400	3.665099	16.33001	59.8511	266.6692
2	39.06	11587000	3.665099	16.26539	59.61428	264.5631
		Total	146.3226	504.0495	2092.275	7332.855
		LnA	7.102123			
		A	1214.542			
		B	-0.20286			

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการทำกราฟที่อุณหภูมิ 260 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

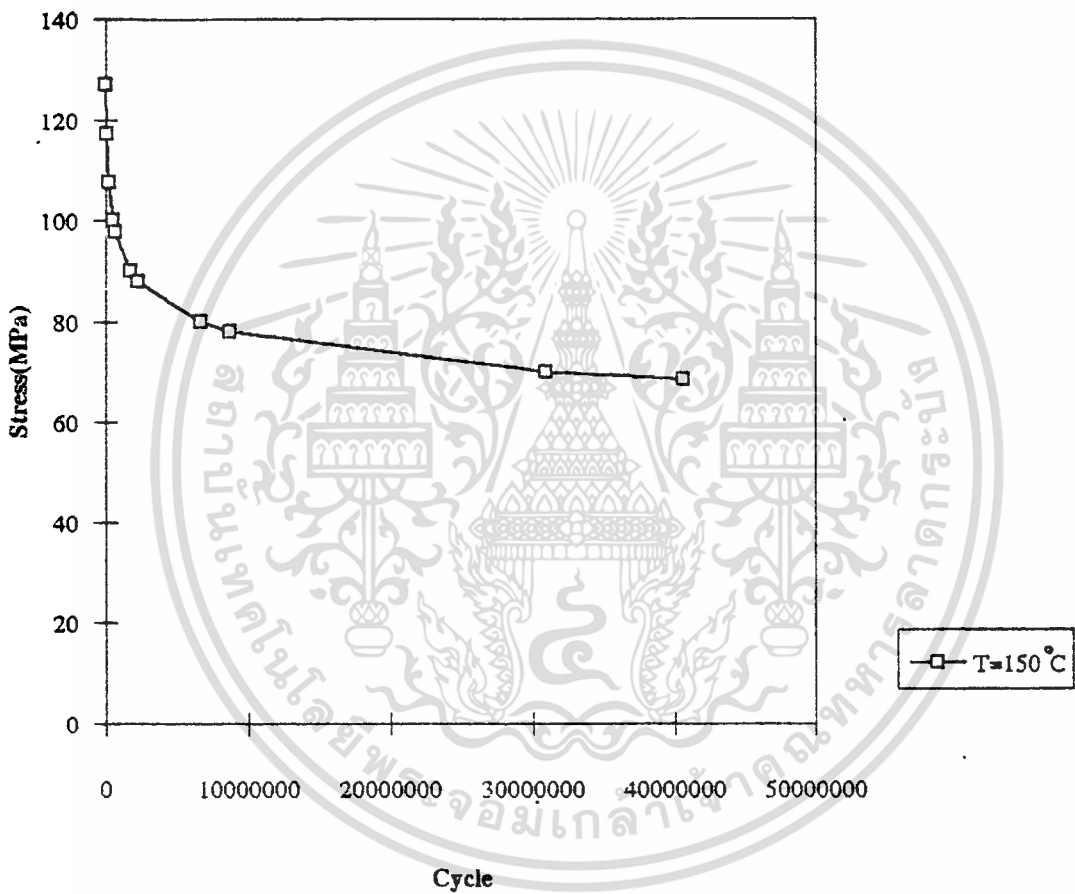
Regression Graph for Temperature 100 celcius



รูปที่ 20 กราฟของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

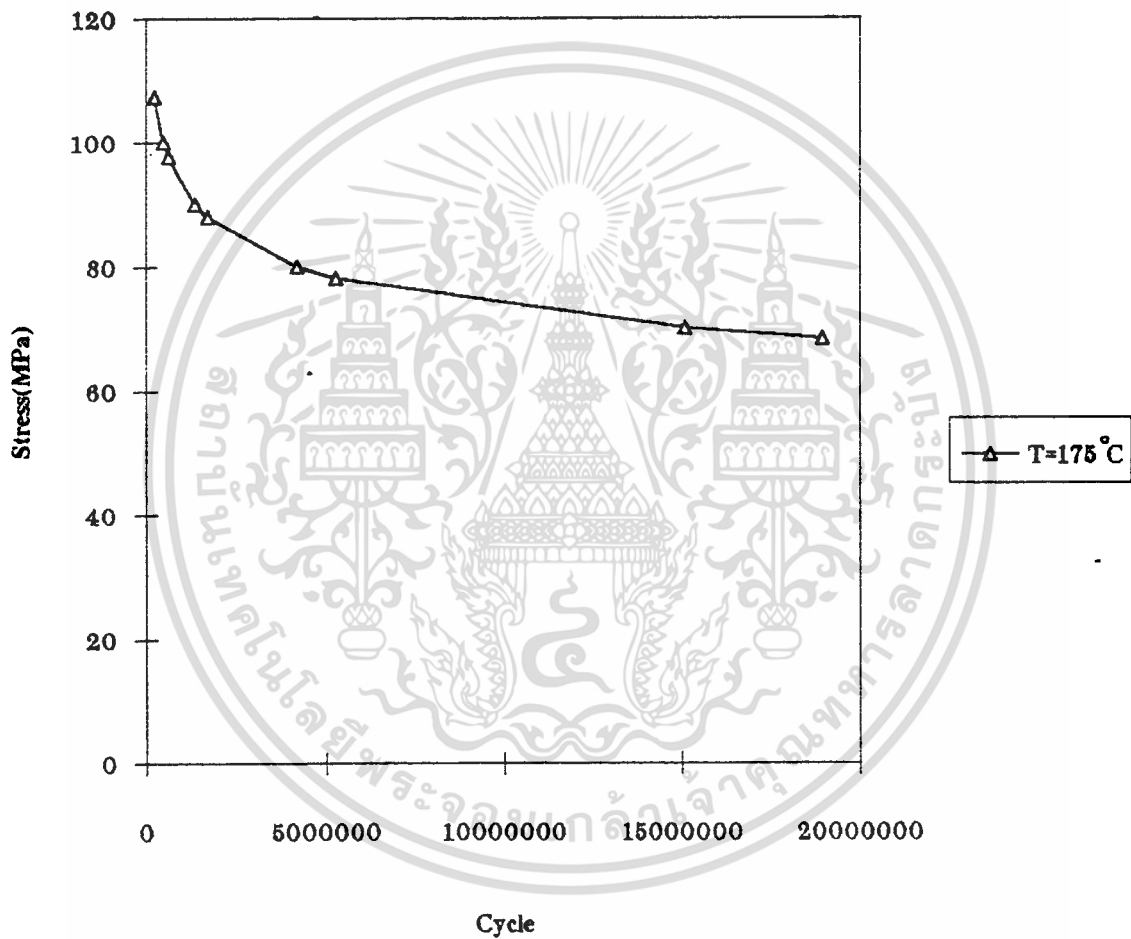
Regression Graph for Temperature 150 celcius



รูปที่ 21 กราฟของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

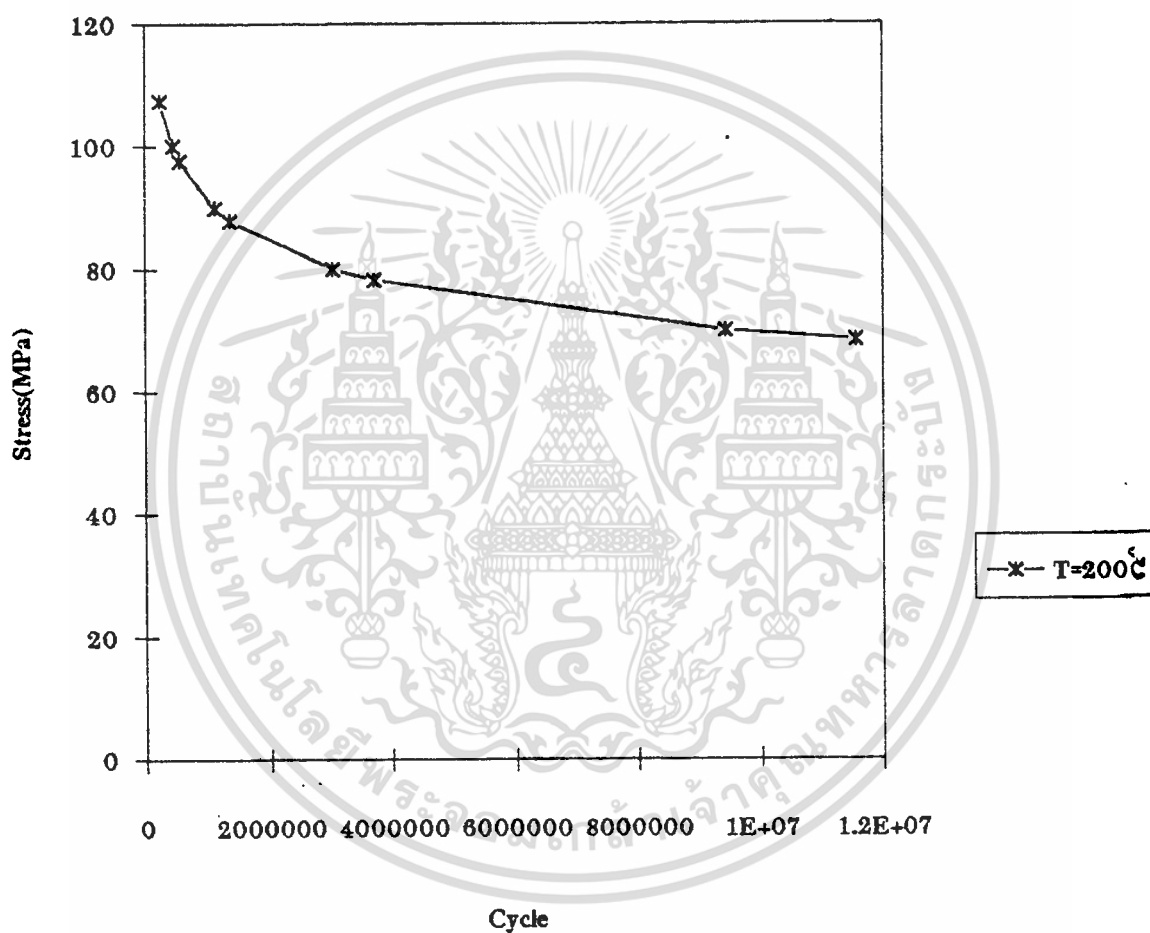
Regression Graph for Temperature 175 celcius



รูปที่ 22 กราฟของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 175 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

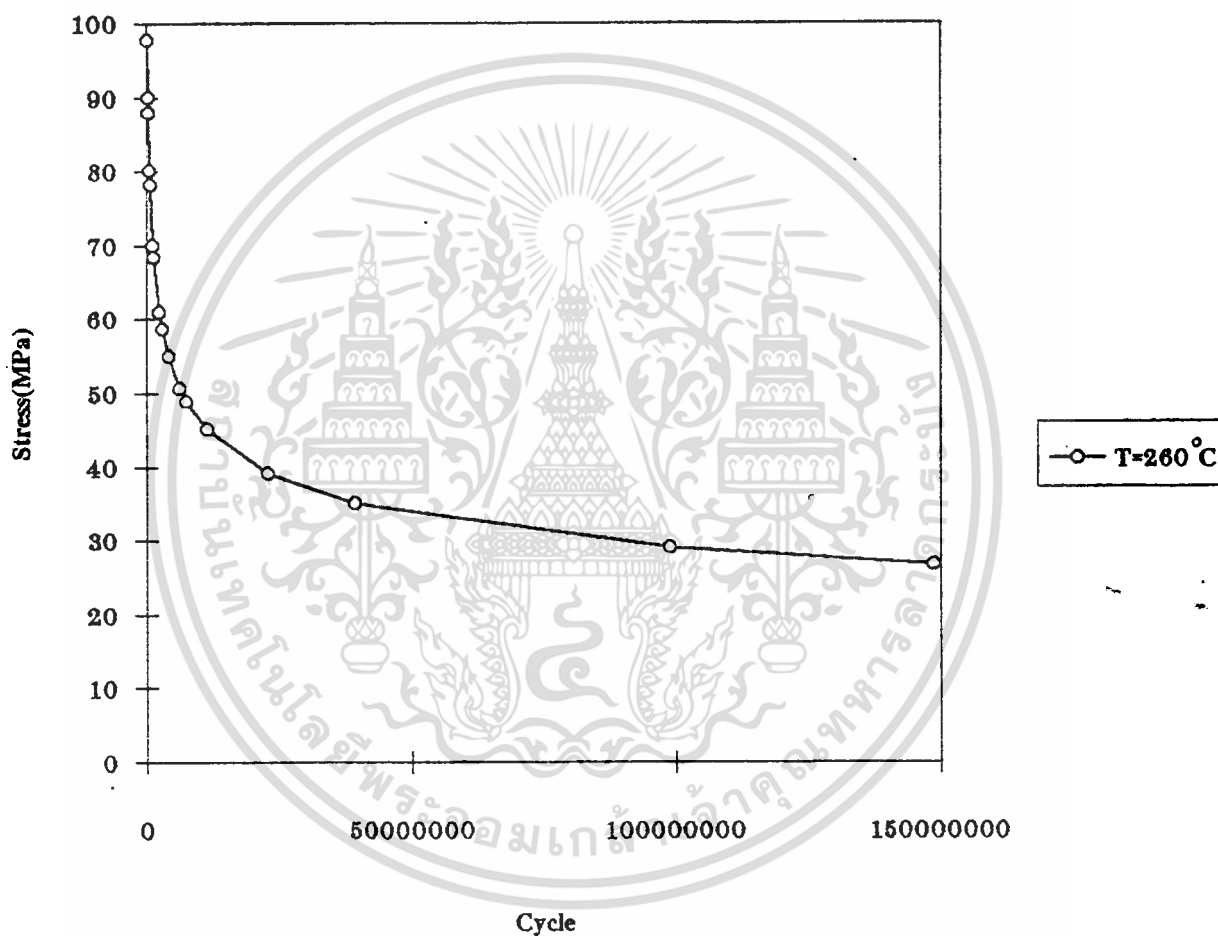
Regression Graph for Temperature 200 celcius



รูปที่ 23 กราฟของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 200 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

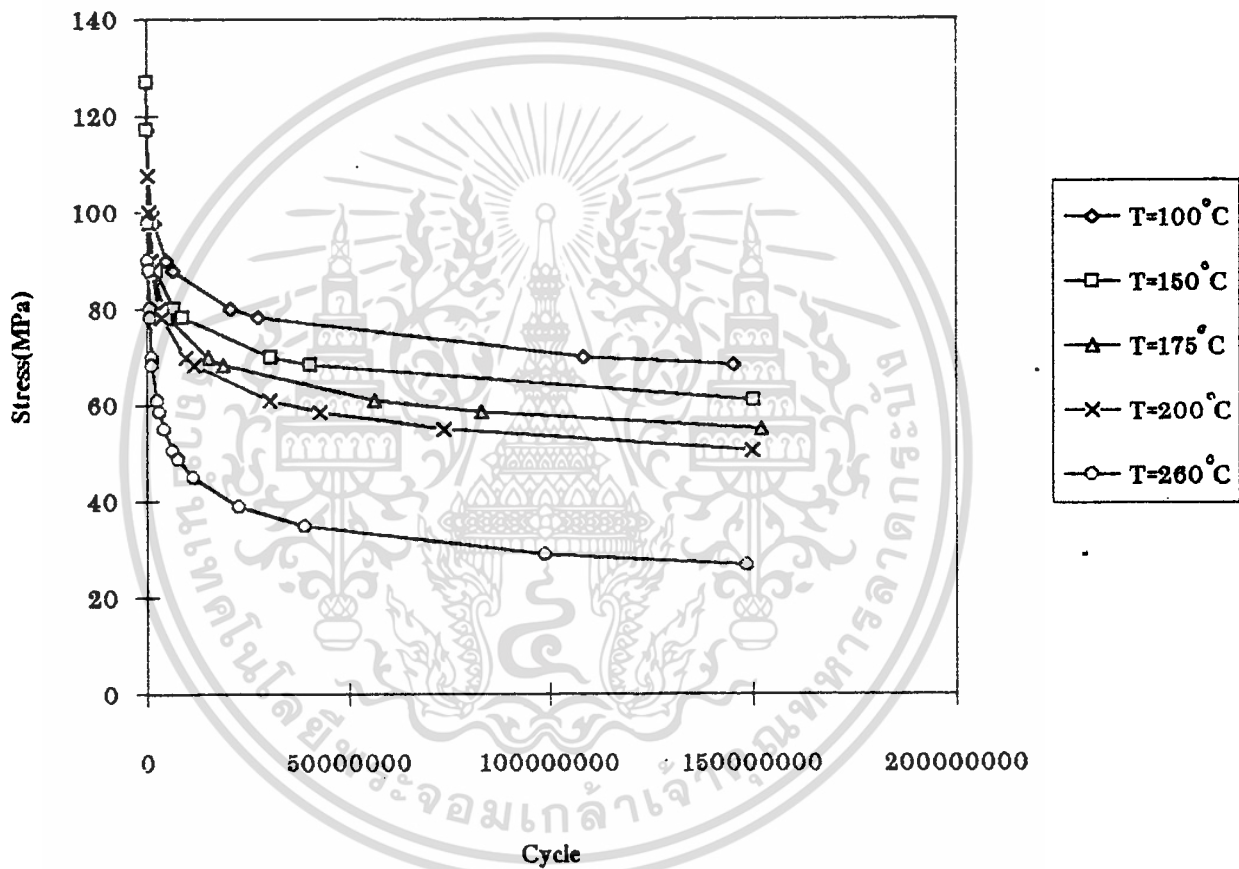
Regression Graph for Temperature 260 celcius



รูปที่ 24 กราฟของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 260 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

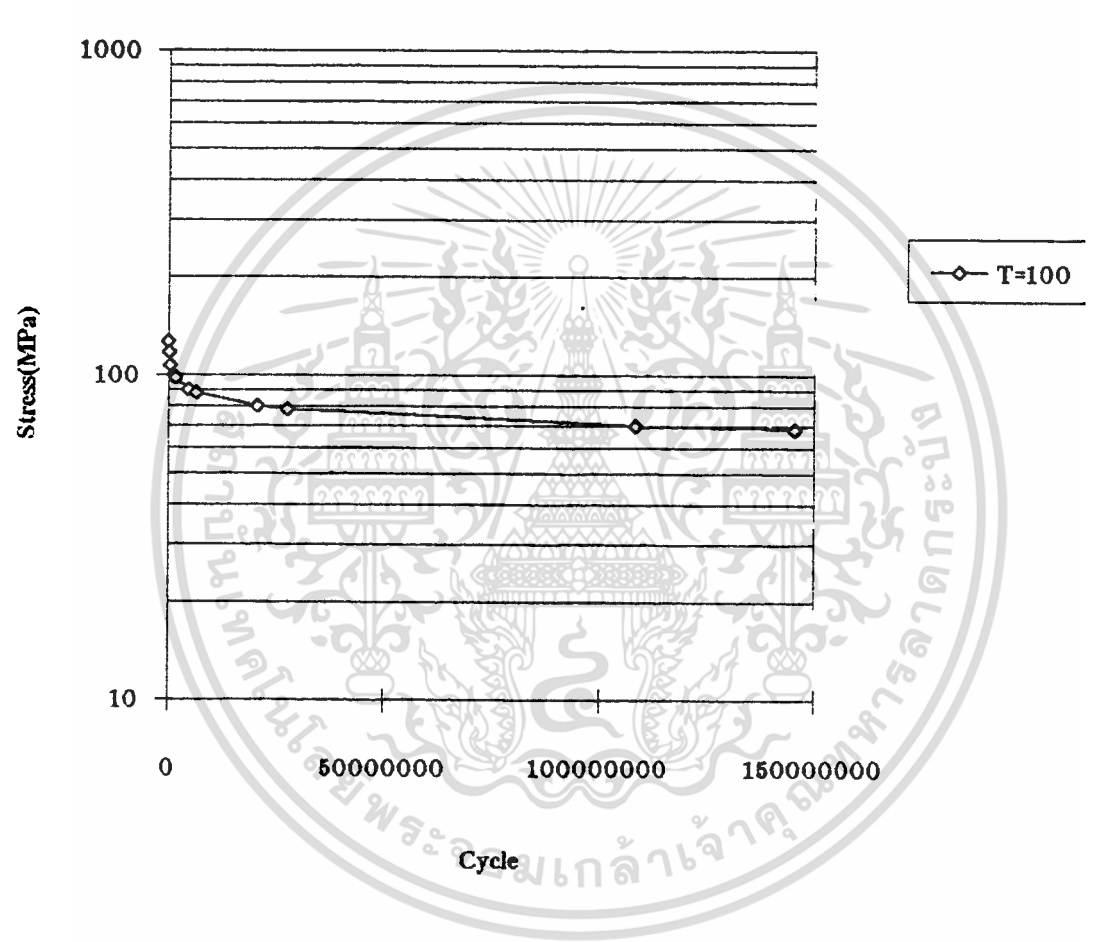
Comparison for different temperature



รูปที่ 25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของผลการทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

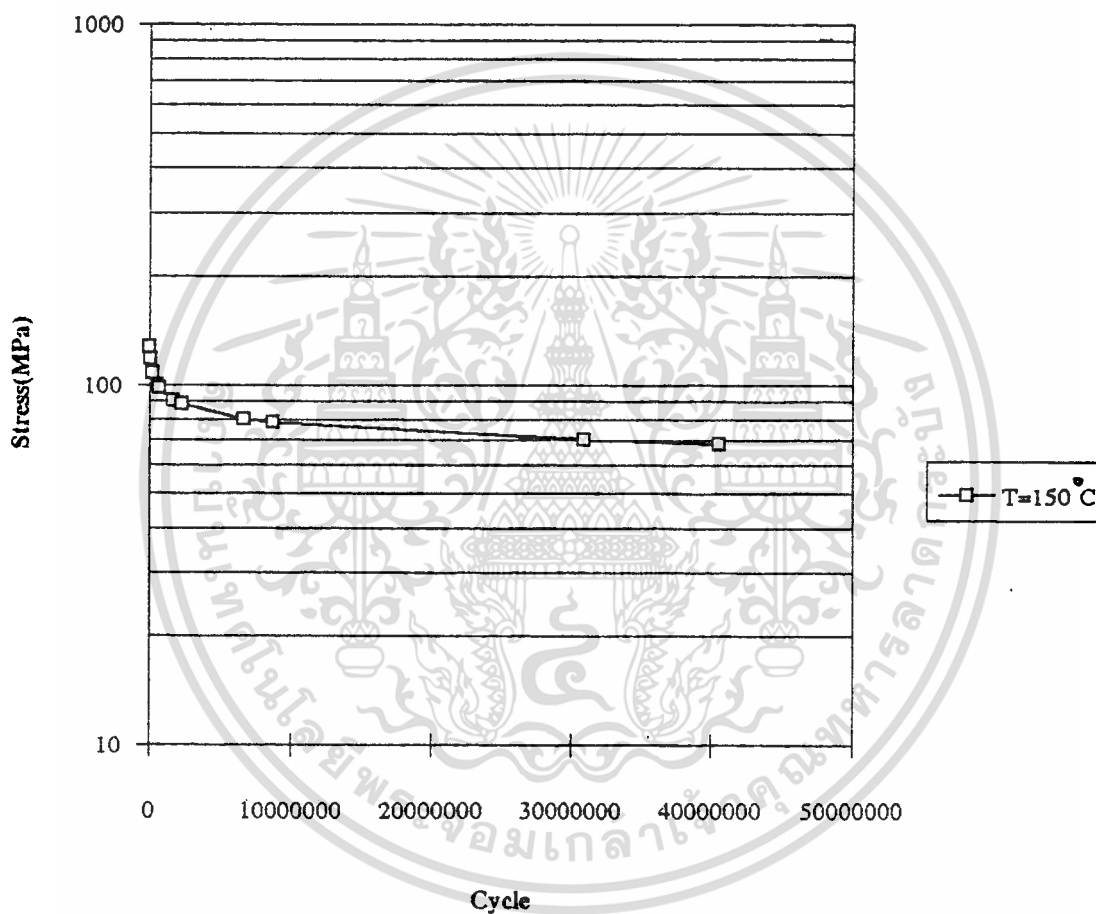
Regression Graph for Temperature 100 celcius



รูปที่ 26 กราฟ semi-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

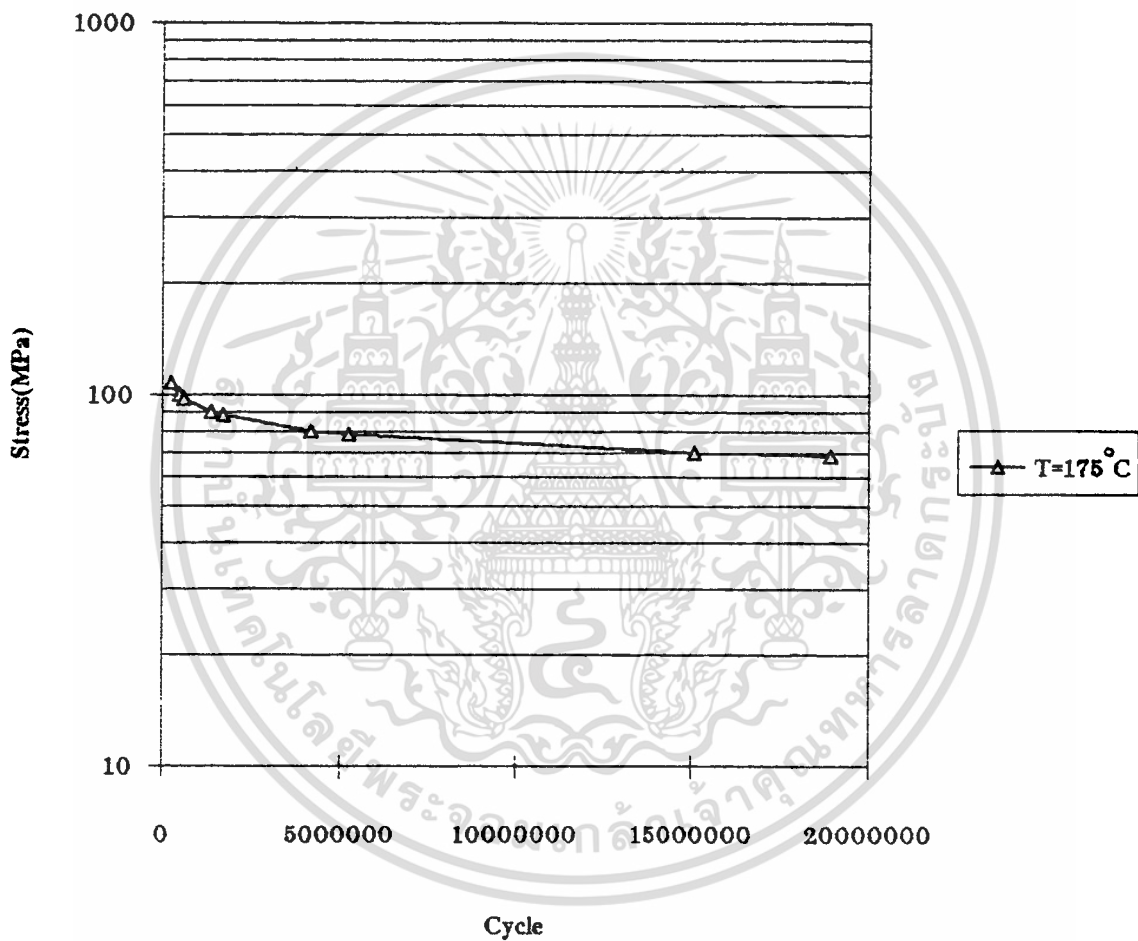
Regression Graph for Temperature 150 celcius



รูปที่ 27 กราฟ semi-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

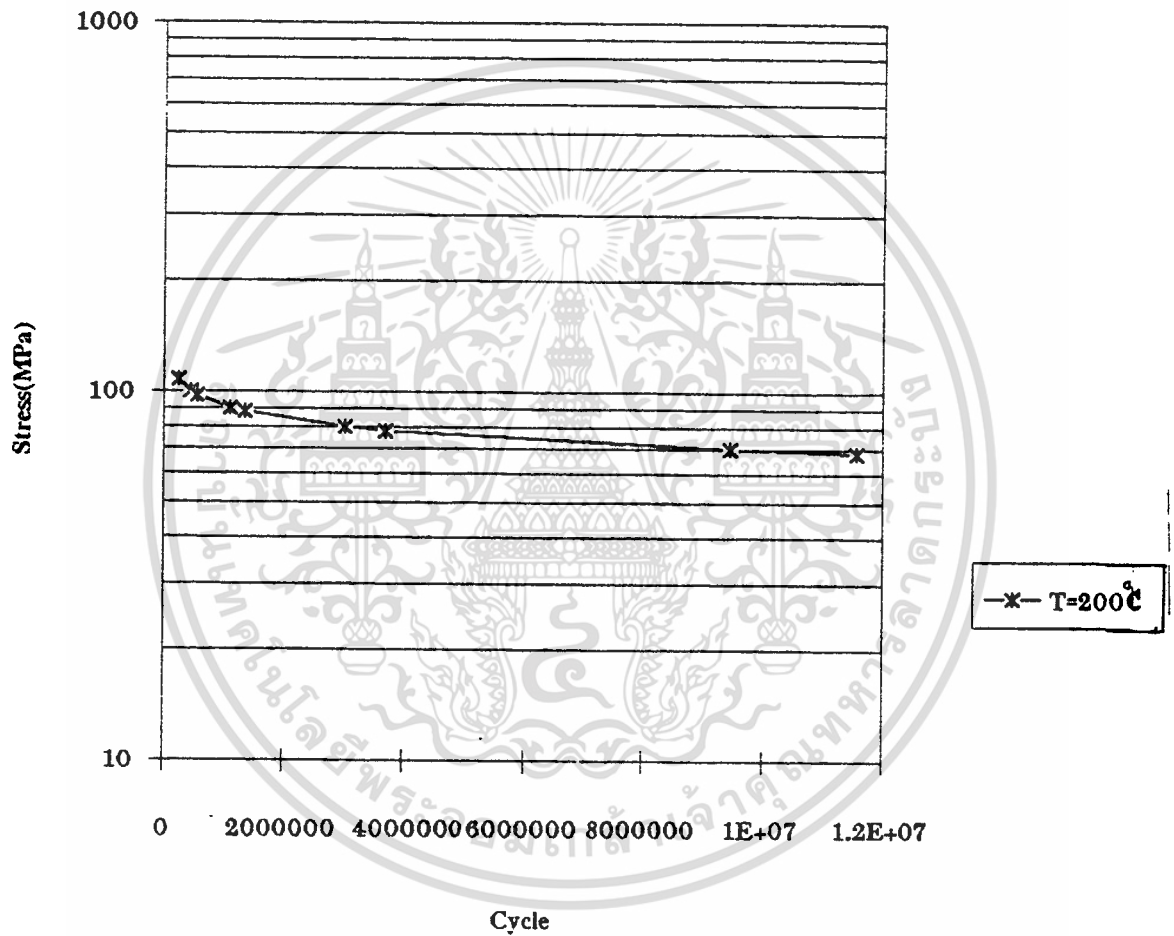
Regression Graph for Temperature 175 celcius



รูปที่ 28 กราฟ semi-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 175 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

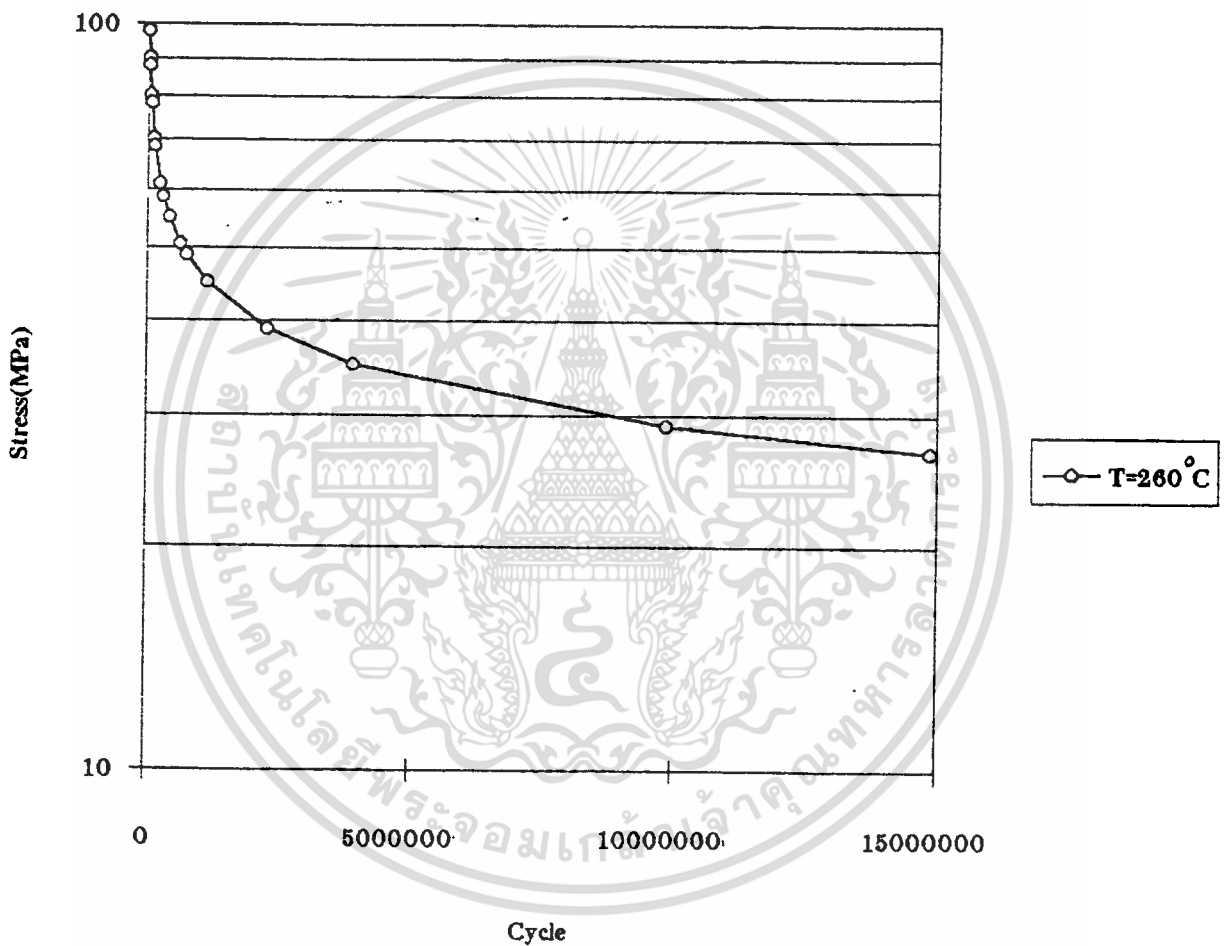
Regression Graph for Temperature 200 celcius



รูปที่ 29 กราฟ semi-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 200 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

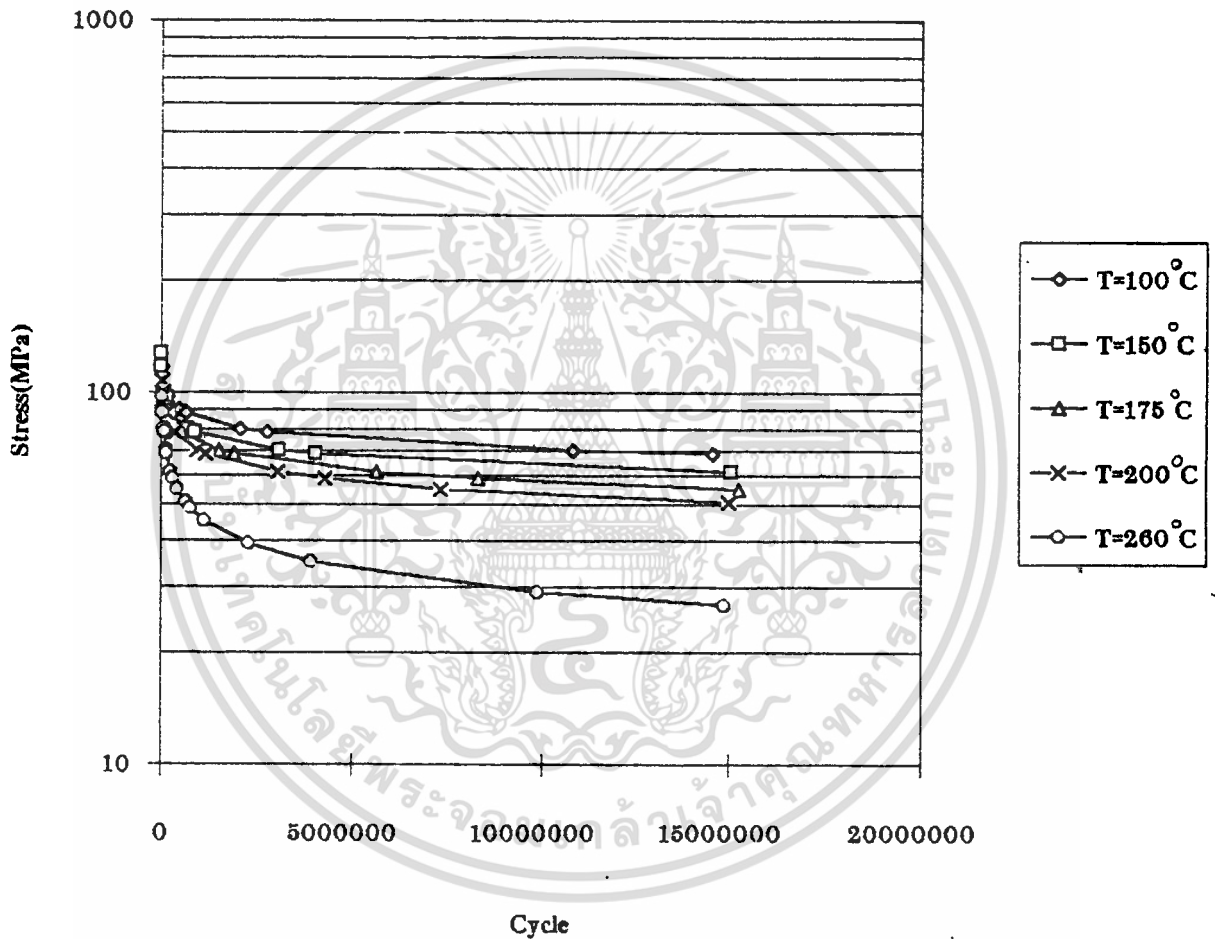
Regression Graph for Temperature 260 celcius



รูปที่ 30 กราฟ semi-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 260 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

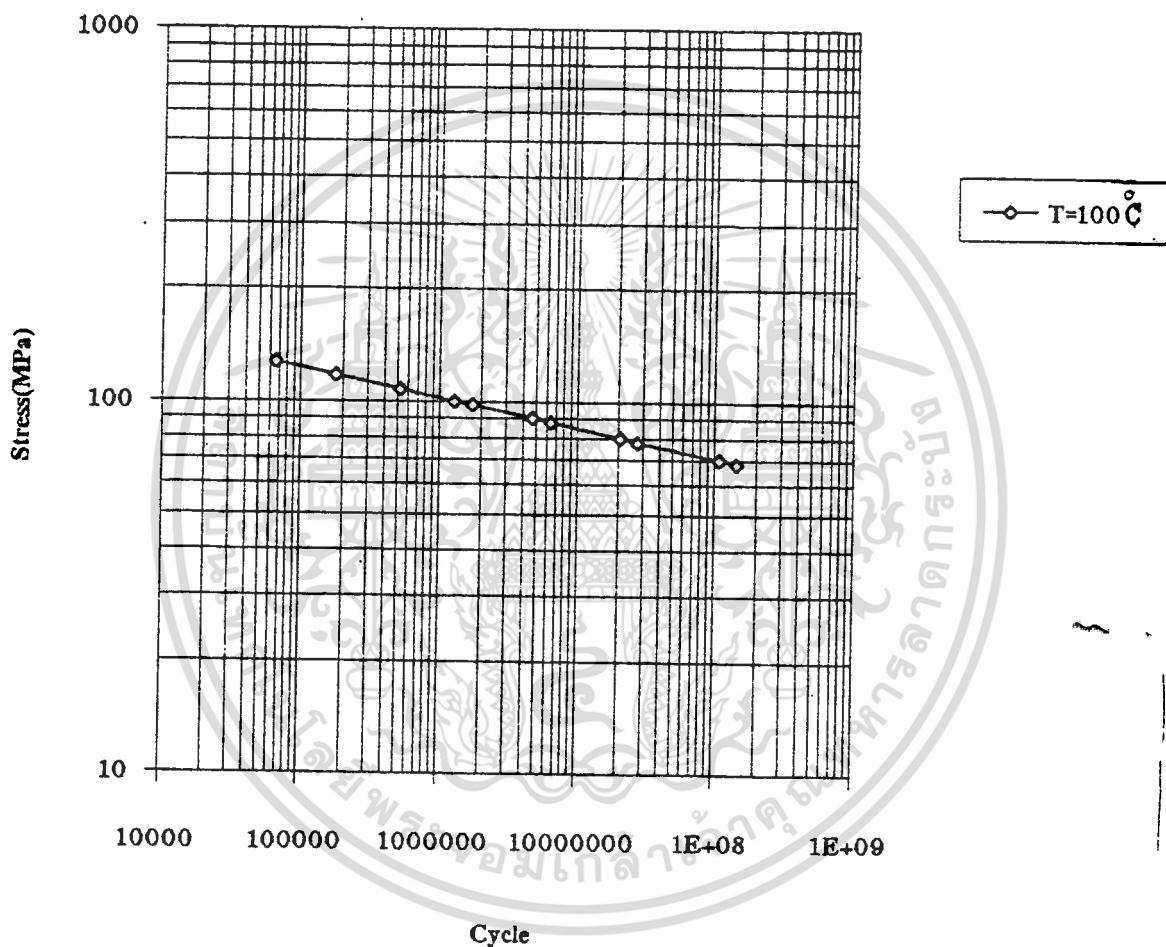
Comparison for different temperature



รูปที่ 31 กราฟ semi-log แสดงการเปรียบเทียบของผลการทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

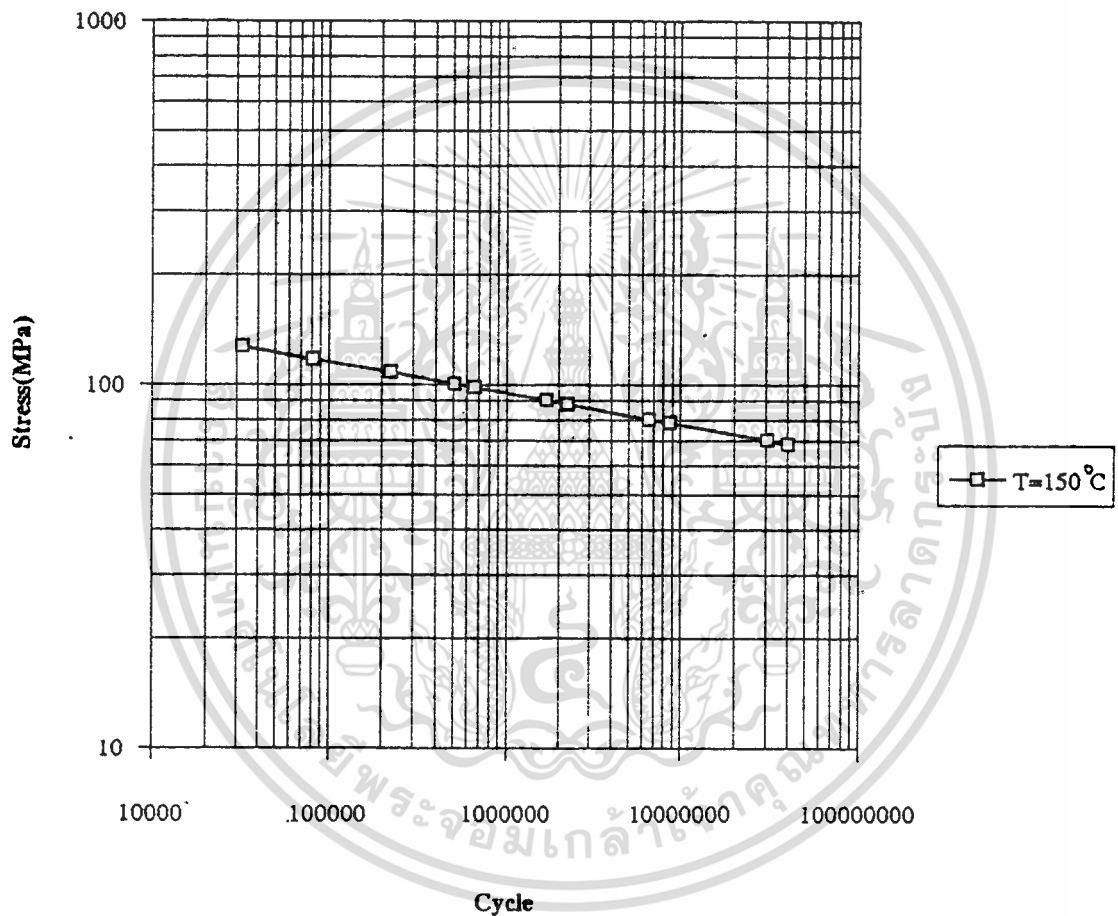
Regression Graph for Temperature 100 celcius



รูปที่ 32 กราฟ full-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

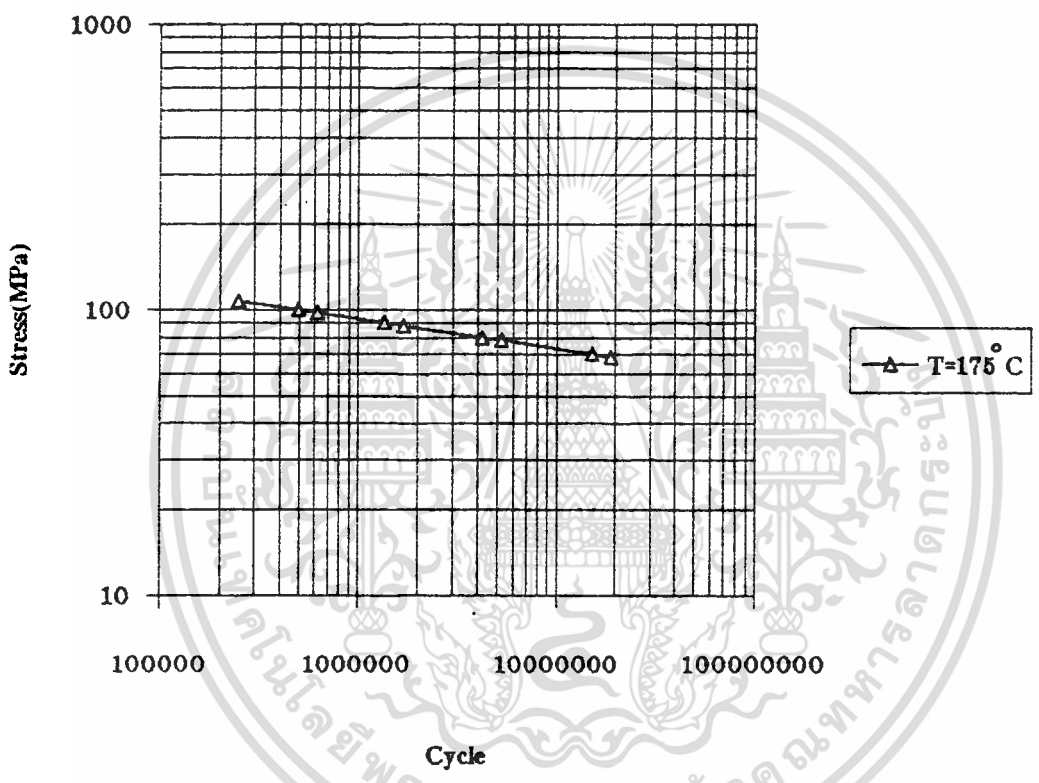
Regression Graph for Temperature 150 celcius



รูปที่ 38 กราฟ full-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

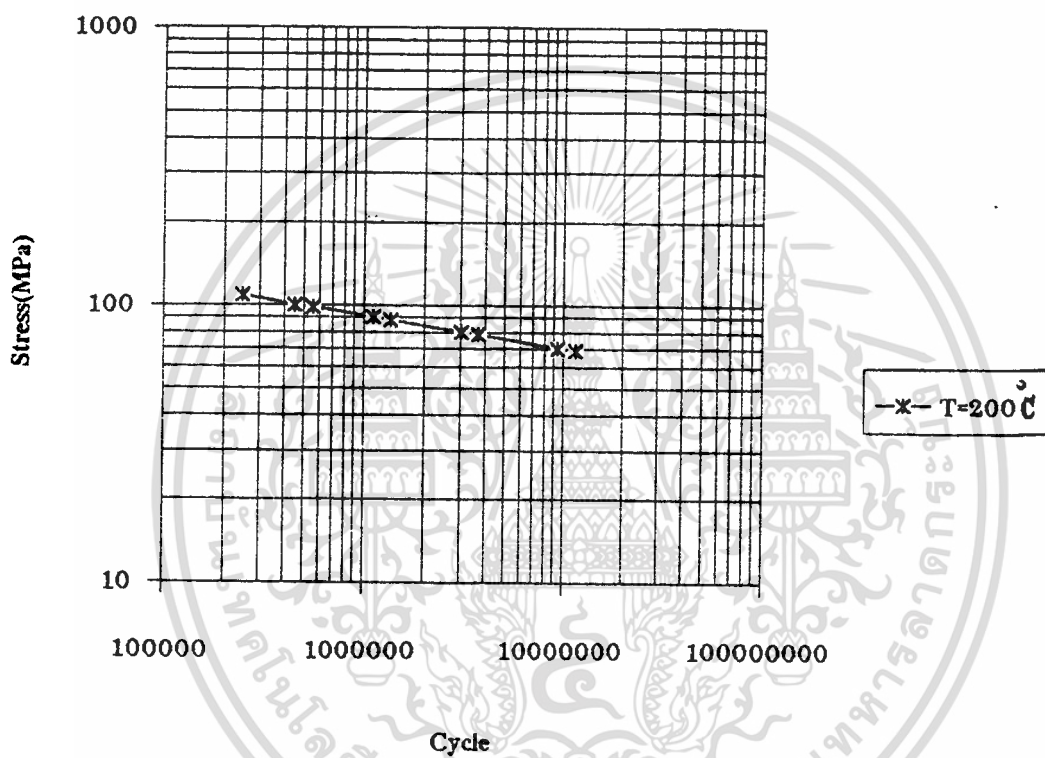
Regression Graph for Temperature 175 celcius



รูปที่ 34 กราฟ full-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 175 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

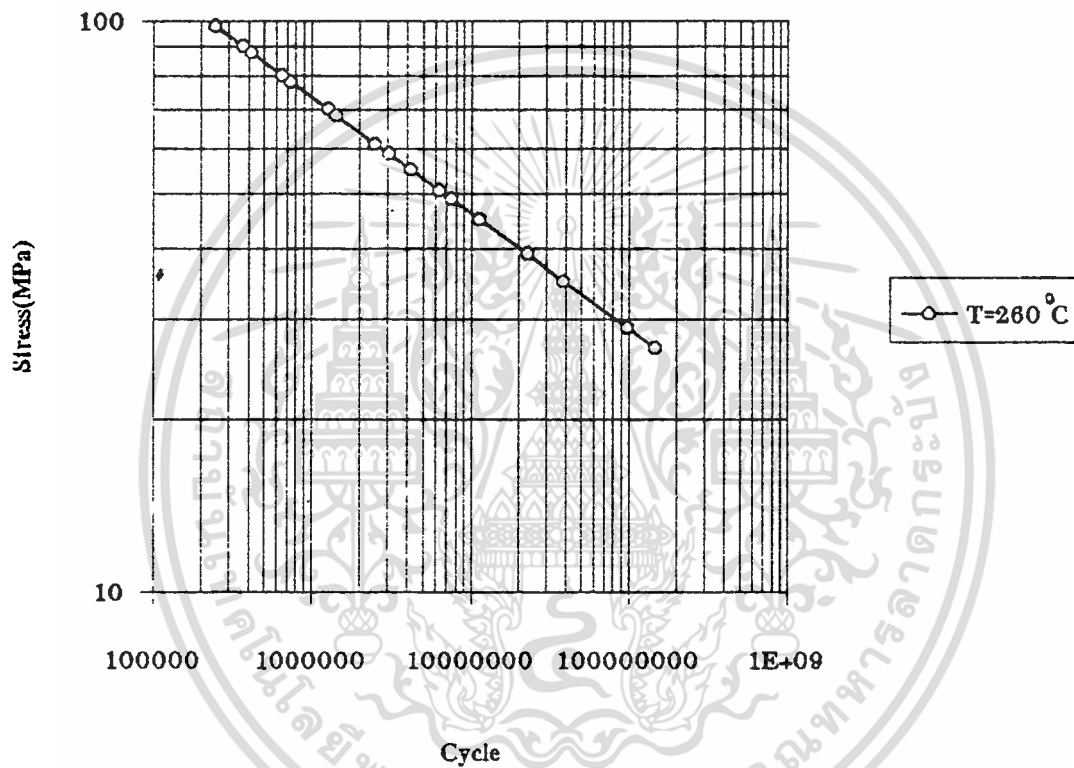
Regression Graph for Temperature 200 celcius



รูปที่ 35 กราฟ full-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 200 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

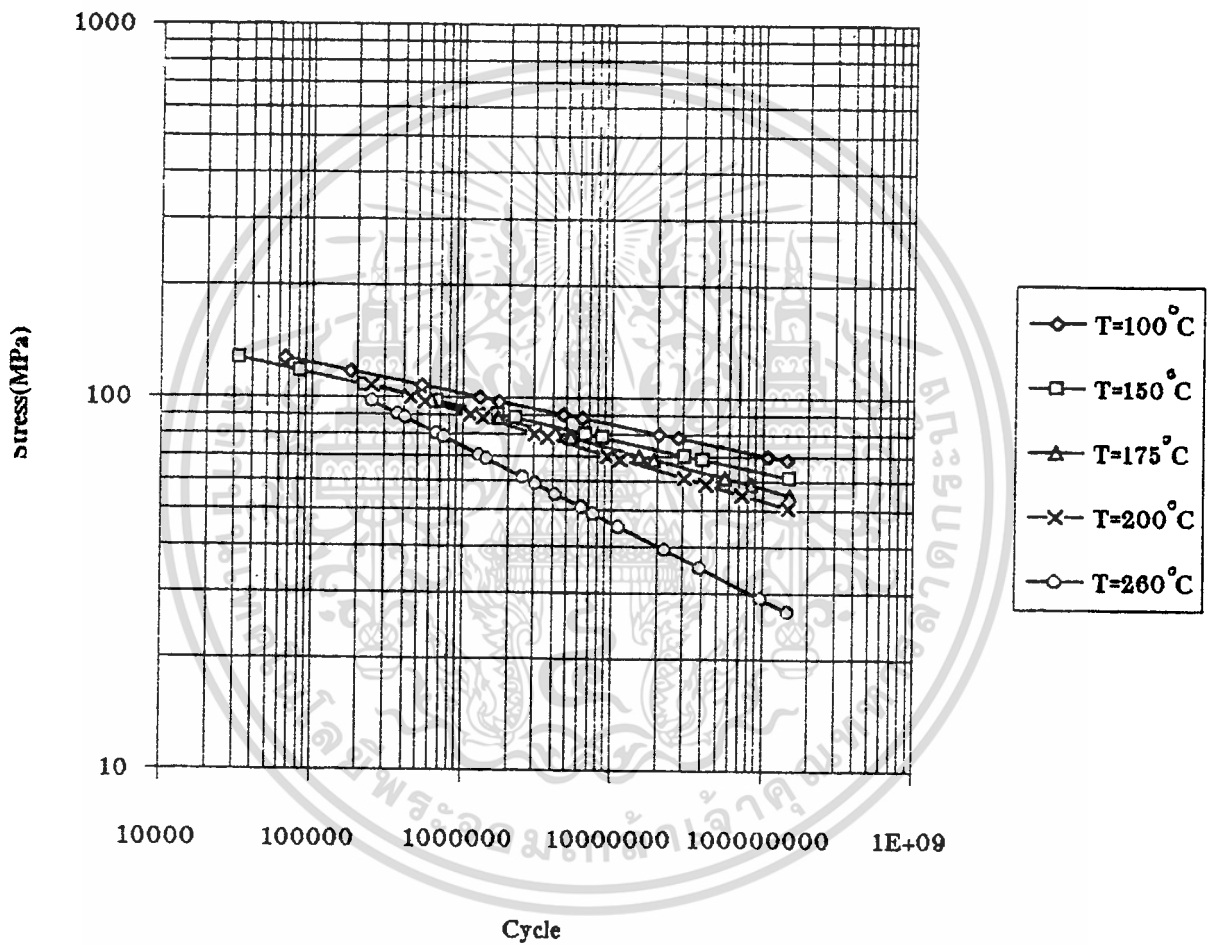
Regression Graph for Temperature 260 celcius



รูปที่ 38 กราฟ full-log ของการทดสอบที่ อุณหภูมิ 260 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison for different temperature



รูปที่ 37 กราฟ full-log แสดงการเปรียบเทียบของผลการทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature กับ Stress ที่ 10 ล้านรอบ โดยใช้ข้อมูล สำหรับแต่ละ อุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 5 อุณหภูมิ ดังนี้คือ

$$\text{ที่ } T = 100^{\circ}\text{C} \text{ ได้ค่า Stress} = 84.792 \text{ MPa}$$

$$T = 150^{\circ}\text{C} \text{ ได้ค่า Stress} = 77.216 \text{ MPa}$$

$$T = 175^{\circ}\text{C} \text{ ได้ค่า Stress} = 73.074 \text{ MPa}$$

$$T = 200^{\circ}\text{C} \text{ ได้ค่า Stress} = 69.542 \text{ MPa}$$

$$T = 260^{\circ}\text{C} \text{ ได้ค่า Stress} = 46.173 \text{ MPa}$$

จากสมการโพลิโนเมียล

$$S = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots + a_nT^n$$

จะได้

$$84.792 = a_0 + 100a_1 + 100^2a_2 + 100^3a_3 + 100^4a_4$$

$$77.216 = a_0 + 150a_1 + 150^2a_2 + 150^3a_3 + 150^4a_4$$

$$73.074 = a_0 + 175a_1 + 175^2a_2 + 175^3a_3 + 175^4a_4$$

$$69.542 = a_0 + 200a_1 + 200^2a_2 + 200^3a_3 + 200^4a_4$$

$$46.173 = a_0 + 260a_1 + 260^2a_2 + 260^3a_3 + 260^4a_4$$

นำมาเขียนเป็นรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} 1 & 100 & 100^2 & 100^3 & 100^4 \\ 1 & 150 & 150^2 & 150^3 & 150^4 \\ 1 & 175 & 175^2 & 175^3 & 175^4 \\ 1 & 200 & 200^2 & 200^3 & 200^4 \\ 1 & 260 & 260^2 & 260^3 & 260^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 84.792 \\ 77.216 \\ 73.074 \\ 69.542 \\ 46.173 \end{bmatrix}$$

จากการแก้สมการเมทริกซ์จะได้

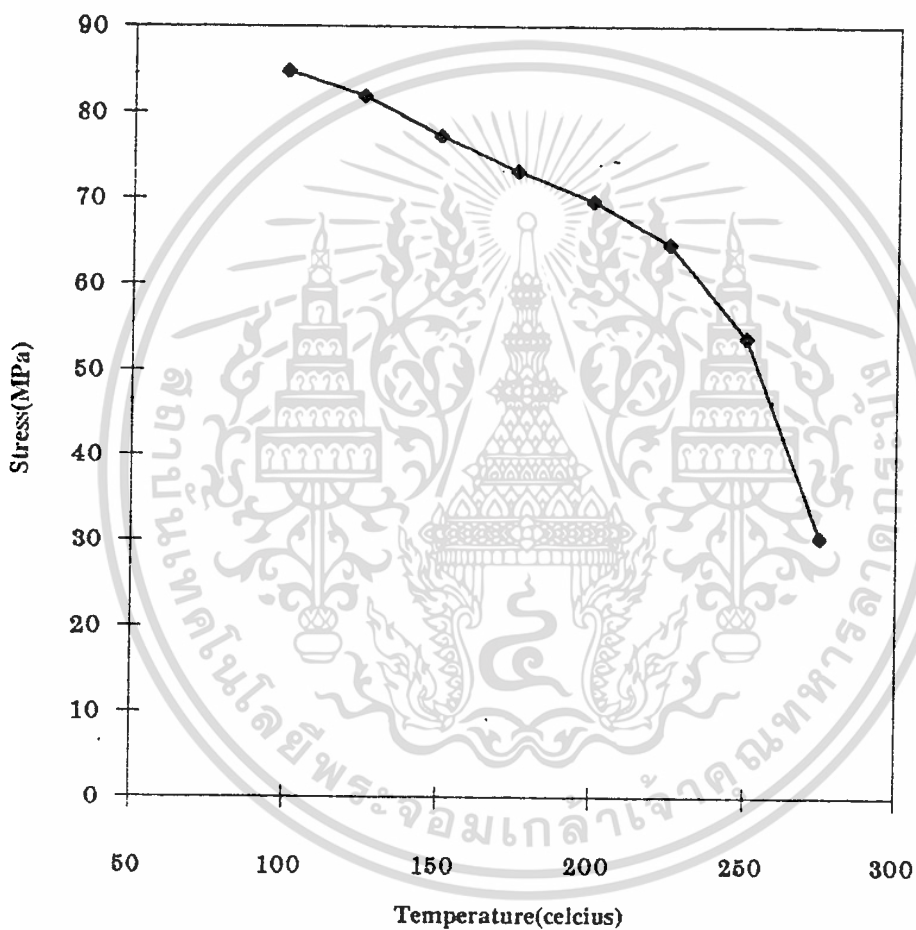
$$a_0 = -44.52176 \quad a_1 = 3.684917 \quad a_2 = -0.03698137 \quad a_3 = 1.5423 \cdot 10^{-4} \quad a_4 = -2.35938 \cdot 10^{-7}$$

ดังนั้นจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Temperature ดังนี้

$$S = -44.52176 + 3.684917T - 0.03698137T^2 + 1.5423 \cdot 10^{-4}T^3 - 2.359 \cdot 10^{-7}T^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Graph at 10,000,000 cycle



$$S = -44.52176 + 3.684917T - 0.03698137T^2 + 1.5423 \cdot 10^{-4}T^3 - 2.359 \cdot 10^{-7}T^4$$

รูปที่ 38 กราฟแสดงค่า Fatigue limit ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

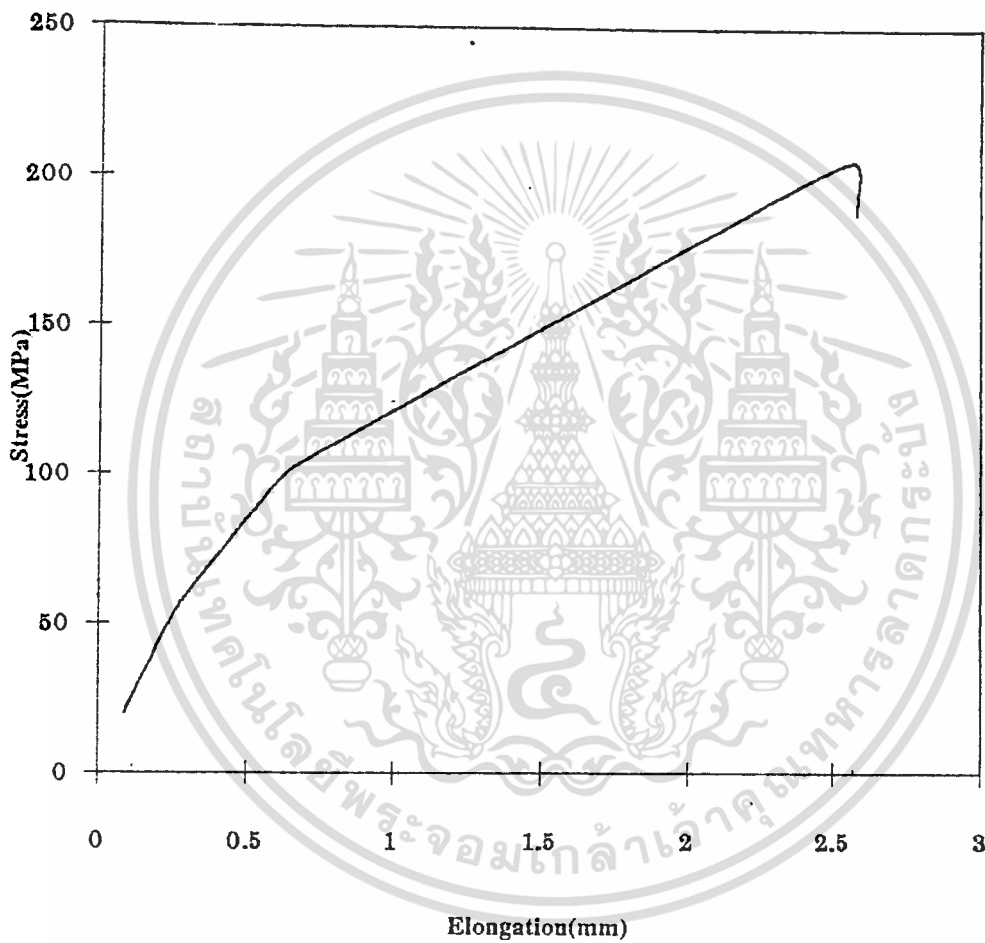
การทดสอบแรงดึง (tensile testing)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงพื้นฐานของวัสดุ วิธีการทดสอบคือนำชิ้นงานมาผ่านการกลึงด้วยเครื่อง CNC ให้ได้ขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด จากนั้นนำมาประกอบเข้ากับตัวเครื่องทดสอบ โดยเลือกใช้หัวจับแบบดึง (tensile) กำหนดค่าสภาวะต่าง ๆ ในการทดลองดังนี้

1. TEST MODE	SINGLE TENSION
2. TEST SPEED	5.000 MM/MIN (1/1)
3. TRAVERSE SPEED	500.00 MM/MIN
4. RETURN POSITION	100.00 MM
5.	STOP
6. RECORDER MODE	X-P
7. X-AXIS	LOAD
8. LOAD CELL	10000 KGF
9. F/S LOAD	2000.0 (*5) KGF
10. CHART RATIO	10.000
11. CHART MODE	FORWARD UP CONNECT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

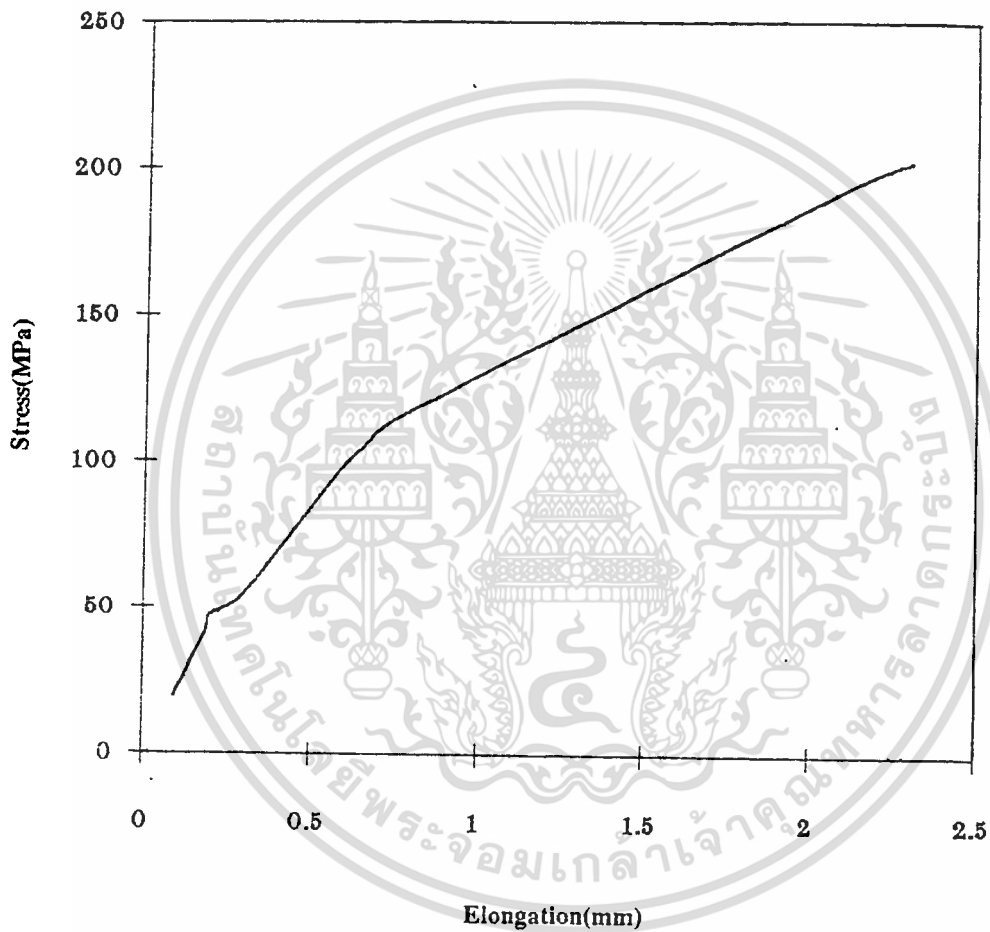
Tensile test Sample 1



รูปที่ ๘๑ กราฟแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

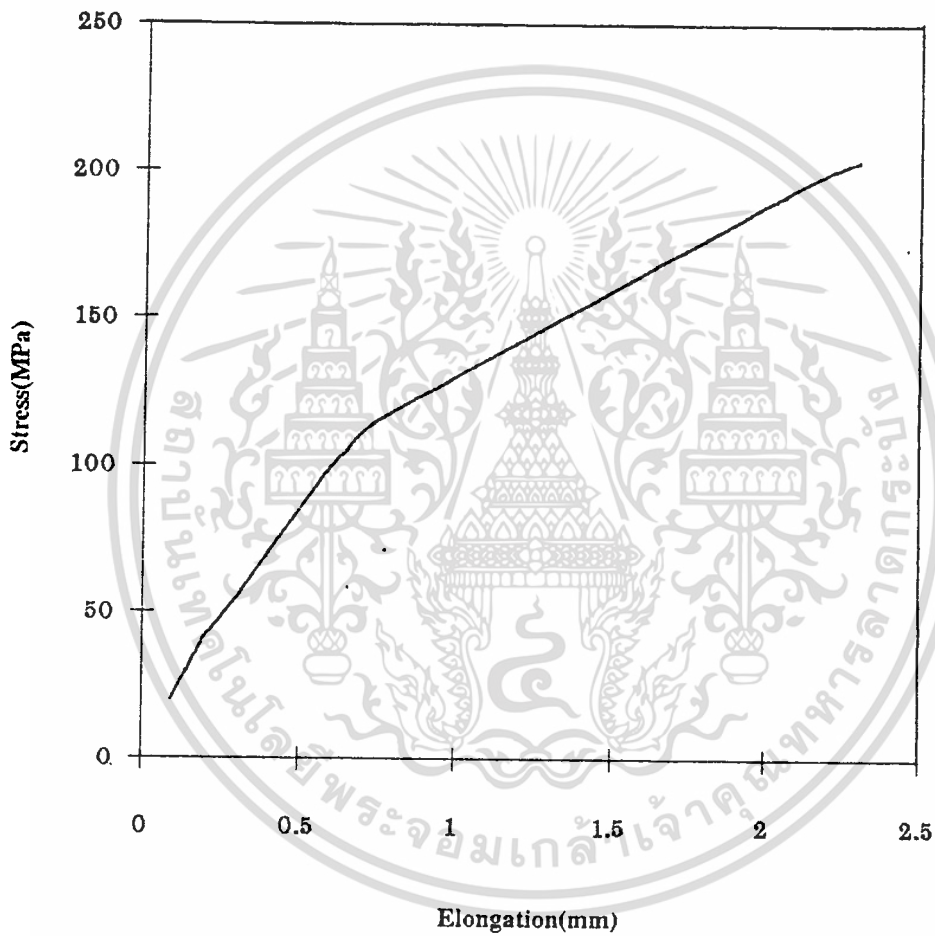
Tensile test Sample 2



รูปที่ 40 กราฟแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tensile test Sample 3



รูปที่ 41 กราฟแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบโครงสร้าง

เพื่อตรวจสอบโครงสร้างอย่างคร่าว ๆ ของชิ้นงานที่ผ่านการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยในการตรวจสอบ จะมีวิธีการเตรียมชิ้นงานและวิธีการตรวจสอบดังนี้

1. สุ่มเลือกงาน โดยจัดแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้

- 1.1 ชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 °C
- 1.3 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 °C
- 1.4 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 175 °C
- 1.5 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 200 °C
- 1.6 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 260 °C

โดยในแต่ละกลุ่มจะเตรียมชิ้นงาน โดยแบ่งออกเป็น

- ชิ้นงานตามขวาง
- ชิ้นงานตามยาว

2. นำชิ้นงานดังกล่าวผ่านเข้าเครื่องอัดเรซิน

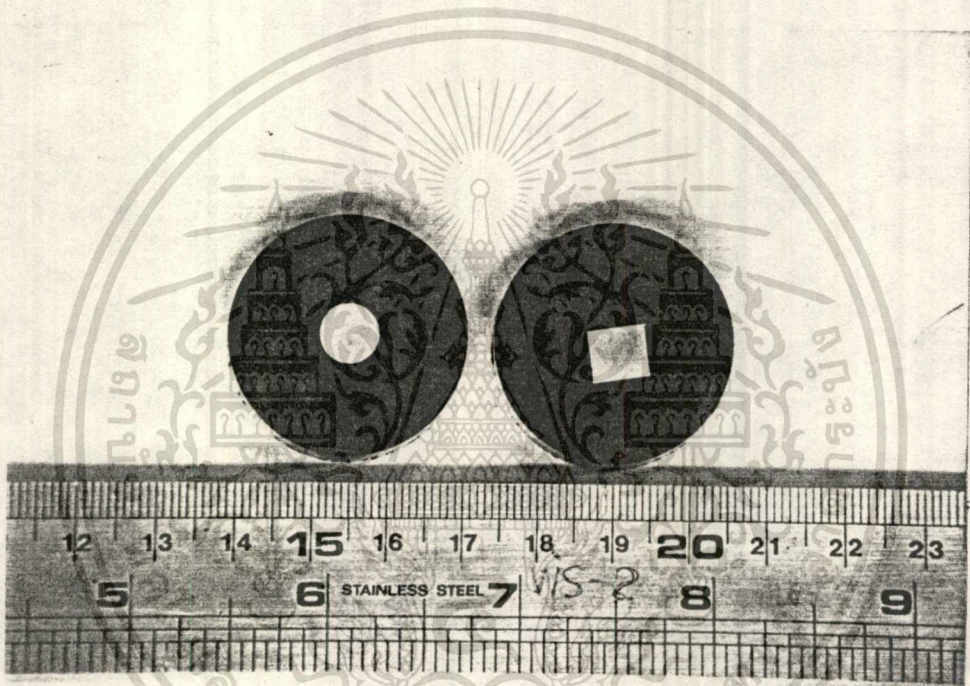
3. นำชิ้นงานในข้อที่ 2 ผ่านเข้าเครื่องขัดตั้งรูป ซึ่งมีขั้นตอนการขัดดังนี้

- 3.1 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 300 , 500 และ 800 ตามลำดับ
- 3.2 ขัดด้วยน้ำยาขัดขนาด 1.00 , 0.3 และ 0.05 ไมครอน
- 3.3 หยอดด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 10% นานประมาณ 10 วินาที จากนั้นล้างออกด้วย

น้ำสะอาด แล้วนำไปผึ่งลมให้แห้ง

4. นำชิ้นงานที่ได้มาส่องด้วยกล้อง OPTICAL MICROSCOPE

5. ถ่ายภาพโครงสร้างของชิ้นงาน



รูปที่ 42 ภาพถ่ายชิ้นงานโครงสร้างตามแนวขวาง และ ตามแนวยาว

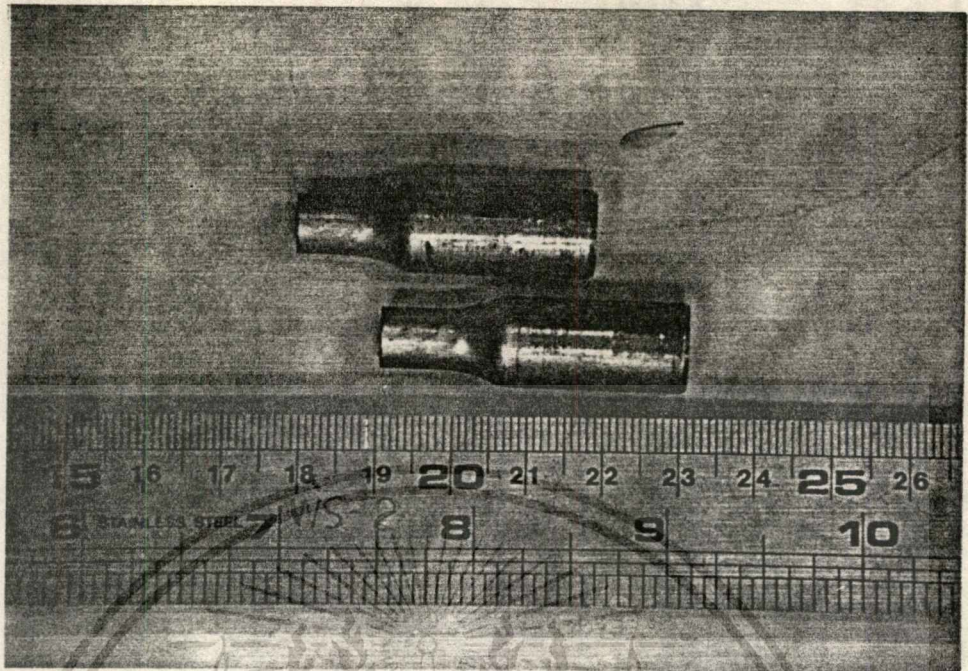
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



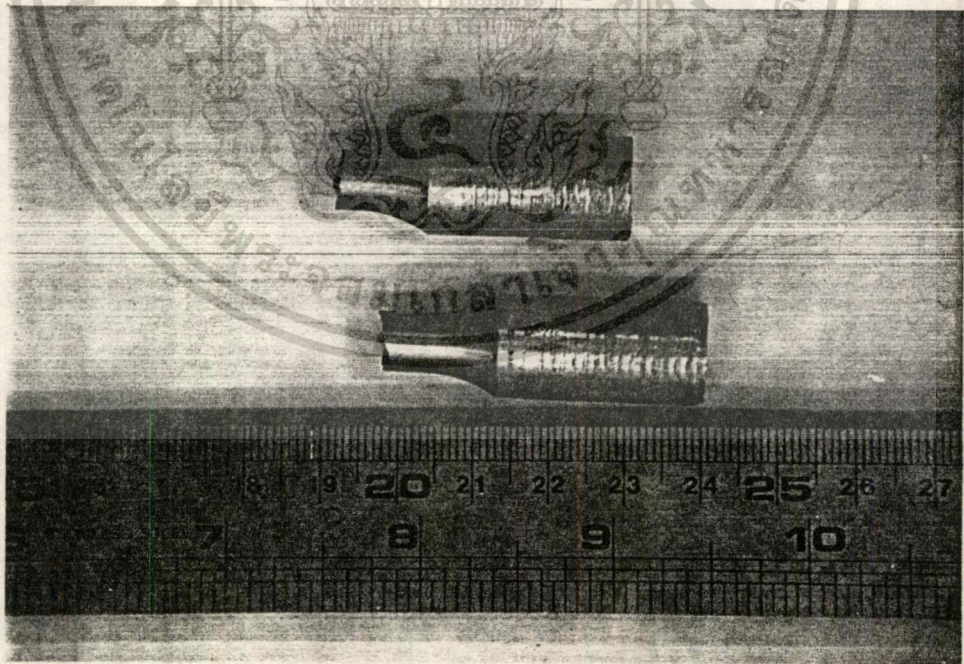
รูปที่ 43 ภาพถ่ายชิ้นงานที่นำมาใช้ทำการทดสอบการฉีก

รูปที่ 44 ภาพถ่ายชิ้นงานที่นำมาใช้ทำการทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 45 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังทำการทดสอบการดำ

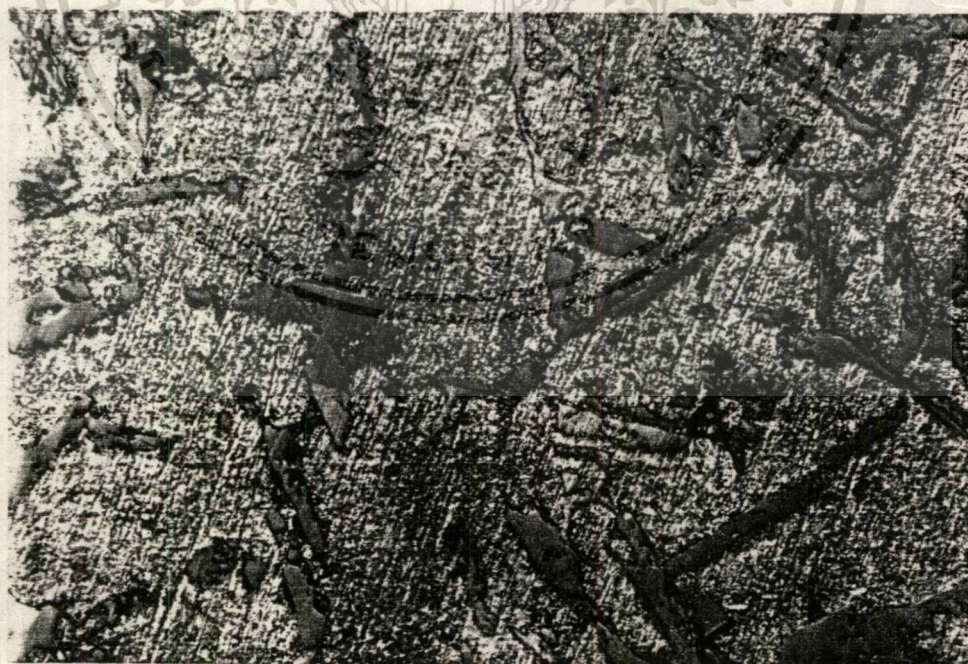


รูปที่ 46 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังทำการทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 47 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานก่อนการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา
 รูปที่ 48 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานก่อนการทดสอบ ยชนด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 49 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C

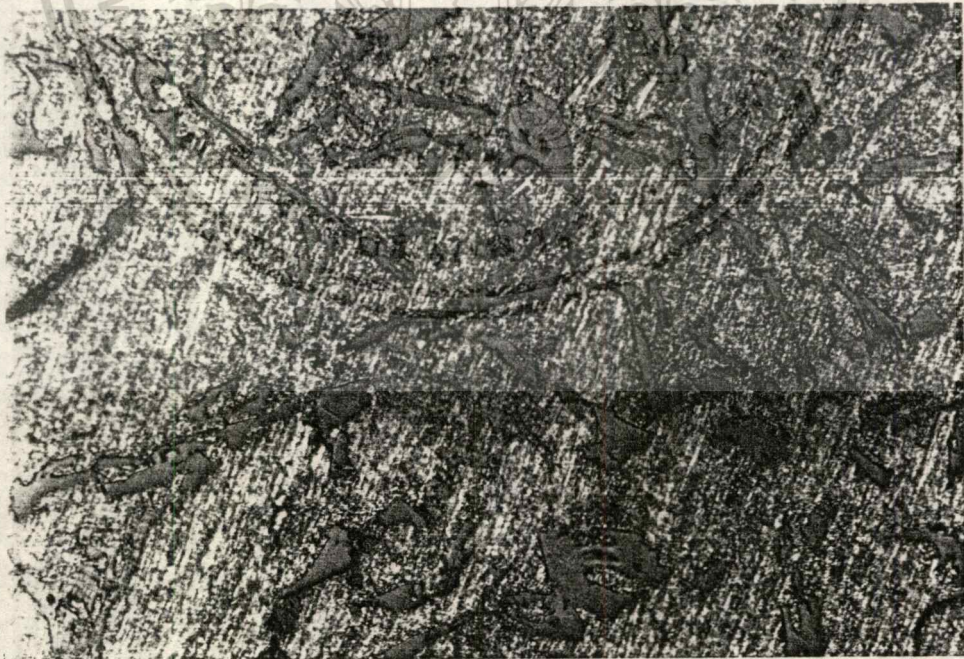


รูปที่ 50 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 51 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 52 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 °C
เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงและทรัพย์สินของกรมการช่างอากาศยาน เมื่อผู้ใดเห็นหรือได้ยินสิ่งซึ่งมีค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 53 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 175 °C



รูปที่ 54 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 175 °C
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 55 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C



รูปที่ 56 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

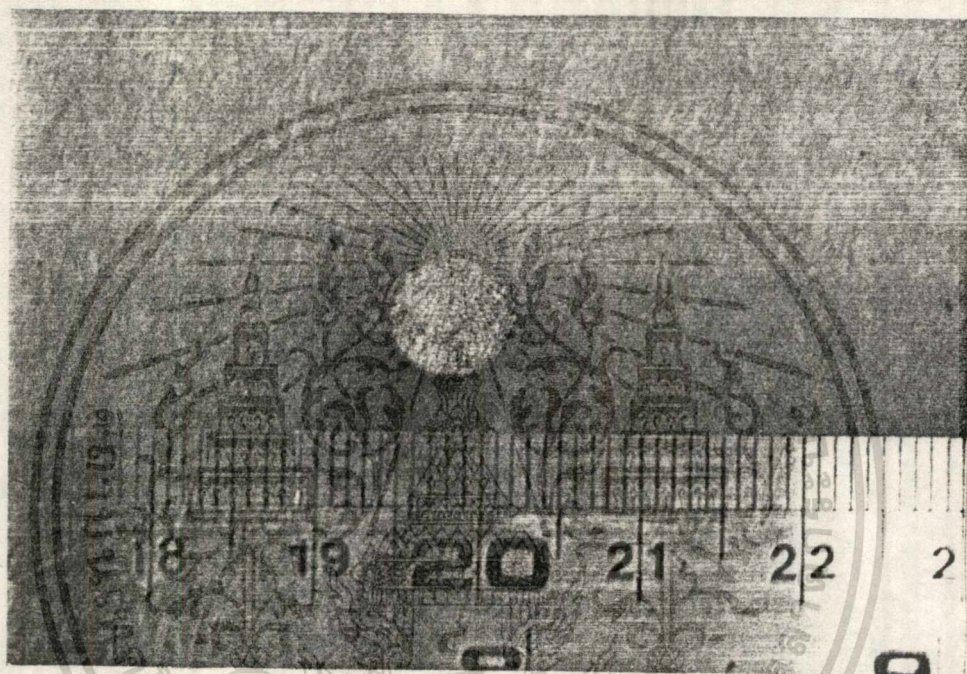


รูปที่ 57 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 260 °C



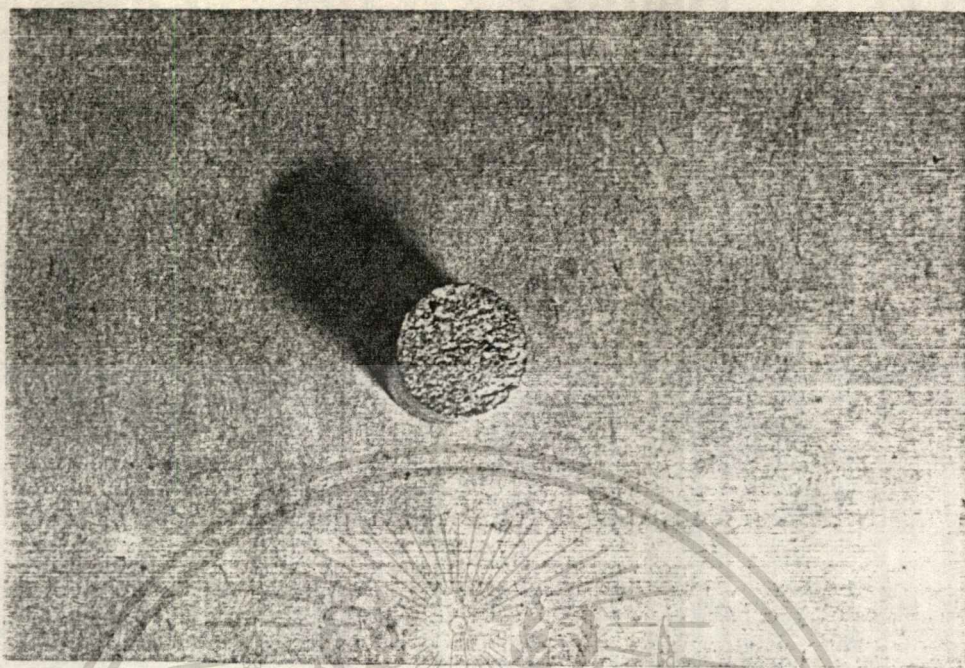
รูปที่ 58 ภาพขยายขนาด 965 เท่าของด้านตัดตามยาวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 260 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

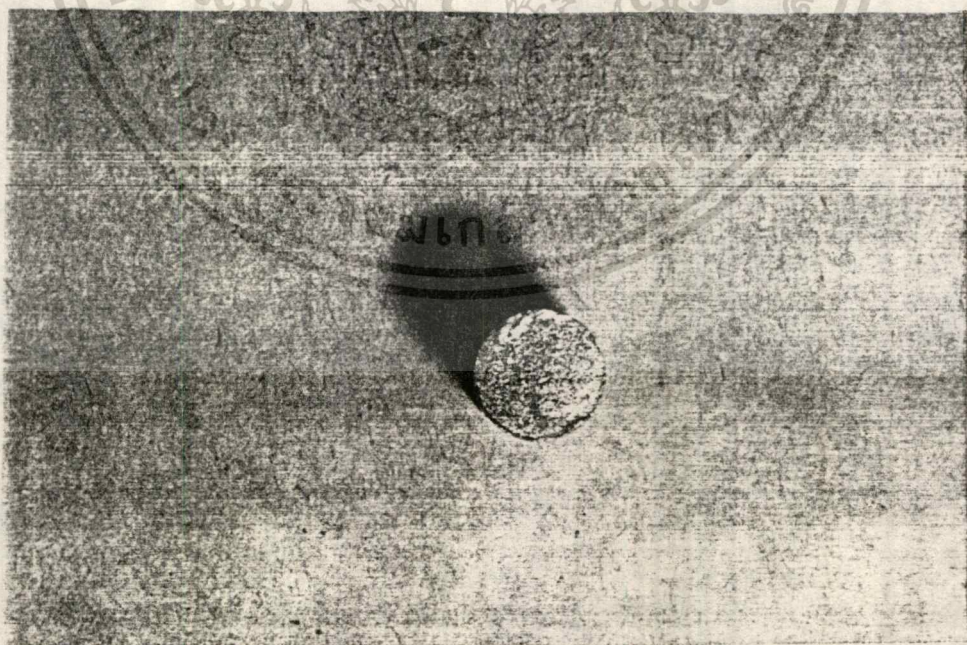


รูปที่ 59 ภาพแสดงหน้าตัดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 175 ° C เทียบเสกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



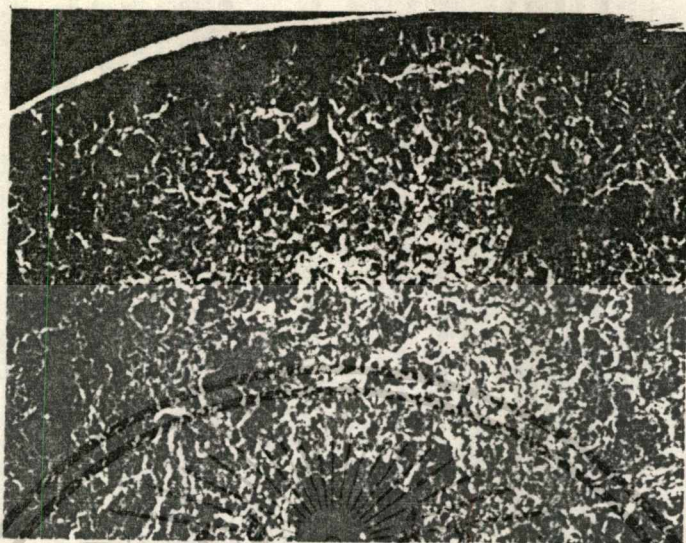
รูปที่ 60 ภาพแสดงหน้าตัดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C



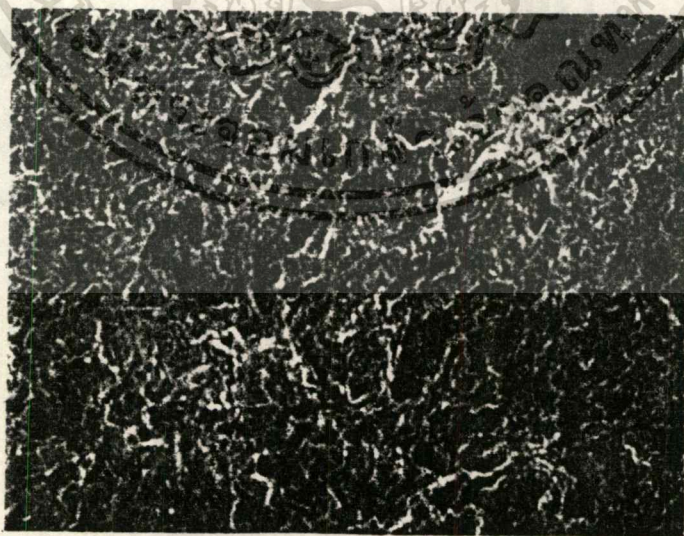
รูปที่ 61 ภาพแสดงหน้าตัดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นใบเขียวประเขณด้านกรคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงภาพขยายของหน้าตัดชิ้นงานผ่านเครื่อง Scanning

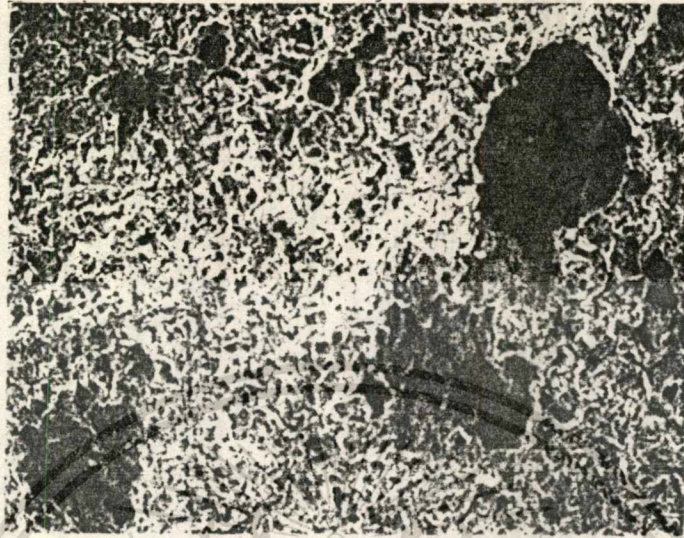


รูปที่ 62) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

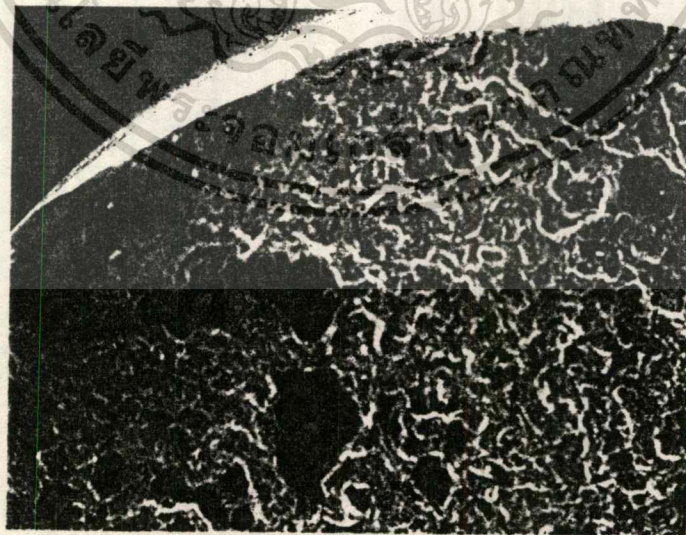


รูปที่ 63) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

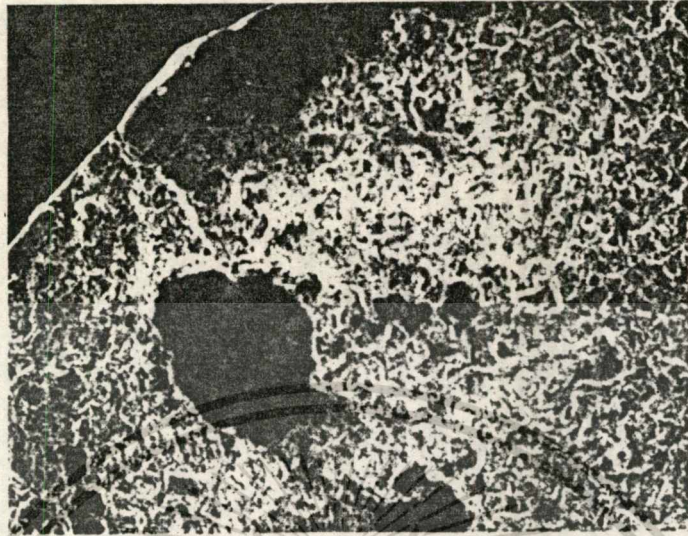


รูปที่ 64) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

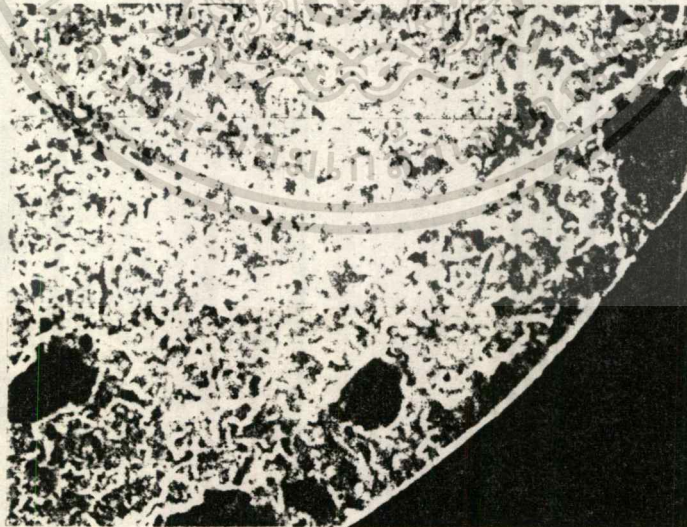


รูปที่ 65) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

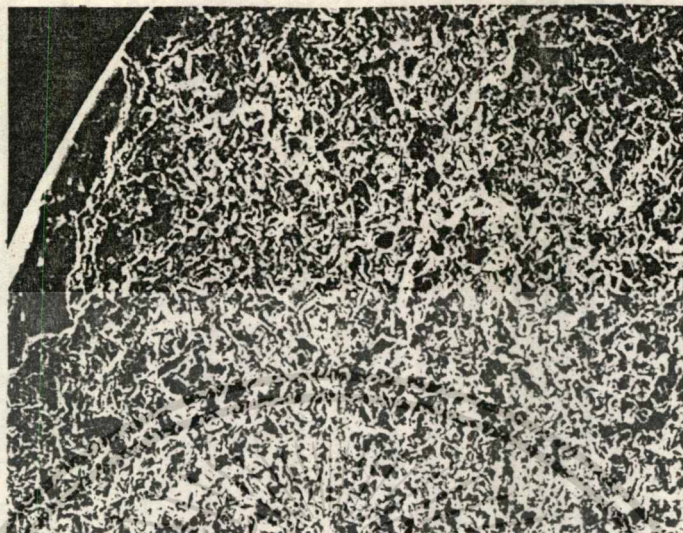


รูปที่ 66) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

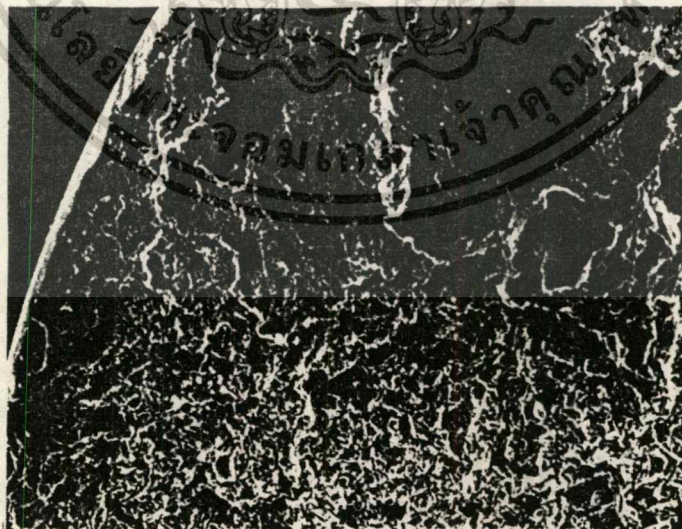


รูปที่ 67) 25 kv × 35 (scaling bar : 1.3 cm = 500 μm) WD 20 100000 (100 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

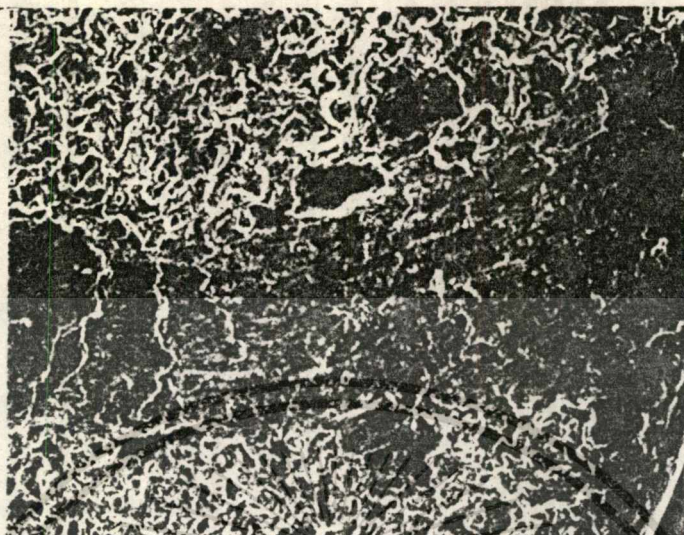


รูปที่ 68) 25 kv × 50 (scaling bar : 1.83 cm = 500 μm) WD 20 100000 (150 ° C)

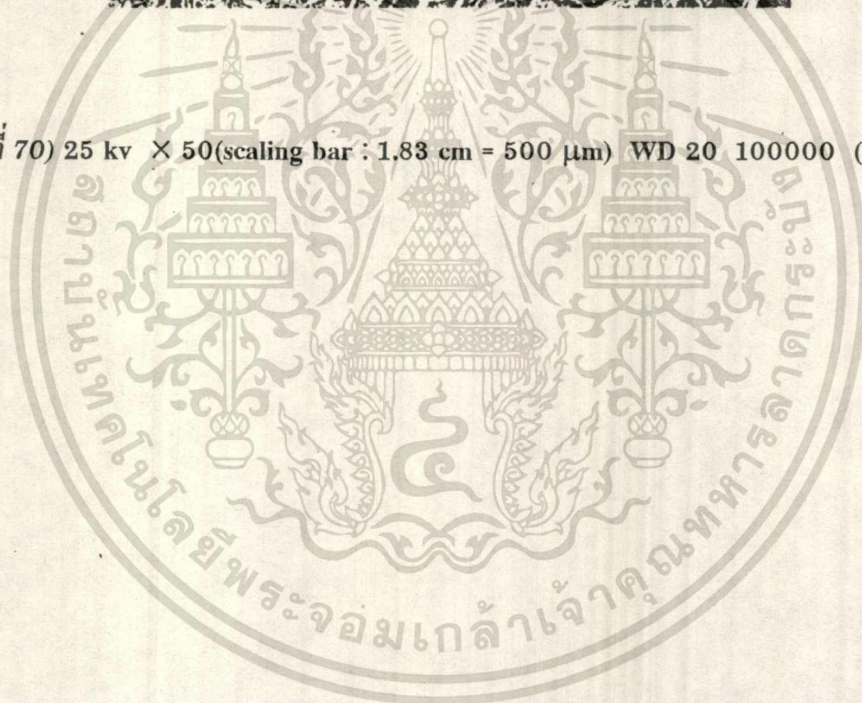


รูปที่ 69) 25 kv × 50 (scaling bar : 1.83 cm = 500 μm) WD 20 100000 (150 ° C)

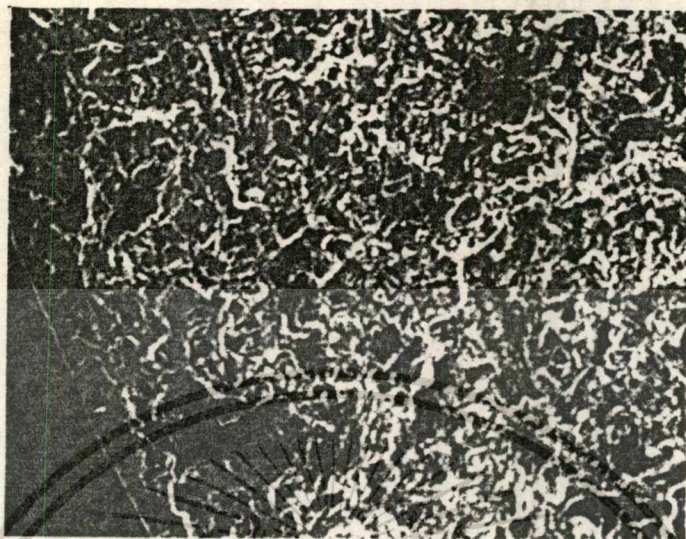
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



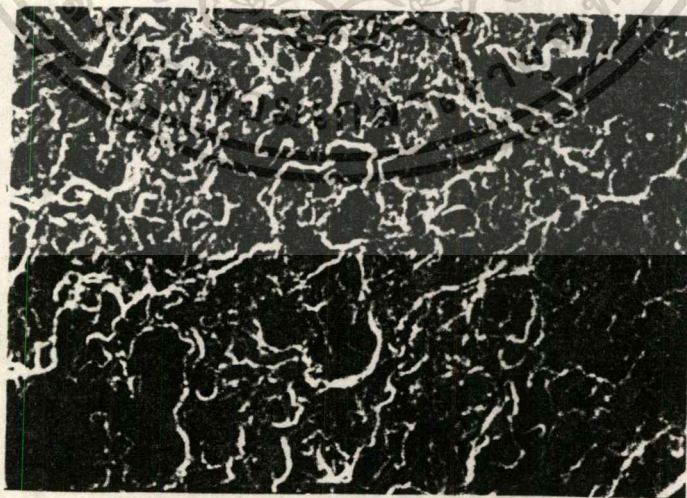
รูปที่ 70) 25 kv × 50 (scaling bar : 1.83 cm = 500 μm) WD 20 100000 (150 ° C)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

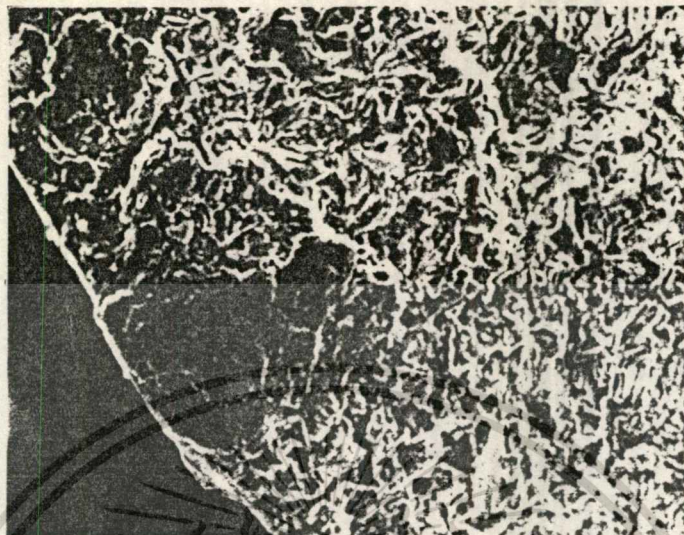


รูปที่ 71) 25 kv × 100 (scaling bar : 0.73 cm = 100 μm) WD 20 100000 (175 ° C)

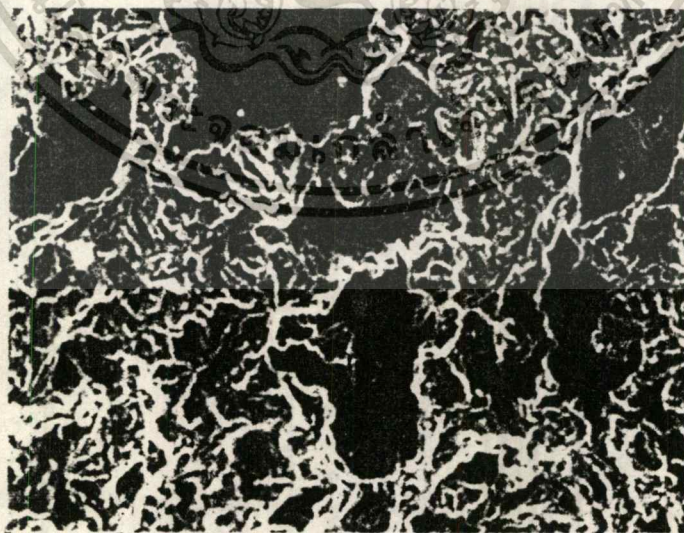


รูปที่ 72) 25 kv × 100 (scaling bar : 0.73 cm = 100 μm) WD 20 100000 (175 ° C)

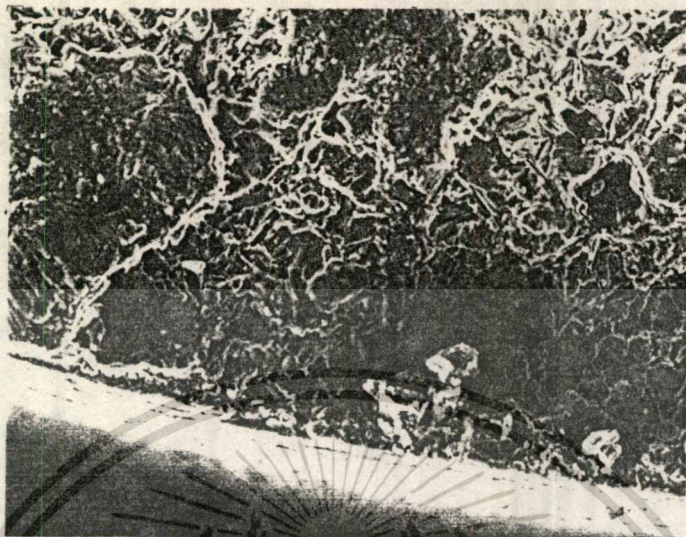
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



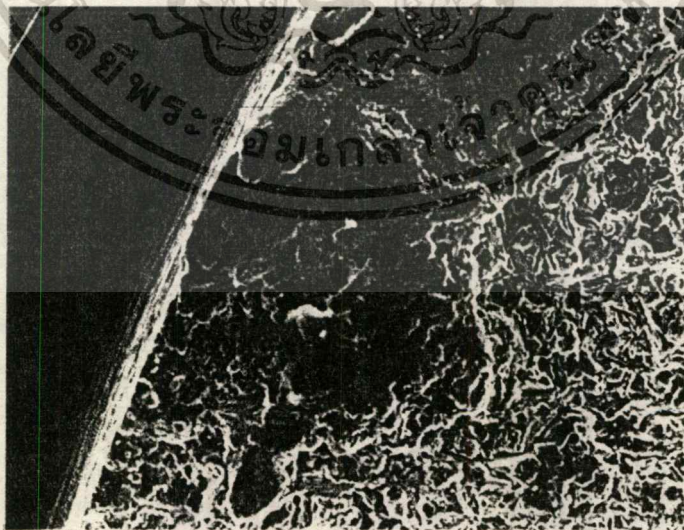
รูปที่ 73) 25 kv × 100 (scaling bar : 0.73 cm = 100 μm) WD 20 100000 (175 ° C)



รูปที่ 74) 25 kv × 100 (scaling bar : 0.73 cm = 100 μm) WD 20 100000 (175 ° C)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

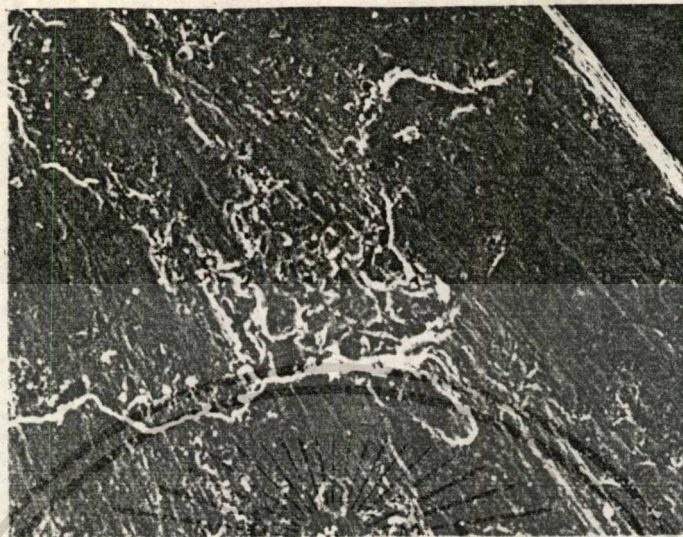


รูปที่ 75) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (200 ° C)

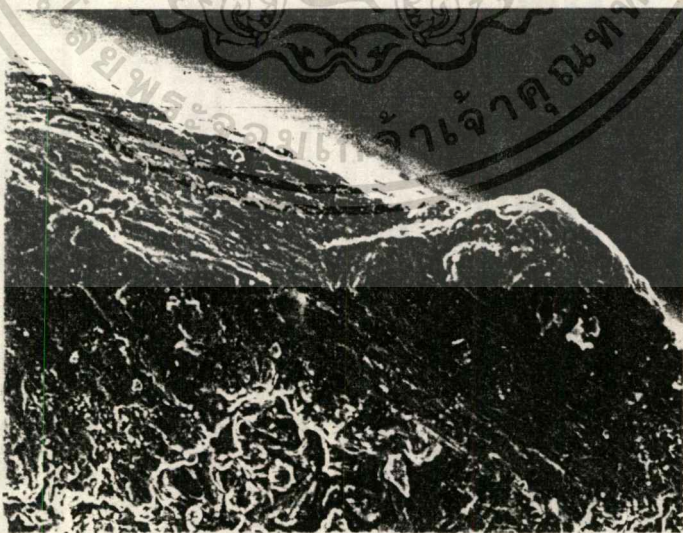


รูปที่ 76) 25 kv × 100 (scaling bar : 0.73 cm = 100 μm) WD 20 100000 (200 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 76) 25 kv X 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (200 ° C)

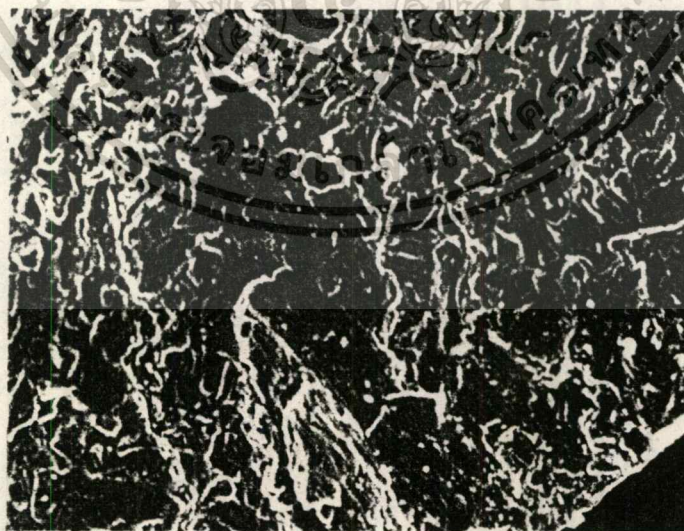


เอกสารนี้รูปที่ 77) 25 kv X 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (200 ° C)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 78) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)

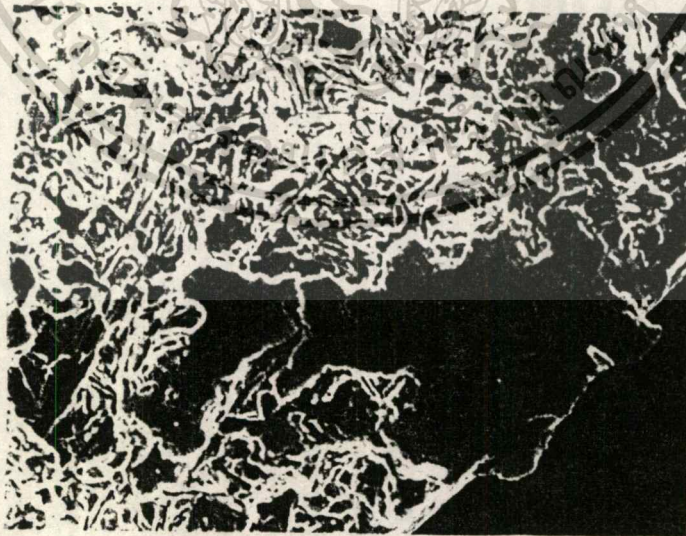


รูปที่ 79) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

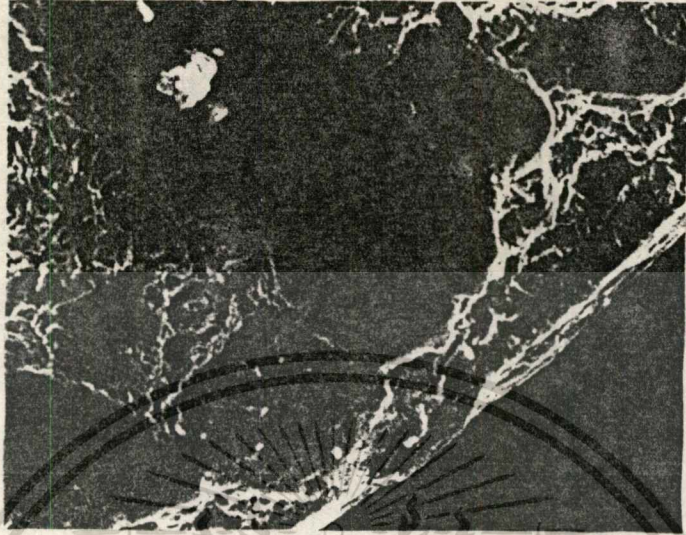


รูปที่ 80) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)

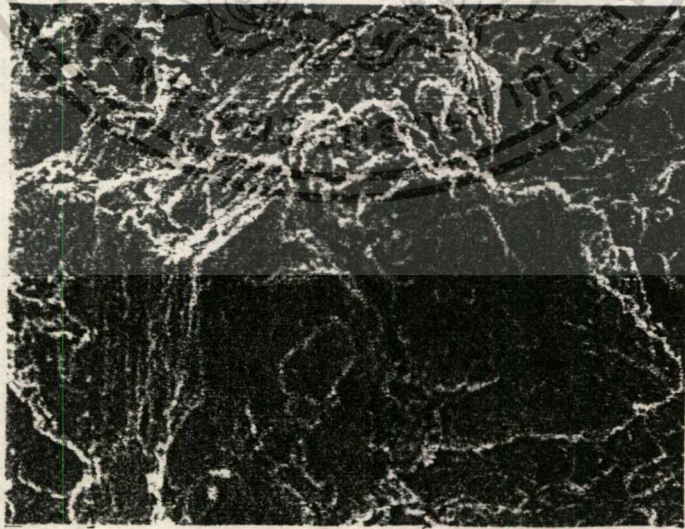


รูปที่ 81) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 82) 25 kv × 150 (scaling bar : 1.14 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)



รูปที่ 83) 25 kv × 200 (scaling bar : 1.47 cm = 100 μm) WD 20 100000 (260 ° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงนโยบายการศึกษาด้านเทคโนโลยีชีวภาพเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEM scaling for video graphic printer

Magnification	scaling bar
×35	1.30 cm = 500 μm
×100	0.73 cm = 100 μm
×350	1.30 cm = 50 μm
×750	0.55 cm = 10 μm
×1,000	0.73 cm = 10 μm
×2,000	1.47 cm = 10 μm
×3,500	1.28 cm = 5 μm
×5,000	1.84 cm = 5 μm
×7,500	0.55 cm = 1 μm
×10,000	0.73 cm = 1 μm
×15,000	1.14 cm = 1 μm
×20,000	1.45 cm = 1 μm
×50,000	1.83 cm = 0.5 μm
×100,000	0.75 cm = 0.1 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ มีผลต่อความต้านทานการล้าของชิ้นงาน ดังจะเห็นได้จากกราฟการเปรียบเทียบข้อมูล แต่ละอุณหภูมิที่ทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีพิคัดความล้า (fatigue limit) สูงกว่า

จากการทดลอง ที่จำนวนรอบ เท่ากับ 10^7 รอบ จะได้ว่า

ที่ $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี Fatigue limit = 84.5 Mpa

$T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี Fatigue limit = 77.0 Mpa

$T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี Fatigue limit = 73.5 Mpa

$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี Fatigue limit = 70.0 Mpa

$T = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี Fatigue limit = 46.5 Mpa

2. ผลจากการทดสอบแรงดึง สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติพื้นฐาน ดังนี้

Ultimate Tensile Stress = 203.33 Mpa

Proof Stress ที่ 0.2% Strain = 53.33 Mpa

Elongation โดยเฉลี่ย = 2.37 mm.

Elastic Young Modulus = 857.80 Mpa

3. ผลจากการตรวจสอบโครงสร้าง จะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากความล้า จะมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นกับอุณหภูมิ และ น้ำหนักที่มากกระทำ โดยที่เมื่อกำหนดค่า อุณหภูมิให้คงที่ และเปลี่ยนค่าของน้ำหนักที่กระทำ เมื่อน้ำหนักมีค่าน้อยลักษณะของการเกิดรอยแตกร้าวภายในจะละเอียดกว่าเมื่อน้ำหนักที่กระทำมีค่าสูง ในขณะที่เดียวกัน เมื่อให้ค่าของน้ำหนักที่กระทำมีค่าคงที่ แล้วเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ลักษณะของรอยแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะละเอียดกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า

4. เนื่องจากอลูมิเนียมชนิดนี้ เกิดจากการหล่อที่มีการเย็นตัวในทุกทิศทางเข้าสู่จุดศูนย์กลาง ดังนั้นเนื้ออลูมิเนียมจะมีเม็ดเกรนที่ละเอียดมาก ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อความต้านทานการล้ามาก ซึ่งเกิดจาก

4.1 ที่อุณหภูมิสูง ๆ ขึ้น อะตอม และอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานมากขึ้น ทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นไหวมากขึ้น มีผลทำให้พันธะยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมลดลง

4.2 เกิดการลื่น (slide) ระหว่างผลึกหรือเม็ดเกรน เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกลดลง โดยเฉพาะเนื้ออลูมิเนียมชนิดนี้มีเม็ดเกรนที่ละเอียด ดังนั้นจะมีผลึกมาก หรือมีขอบเกรนเยอะ ทำให้มีผลต่อความต้านทานการล้าของโลหะชนิดนี้มาก

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. กรรมวิธีในการเตรียมชิ้นงานมีผลให้เกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากบางขั้นตอน เช่น เครื่องกลึง CNC เครื่องเล็กมีความผิดพลาดเกิดขึ้น , หรือชิ้นงานมีความละเอียดของผิวชิ้นงานไม่เท่ากันเนื่องจากขั้นตอนในการขัดใช้มือ , ในการขัดชิ้นงานเมื่อนำไปใช้ตรวจสอบคุณภาพจุดโครงสร้างในบางครั้งหน้าตัดที่ได้จากการขัดไม่ได้ระนาบ จะทำให้ภาพจุดโครงสร้างที่ได้ไม่ชัดเจนเมื่อใช้อัตราขยายที่มีกำลังสูง , ขั้นตอนในการใส่ชิ้นงานในเครื่องทดสอบการล้าอาจทำให้เกิดความผิดพลาด เนื่องจากอาจเกิดความเค้นที่ตัวชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานหักเร็วกว่าปกติ นอกจากนี้ในการเตรียมชิ้นงานในขั้นเริ่มแรกอาจมีผลให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากอาจมีสารเจือปนในชิ้นงาน หรือโพรงอากาศ นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานมาส่งผ่าน เครื่อง Scanning ยังพบรอยร้าวในชิ้นงานซึ่งเกิดขึ้นในกรรมวิธีการเตรียมชิ้นงาน

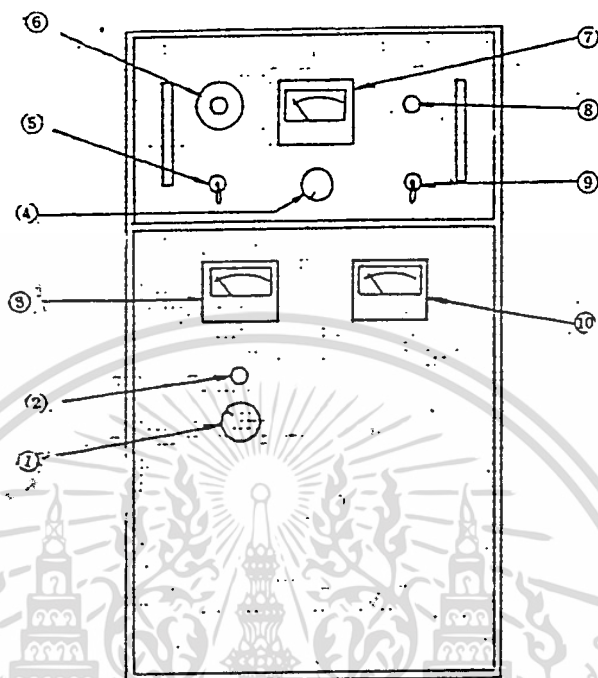
2. เมื่อนำผิวของชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากความล้า มาตรวจสอบจุดโครงสร้างภายใน จะสามารถแบ่งพื้นที่เสียหายได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 2.1 ส่วนเริ่มต้นเกิดรอยร้าว ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานจะละเอียด
- 2.2 ส่วนการขยายรอยร้าว พื้นผิวที่ได้มีลักษณะคล้ายลูกคลื่น ลักษณะรอยร้าวจะขยายตัวขึ้น
- 2.3 ส่วนแตกหักอย่างฉับพลัน พื้นผิวชิ้นงานจะหยาบ ขรุขระ มีบางส่วนยื่นออกมา เนื่องจากการเหือนของชิ้นงานในครั้งสุดท้าย



ภาคผนวก

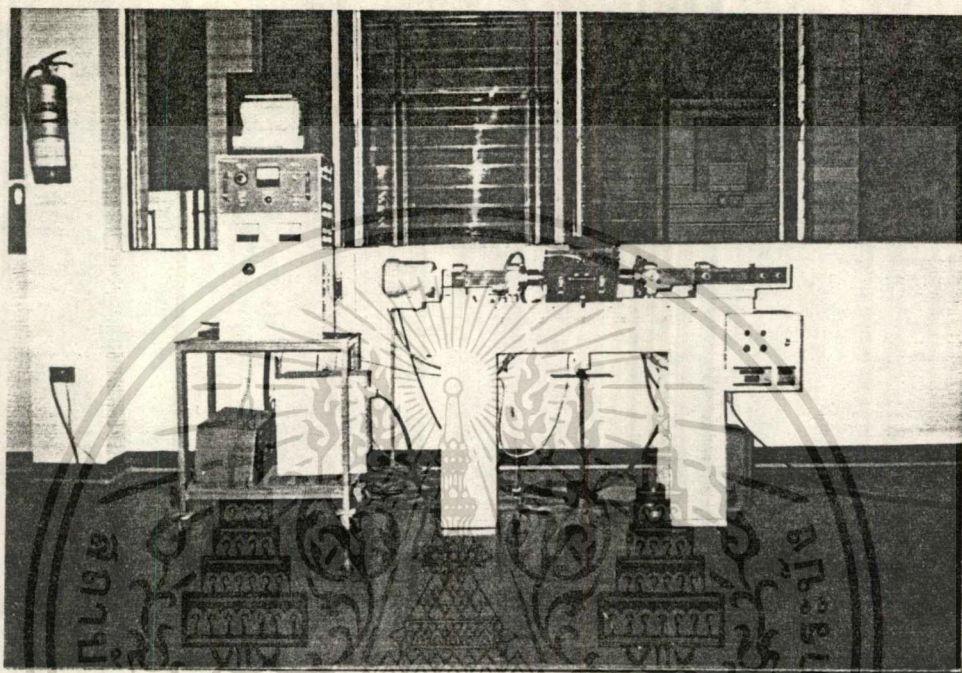
การตั้งอุณหภูมิ



รูปที่ 84 แสดงภาพของเครื่องตั้งอุณหภูมิ

1. เปิด Main Switch ในที่หมายเลข 2
 - 1) หมายเลข 1 ทำงานตลอดเวลา
 - 2) หมายเลข 2 หยุดเมื่อ limit switch ทำงาน
2. เปิด output adjust (4) ไปจนสุด
3. ปรับสวิตช์ (5) ไปที่ Low (อุณหภูมิ 100-400 °C ปรับ Low , อุณหภูมิ 400-800°C ปรับ height) พร้อมทั้งหมุน temp set fine (6) ไปยังตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการ(โดยดูจากกราฟที่ A1) การทดลองครั้งนี้ใช้อุณหภูมิที่ 100°C ปรับไปที่ประมาณ 380-450 °C Low
4. เมื่ออุณหภูมิใกล้ถึงที่ต้องการ (ประมาณ 5-10°C ก่อนถึง) ให้ลด output adjust (3) ลงมาจนอยู่ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมกับอุณหภูมิ
5. ปรับอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ โดยใช้ Temp set fine (6) 1 ช่องใน Temp set fine จะปรับอุณหภูมิประมาณ 0.4-0.5 °C
6. สังเกตกระแสที่ Control current amp meter จะต้องมีค่าอยู่ประมาณ 3-6 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 85 ภาพถ่ายเครื่องทดสอบการด้าแบบหมุนดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมกลิ้งเงินงานทดสอบความต้านทานการล้า

N	G	X	Z	F
00	M03			
01	00	-400	-400	
02	00	-150	0	
03	01	0	-9000	50
04	00	0	9000	
05	00	-52	0	
06	95			
07	01	0	-1000	30
08	00	0	20	
09	M05			
10	M00			
11	M03			
12	00	0	-20	
13	01	0	-1550	30
14	01	0	-2900	50
15	01	0	-3550	30
16	00	52	0	
17	00	0	3400	
18	00	-50	0	
19	01	-50	400	40
20	01	0	2200	40
21	01	50	400	40
22	01	-100	-400	40
23	01	0	-2200	40
24	01	100	-400	40
25	00	0	400	
26	00	-100	0	
27	01	-50	250	40
28	01	0	1700	40
29	01	50	250	40
30	00	100	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	G	X	Z	F
31	00	0	-2600	
32	03	-200	730	10
33	M99	I1232	K730	
34	01	0	1540	10
35	03	200	730	10
36	M99	I1432	K0	
37	00	100	0	
38	00	0	-5400	
39	00	-100	0	
40	01	-50	-100	10
41	01	50	-100	10
42	00	100	0	
43	00	0	8000	
44	00	-100	0	
45	01	-50	100	10
46	00	350	0	
47	00	300	1500	
48	M05			
49	M30			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคลังเงินงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

N	G	X	Z	F
00	M03			
01	00	-400	-400	
02	00	-100	-2800	
03	95			
04	01	-50	-200	40
05	01	00	-2260	40
06	01	50	-200	40
07	01	-100	300	40
08	01	00	2060	40
09	01	100	300	40
10	01	-150	-400	40
11	01	00	-1860	40
12	01	150	-400	40
13	00	00	400	
14	00	-150	00	
15	01	-50	100	40
16	01	00	1660	40
17	01	50	100	40
18	00	00	-100	
19	00	-50	00	
20	01	-50	-200	40
21	01	00	-1260	40
22	01	50	-200	40
23	00	200	00	
24	00	00	-500	
25	03	-300	930	02
26	M99	I1300	K930	
27	01	00	800	02
28	03	300	930	02
29	M99	I1600	K00	
30	00	100	00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	G	X	Z	F
31	00	00	-5260	
32	00	-100	00	
33	01	-50	-100	10
34	01	50	-100	10
35	00	100	00	
36	00	00	8060	
37	00	-100	00	
38	01	-50	100	10
39	00	400	00	
40	00	150	500	
41	M05			
42	M30			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

ผศ. พรศักดิ์ อรรธวานิช

คุณ มณฑา เทียมเมือง และ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเครื่องกลทุกท่าน

ห้อง Project ดร.ไกรสิน ส่งวัฒนา ภาควิชาโทรคมนาคม

พีณิมิตร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์(สด. 3,4 , สอ. 6)

และ เพื่อน ๆ รุ่น 31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. วิทยานิพนธ์เรื่องการทดสอบความล้าแบบหมุนคดของอลูมิเนียมอัลลอยด์,2534
2. Machine design เล่ม 1 ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. ชาญ อดุลงาน,2531
3. Numerical Methods for Engineer, steven C. Chapra,1988
4. Internal Combustion Engine Fundermental, Jeck P.Holemen,1989
5. คู่มือเครื่อง Uno's high temperature rotating bending fatigue testing machine



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้