การพัฒนาอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับการทดสอบการดีบแกนเดี่ยว

นาย รัฐสิทธิ์ จันทร์วิเศษ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-5401-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF DISPLACEMENT GAGE FOR UNIAXIAL CREEP TESTING

Mr. Rattasit Chanwiset

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-5401-9

481583

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับการทดสอบการดีบแกนเดี่ยว
โดย	นาย รัฐสิทธิ์ จันทร์วิเศษ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหถนัดกิจ)

รัฐสิทธิ์ จันทร์วิเศษ:การพัฒนาอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับการทดสอบการคืบแกนเดี่ยว (DEVELOPMENT OF DISPLACEMENT GAGE FOR UNIAXIAL CREEP TESTING) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 129 หน้า. ISBN 974-17-5401-9.

วิทยานิพนธ์นี้ พัฒนาการออกแบบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับการทดสอบการคืบแกนเดี่ยว อุปกรณ์ที่ออกแบบประกอบด้วยคลิปเกจที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบ กลไกวัดระยะเคลื่อนตัว และเครื่องมือสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่มีความยาวเกจ 55 มม โดยกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวใช้ท่อและก้านโลหะคู่ซึ่งสมมาตรกับชิ้นงานเพื่อลดผลของโมเมนต์ดัดที่เกิดบนชิ้นงาน การยึดติดอุปกรณ์ฯกับชิ้นงานได้ออกแบบกลไกที่สามารถยึดติดกับความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงานได้ถูกต้องทุกครั้ง และมีกลไกจำกัดระยะใช้งานอุปกรณ์ฯ เมื่อคลิปเกจเคลื่อนตัวถึงพิสัยใช้งานที่ออกแบบไว้ ในการสอบเทียบอุปกรณ์ที่ออกแบบคลิปเกจหมายเลข 1 มีความไวเชิงกล 233.3 $\mu\varepsilon/mm$ และหมายเลข 2 มีความไวเชิงกล 226.6 $\mu\varepsilon/mm$ และเมื่อประกอบเข้ากับกลไกวัดระยะเคลื่อนตัว อุปกรณ์ฯมีความละเอียดจัดอยู่ในเกรด D ส่วนความแม่นยำจัดอยู่ในเกรด F ตามมาตรฐาน BS3846 ในพิสัยใช้งาน 10 มม ในการใช้อุปกรณ์ฯทดสอบการคืบเดี่ยวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยใช้ชิ้นงานทองเหลือง ทำการทดสอบ 4 ครั้งที่ความเค้นเริ่มต้น 8.7 27.7 24.3 และ 34.7 MPa เป็นเวลา 191 ชั่วโมงพบว่า อุปกรณ์ฯมีความแม่นยำภายในพิสัยความไม่แน่นอนรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการคืบ จากผลการสอบเทียบและการทดสอบการคืบแกนเดี่ยว สรุปได้ว่าอุปกรณ์ฯที่พัฒนาขึ้น มีความแม่นยำและความทนทานเพียงพอต่อการใช้งานจริง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2548

4570504021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : EXTENSOMETER/ DISPLACEMENT GAGE/CREEP MEASUREMENT/ HIGH TEMPERATURE TESTING

RATTASIT CHANWISET : DEVELOPMENT OF DISPLACEMENT GAGE FOR UNIAXIAL CREEP TESTING. THESSIS ADVISOR : JIRAPONG KASIVITAMNUAY, D.ENG

129 pp. ISBN 974-17-5401-9.

This thesis developed design of a displacement gage for uniaxial creep test. Designing included strain-gage based clipgage, mechanism for displacement measurement and calibrator for displacement gage. Displacement gage used for specimen which has 55 mm of gagelength. Mechanism of displacement transfer composes of double rod and tube which symmetry with specimen position for decrease effect of bending moment on specimen. Clamping displacement gage with specimen has always accurancy and limit displacement mechanism be worked automatically when clipgage has full deflection. For calibration, clipgage no.1 has sensitivity of 233.3 $\mu\varepsilon/mm$ and clipgage no.2 has sensitivity of 226.6 $\mu\varepsilon/mm$. Overall, displacement gage has precision of grade D and accuracy of grade F according to BS3846 standard in full range of displacement gage. Using displacement gage for uniaxial creep testing at 350 $^{\circ}$C with brass specimen for four times of initial stress 8.7, 27.7, 24.3, and 34.7 MPa for 191 hours testing time found that, displacement gage has accurancy which coverd by uncertainty range at 95% of realibillity and data relation was satisfy for standard. From calibration and uniaxial creep testing, it can be concluded that the displacement gage that was developed has satisfactory accurancy and durability for testing.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาในการสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้ต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดทั้งวิธีคิดที่ละเอียดรอบคอบและเป็นขั้นตอนทั้งในแง่ของการศึกษาและการดำเนินชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหฉนัดกิจ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและยืมเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมรุ่นหลักสูตรระดับปริญญาตรีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และหลักสูตรระดับปริญญาโท สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือที่มีให้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำในการยืม และใช้เครื่องมือในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้การสนับสนุนการศึกษา จนกระทั่งผู้ทำวิทยานิพนธ์สำเร็จการศึกษา สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ผู้ซึ่งเสียสละ และทุ่มเททุกอย่างเพื่อการศึกษาของบุตรมาโดยตลอด ความดีอันใดที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูบูชาแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฐ
รายการสัญลักษณ์..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 5
1.3 วิธีดำเนินงาน..... 5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบ..... 6
2.1 การคืบของวัสดุ..... 6
2.2 การแสดงข้อมูลการคืบ..... 7
2.3 การทดสอบการคืบแกนเดี่ยว..... 9
2.4 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงด้วยเกณฑ์ความเค้น..... 10
2.5 การสร้างทรานสดิวเซอร์ที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบ..... 11
2.6 การประยุกต์ทฤษฎีพลังงานเพื่อคำนวณระยะแอ่นตัว..... 13

บทที่ 3 รายละเอียดและผลของการออกแบบ..... 15
3.1 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 15
3.1.1 ภาพรวมในการออกแบบ..... 15

หน้า

3.1.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบ..... 15
3.1.3 ผลการออกแบบ..... 18
3.2 เครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 28

บทที่ 4 การสอบเทียบ และการใช้งานอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 30
4.1 การสอบเทียบคลิปเกจ..... 30
4.1.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ..... 30
4.1.2 ผลการสอบเทียบ..... 31
4.2 การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 32
4.2.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ..... 33
4.2.2 ผลการสอบเทียบ..... 34
4.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 35
4.3.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ..... 35
4.3.2 ผลการสอบเทียบ..... 36
4.4 การใช้งานอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 36
4.4.1 รายละเอียดของการทดสอบ..... 36
4.4.2 ผลการทดสอบ..... 37

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการออกแบบอุปกรณ์ และผลการทดสอบการคืบ..... 40
5.1 คุณภาพของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 40
5.1.1 ความละเอียด..... 40
5.1.2 ความแม่นยำ..... 41
5.2 ความแม่นยำของการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว..... 42
5.3 ความทนทานของคลิปเกจ..... 47
5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการคืบ..... 49

หน้า

บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะ..... 52
6.1 บทสรุป..... 52
6.2 ข้อเสนอแนะ..... 53
รายการอ้างอิง..... 54
ภาคผนวก..... 56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 129

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนการใช้งานโดยรวม 17
3.2 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว 17
3.3 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนคลิปเกจ 18

4.1 อายุการคืบที่ความเค้นเริ่มต้นต่าง ๆ 38

5.1 ความผิดพลาดของความเครียดบนชิ้นงานทดสอบและขอบเขตที่ยอมให้ผิดพลาดได้ 41
5.2 ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว 43
5.3 ผลการคำนวณระยะสูญเสียที่ฐานรองรับคลิปเกจตัวบน และตัวล่าง 47
5.4 ความไวเชิงกลของคลิปเกจหมายเลข 1 ก่อนและหลังการใช้งาน 48
5.5 ความไวเชิงกลของคลิปเกจหมายเลข 2 ก่อนและหลังการใช้งาน 49
5.6 ผลการทดสอบการคืบของทองเหลืองที่ 350 องศาเซลเซียส 49

ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเกจบล็อคกับไมโครมิเตอร์ 90

จ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (คลิปเกจหมายเลข 1) ที่ระยะแอ่นตัวต่างๆ (หน่วยเป็น $\mu\varepsilon$) 93
จ.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (จ.1) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง 94
จ.3 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจหมายเลข 1 96
จ.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (คลิปเกจหมายเลข 2) ที่ระยะแอ่นตัวต่างๆ (หน่วยเป็น $\mu\varepsilon$) 97
จ.5 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (จ.6) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง 98
จ.6 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจหมายเลข 2 100

ตารางที่ หน้า

ฉ.1 ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ซึ่งกำหนดโดยเกจบล็อค
และอ่านจากไดอัลเกจ (หน่วยเป็น มม)..... 101
ฉ.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (ฉ.1) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง
และอ่านจากไดอัลเกจ (หน่วยเป็น มม)..... 102
ฉ.3 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ
ฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ..... 104

ช.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่
ต่าง ๆ (ครั้งที่1)..... 105
ช.2 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่
ต่าง ๆ (ครั้งที่2)..... 105
ช.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่
ต่าง ๆ (ครั้งที่3)..... 106
ช.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่
ต่าง ๆ (ครั้งที่4)..... 106
ช.5 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่
ต่าง ๆ (ครั้งที่5)..... 107
ช.6 สัมประสิทธิ์ในสมการที่ (ฉ.1) จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ ฉ.1-ฉ.5..... 107
ช.7 แสดงผลการคำนวณความไม่แน่นอนของการทดลองครั้งที่ 1..... 110
ช.8 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนสำหรับ δ_{grip} ของผลการทดลองครั้งที่ 1..... 111

ซ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 1-3 (คลิปเกจตัวที่1)..... 112
ซ.2 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 1-3 (คลิปเกจตัวที่2)..... 113
ซ.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 4 (คลิปเกจตัวที่ 1)..... 113
ซ.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 4 (คลิปเกจตัวที่ 2)..... 114

ฌ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 34.7 MPa)..... 115

ตารางที่ หน้า

ฌ.2 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 27.7 MPa)..... 116
ฌ.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)..... 117
ฌ.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)..... 121

ญ.1 การแบ่งเกรดจากความละเอียด..... 128
ญ.2 การแบ่งเกรดจากขอบเขตความผิดพลาด..... 128

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวแบบสอดผ่านช่องเปิดด้านล่างเตา..... 2
1.2 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวแบบสอดผ่านช่องเปิดด้านล่างเตา..... 3
1.3 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวแบบสอดผ่านช่องเปิดด้านล่างเตา..... 3
1.4 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวแบบสอดผ่านด้านข้างเตา..... 3
1.5 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวด้นแบบ..... 4

2.1 เส้นโค้งการคืบ..... 6
2.2 ผลของความเค้นต่อพฤติกรรมการคืบ..... 7
2.3 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการคืบ..... 8
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเวลาที่วัสดุเกิดความเครียดคืบขนาดต่าง ๆ..... 8
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการคืบที่อุณหภูมิและความเค้นต่าง ๆ..... 9
2.6 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว..... 10
2.7 วงจรบริดจ์เต็ม..... 12

3.1 เกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบ..... 16
3.2 วิธีจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงานทดสอบ..... 19
3.3 กลไกจำกัดระยะใช้งาน..... 19
3.4 ตำแหน่งศูนย์กลางรูสำหรับสอดกลไกจำกัดระยะ..... 20
3.5 ผังวัตถุอิสระของกลไกจำกัดระยะ และตัวแปรบอกมิติ..... 21
3.6 ผลของโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ของแนวแรงกับแนวแกนชิ้นงานทดสอบ
ต่อการวัดความยาวเกจ..... 23
3.7 กลไกท่อและก้านที่ใช้ในการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว..... 23
3.8 คลิปเกจตัวยู..... 25
3.9 แผ่นป้องกันคลิปเกจ..... 27
3.10 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 28

รูปที่ หน้า

3.11 เครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 29

4.1 การติดตั้งคลิปเกจบนเครื่องมือสอบเทียบ..... 31
4.2 มิเตอร์ความเครียด (ยี่ห้อ Tokyo Sekki รุ่น TC-31K ความละเอียด 1 $\mu\varepsilon$)..... 31
4.3 ผลการสอบเทียบคลิปเกจหมายเลข 1 และ 2..... 32
4.4 การวางเกจบล็อกระหว่างแท่นจับยึดอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวในการสอบเทียบ เครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 33
4.5 ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว..... 34
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวบนเครื่องมือสอบเทียบ..... 36
4.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวกับชิ้นงานทดสอบในเตา..... 37
4.8 ผลการทดสอบการคืบของทองเหลือง ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa..... 38
4.9 ผลการทดสอบการคืบของทองเหลือง ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส..... 39

5.1 การติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของฐานรองรับคลิปเกจและท่อถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว..... 42
5.2 ลักษณะการติดตั้งไดอัลเกจ และทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว..... 44
5.3 ผังวัตถุอิสระของคลิปเกจ และฐานรองรับคลิปเกจ..... 44
5.4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว..... 45
5.5 แบบจำลองท่อถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว และลักษณะการเสียจะเกิดขึ้น..... 46
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุดที่ความเค้นเริ่มต้นต่างๆของทองเหลือง ที่อุณหภูมิ 350 องศเซลเซียส..... 50
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุดกับอายุการคืบของทองเหลืองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส..... 51

ค.1 รูปร่างคลิปเกจที่ออกแบบ..... 87

รูปที่ หน้า

ง.1 หลักการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบคลิปเกจ..... 89

รายการสัญลักษณ์

$C_{2,1}$	สัมประสิทธ์คลิปเกจตัวที่1 ,$\mu\varepsilon$/mm
$C_{2,2}$	สัมประสิทธ์คลิปเกจตัวที่1,$\mu\varepsilon$/mm
E	ยังโมดูลัสของวัสดุ, GPa
E_o	ความต่างศักย์ที่ป้อนวงจร, โวลท์
E_i	ความต่างศักย์ที่วัดจากวงจร, โวลท์
F	เกจแฟคเตอร์ความต้านทานเกจความเครียด
I	โมมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด, mm^4
P	แรงกระทำบนคลิปเกจ, Newton
R	ความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียด, Ohm
S	ความไวเชิงกล, mm^{-1}
$t_{95\%}$	ตัวประกอบความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์
t_r	อายุการคืบ, นาที
U	พลังงานความเครียด
U_B	ความไม่แน่นอนเชิงระบบ
U_P	ความไม่แน่นอนสุ่ม
Y	ขอบเขตความผิดพลาด

อักษรกรีก

ε	ความเครียด,
$\dot{\varepsilon}$	อัตราการเกิดความเครียด, $\mu\varepsilon$/minute
σ	ความเค้น, Pa
δ	ระยะเคลื่อนตัว, เมตร
α	สัมประสิทธ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, $1/^0C$
Δ	ระยะสูญเสียของคลิปเกจ, มม