

การออกแบบเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูง

หทัยพัฒน์ ค่อยประเสริฐ¹ ปณิตดา นรินทล้าพงศ์²

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

114 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

และ สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

เครื่องจักรกลต่างๆ ขณะใช้งานมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบเฟรตติ้ง ซึ่งสามารถนำไปสู่การสึกหรอชนิดอื่นๆ ตามมา เช่น การสึกหรอจากการเสียดสี การสึกหรอจากความล้า และการสึกหรอจากอนุภาคแข็ง ในการพัฒนาวัสดุเพื่อป้องกันการสึกหรอไม่ว่าจะเป็นกลไกในลักษณะใดก็ตาม เครื่องทดสอบการสึกหรอที่สามารถจำลองสภาวะให้ใกล้เคียงการใช้งานจริงและสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรบางอย่างที่ต้องการศึกษาได้นั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การสัมผัสกันของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่วนใหญ่ที่เกิดการสึกหรอเป็นการสัมผัสแบบทั่วผิวหน้า ดังนั้นผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งชนิด Flat-on-flat จึงสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้การทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงก็เป็นฟังก์ชันที่สำคัญของเครื่องทดสอบเนื่องจากชิ้นส่วนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะมีกลไกการสึกหรอที่ต่างไปจากการใช้งานปกติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูงชนิด Flat-on-flat แล้วนำเครื่องทดสอบนี้มาใช้เปรียบเทียบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมและผิวเคลือบ WC-17%Co ที่พินเคลือบด้วยเปลวความร้อน เพื่อศึกษาความสามารถในการจำลองกลไกการสึกหรอแบบเฟรตติ้งของเครื่องทดสอบที่อุณหภูมิ 500 °ซ

ผลการจำลองการสึกหรอพบว่าเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูงที่สร้างขึ้นสามารถจำลองการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูงได้ดี สามารถใช้ศึกษากลไกการสึกหรอแบบเฟรตติ้ง สังเกตพฤติกรรมและผลกระทบของ Oxide debris ได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้เครื่องสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะต่างๆ ในการทดสอบ เช่น อุณหภูมิที่ทดสอบ ความเร็ว ความถี่และระยะทางในการเคลื่อนที่เสียดสีได้อย่างกว้างขวางจึงสามารถประยุกต์ใช้กับงานทดสอบชิ้นส่วนชนิดอื่นๆ ได้ เครื่องทดสอบลักษณะนี้จะมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่ง ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการสึกหรอของวัสดุต่างๆ ทั้งแบบแท่งตันและแบบผิวเคลือบ ซึ่งจะช่วยให้อุตสาหกรรมสามารถเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ : เครื่องทดสอบการสึกหรอ / การทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง / การสึกหรอแบบเฟรตติ้ง / Third body wear

¹ ผู้ช่วยนักวิจัย เทคโนโลยีเซรามิกส์

² นักวิจัย เทคโนโลยีเซรามิกส์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์

Design of Test Equipment for Fretting Wear at High Temperature

Hathaipat Koiprasert¹ Panadda Niranatlumpong²

Nation Metals and Materials Technology Center (MTEC)

114 Paholyothin Rd., Klong1, Klong Luang, Pathumthani 12120

and Supattanapong Dumrongrattana³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

Vibration can occurs in machinery equipment during operation leading to fretting wear. It is this fretting mechanism which can lead into other wear types such as abrasive wear, fatigue wear and three-body wear. In order to carry out the work in research and development of materials and surfaces to improve the fretting wear protection, the fretting wear testing equipment to simulate the testing condition as close as possible to the operating condition is required. The majority of the industrial machinery are worn out by a surface contact nature as oppose to a point contact. For this reason, the result from Flat-on-flat fretting wear testing machine is widely used as a reference in many industries. Moreover, testing at elevated temperature is also an important function of the wear testing machine because the wear mechanism occurred can vary greatly with the change in temperature. The objective of the work was, therefore, to set up a flat-on-flat fretting wear testing equipment at high temperature and to test the bulk stainless steel test piece in comparison with WC-17%Co thermal-spray coated specimens at 500°C.

The result showed that the wear testing machine is capable of simulating the fretting wear at high temperature. It can be used to study the fretting wear mechanism, and to observe the oxidation behavior and its effect. In additional, the test conditions used in the tester such as testing temperature, velocity frequency and amplitude of test pieces motion can be altered to suit variety of applications and materials tested. The tests performed in this project showed that the wear tester can be used to compare the wear property between bulk material and coatings which will greatly benefit the industries in the selection of appropriate materials and coatings for engine parts and components.

Keywords : Wear Testing Machine / High Temperature Wear / Fretting Wear / Third Body Wear

¹ Assistance Researcher, Ceramic Technology.

² Researcher, Ceramic Technology.

³ Assistance Professor, Department of Physics.

1. บทนำ

ขณะใช้งานเครื่องจักรกลหลายประเภทมักจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การสั่นสะเทือนเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบเฟรตติง (fretting wear) บริเวณที่มักเกิดการสึกหรอแบบเฟรตติง เช่น บริเวณรอยต่อของหมุดยึด สลัก จานต่อเพลลา ลวดยึดและแม่แต่ในร่างกายคนเรา จุดต่อของกระดูกเทียมก็สามารถเกิดการสึกหรอแบบเฟรตติงได้ เมื่อเกิดการสึกหรอแบบเฟรตติงนานๆ เข้า ระยะเวลาเสียดสีมากขึ้นก็จะกลายเป็นการสึกหรอรูปแบบอื่นที่ทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นและรวดเร็วขึ้น เช่น การสึกหรอจากการเสียดสี (abrasive wear) การสึกหรอจากความล้า (fatigue wear) และการสึกหรอจากอนุภาคแข็ง (three body wear) ในเครื่องจักรกลหลายชนิดแม้ชิ้นส่วนบางอย่างเกิดการสึกหรอแบบเฟรตติงแต่ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรมากนักทำให้ยังคงใช้งานต่อไปได้ ความเสียหายจะเห็นชัดมากขึ้นเมื่อการสึกหรอแบบเฟรตติงกลายเป็นการสึกหรอชนิดอื่นที่รุนแรงขึ้น แต่เครื่องจักรกลบางชนิดการสึกหรอเพียงเล็กน้อยไม่ถึง 0.1 มม. ก็ส่งผลกระทบต่ออย่างมาก ตัวอย่างเช่นเครื่องยนต์ใบพัดกังหันก๊าซที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ชิ้นส่วนหัวฉีดเชื้อเพลิงที่สวมอยู่กับปลอกหัวฉีดเชื้อเพลิงซึ่งทำหน้าที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อจุดระเบิดและให้ก๊าซร้อนขับเคลื่อนกังหัน แรงสั่นสะเทือนจากการจุดระเบิดในห้องเผาไหม้และการใช้งาน ทำให้ชิ้นส่วนหัวฉีดเชื้อเพลิงและปลอกหัวฉีดเชื้อเพลิงกระทบเสียดสีกันและเกิดการสึกหรอแบบเฟรตติงขึ้น ก๊าซในห้องเผาไหม้สามารถเล็ดลอดออกมาตามรอยสลักได้ เครื่องยนต์จะเสียแรงดันก๊าซบางส่วนไป จึงทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ทำให้สูญเสียพลังงานมากขึ้นในการผลิตไฟฟ้า การแก้ปัญหาด้วยการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่เป็นการสิ้นเปลืองทั้งต้นทุนและทรัพยากรธรรมชาติ เนื่องจากชิ้นส่วนใหม่มักจะมีราคาแพงและอาจต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ความเข้าใจถึงกลไกการสึกหรอและสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุชิ้นงานหรือระบบผิวเคลือบจะทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมได้มากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตนั่นเอง

การทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงยังไม่มีมาตรฐานใดๆ รองรับ แต่ก็มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนองานวิจัยที่

มีการใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงโดยแบ่งเครื่องได้เป็น 2 ลักษณะคือชนิด ball-on-flat [1-3] เป็นการสัมผัสแบบจุด และชนิด flat-on-flat [4-5] เป็นการสัมผัสแบบทั่วผิวหน้า ซึ่งเครื่องชิ้นส่วนอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักเป็นการสัมผัสแบบทั่วผิวหน้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้หลักการของเครื่องทดสอบ ชนิด flat-on-flat จะทำให้สามารถจำลองการสึกหรอได้ใกล้เคียงการใช้งานจริงของเครื่องมือเครื่องจักรมากกว่าการใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอชนิด ball-on-flat และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิสูง โดยมีการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบที่มีลักษณะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ ก่อนหน้านี้ คือมีการใช้แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่แตกต่างออกไปโดยใช้ air vibrator ทำให้เกิดการสั่นในทุกทิศทาง การทดสอบจึงสามารถจำลองการสั่นสะเทือนได้ใกล้เคียงสภาวะใช้งานในอุตสาหกรรมได้มากขึ้น การผลิตง่ายขึ้นสามารถทดสอบวัสดุได้หลากหลายทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมและผิวเคลือบเพื่อต้านทานการสึกหรอ เครื่องสามารถจำลองสภาวะการใช้งานของ เครื่องมือเครื่องจักรที่มีปัญหาการสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิสูงและสามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและแรงกดกระทำของชิ้นงานได้สูงขึ้นกว่างานวิจัยที่ผ่านๆ มา นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่และความเร็วในการสั่นสะเทือนเพื่อใช้จำลองการใช้งานเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ได้ โดยในขั้นต้นได้ทำการทดสอบการใช้งานของเครื่องด้วยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิ 500 °ซ ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมและชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่พ่นเคลือบด้วยผิวเคลือบ WC-17% Co ที่พ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

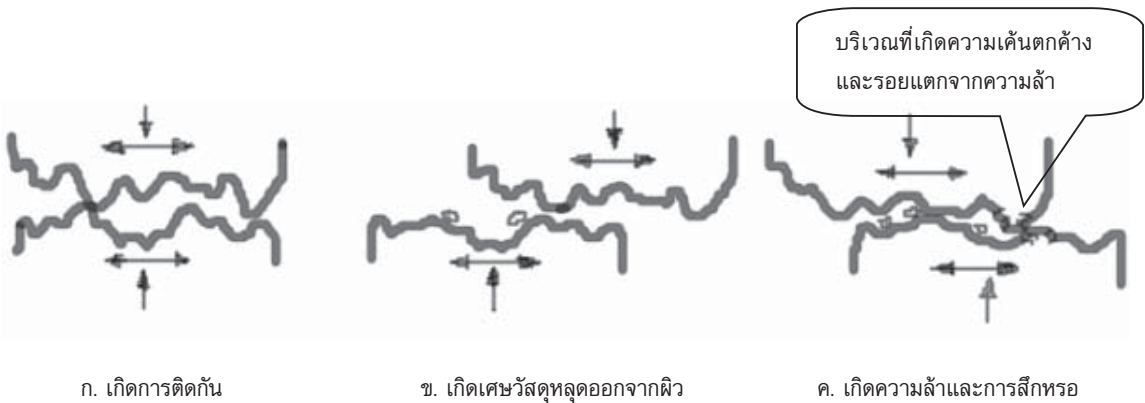
2.1 กลไกการสึกหรอแบบเฟรตติง

การสึกหรอแบบเฟรตติง คือ ความเสียหายของผิววัสดุที่สัมผัสกันมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันโดยเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในระยะสั้นๆ ด้วยระยะการเคลื่อนที่ 1-100 ไมครอน [6] ซึ่งกลไกการสึกหรอแบบเฟรตติงประกอบด้วย การสึกหรอจากการยึดติด (adhesive wear) ร่วมกับการ

สึกหรอจากความล้า โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น คือ [7]

1. เกิดการยึดติดในช่วงเริ่มต้น วัสดุสองชั้นที่สัมผัสกันแต่ละชั้นมีแรงกดกระทำซึ่งกันและกัน ความไม่เรียบสมบูรณ์แบบของวัสดุ ทำให้ที่จุดสัมผัสได้รับแรงกระทำสูง เมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านกันของวัสดุทำให้เกิดการเฉือน (shearing) ในทิศทางการเคลื่อนที่ของผิววัสดุที่สัมผัสกันและเกิดความร้อนที่จุดสัมผัส ส่งผลให้เกิดการแพร่ของอะตอมข้ามจากวัสดุหนึ่งไปอีกวัสดุหนึ่ง ด้านที่

เสียอะตอมไปจะมีสมบัติด้อยลง แรงยึดเกาะระหว่างสองผิวที่เกิดการยึดติดนี้อาจมากกว่าความแข็งแรงแบบ cohesive ของวัสดุนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) และอาจเกิดรอยแตกแบบ cohesive ทำให้ผิววัสดุด้านหนึ่งเสียเนื้อโลหะที่อ่อนนุ่มกว่าไปให้กับอีกตัวหนึ่ง แรงเฉือนจากการเคลื่อนที่เสียดสีกลับไปกลับมาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการฉีกขาดของผิววัสดุจากผิวหน้าหนึ่งติดไปกับอีกผิวหนึ่ง ดังรูปที่ 1ก.



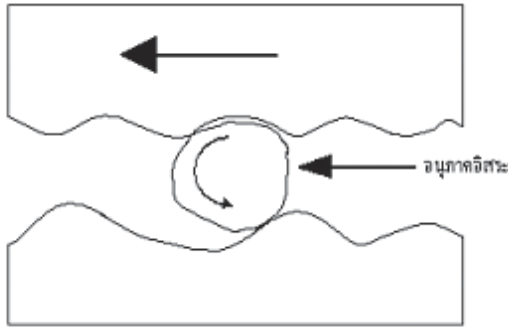
รูปที่ 1 กลไกการสึกหรอแบบเฟรตติ้ง

2. เกิดเศษวัสดุหลุดออกจากผิว แสดงในรูปที่ 1ข. จากกระบวนการเกิดการติดกัน ผิวหน้าที่ติดไปกับอีกผิวหนึ่งเคลื่อนที่ชนผิวขรุขระบริเวณใกล้เคียงเมื่อรวมกับผลจากความล้าทำให้เกิดเศษหลุดจากผิวหน้า เศษที่หลุดทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น oxide debris ซึ่งมักจะฝังอยู่ในบริเวณที่เกิดนั้น พฤติกรรมของ debris มี 2 ลักษณะคือ oxide debris ที่แข็งมีรูปร่างเป็นก้อนกลมหรือเหลี่ยม และ oxide debris ของวัสดุที่อ่อนและมีลักษณะเป็นแผ่นแบนขนาดใหญ่

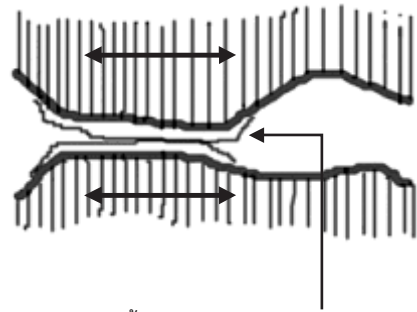
Oxide debris ที่มีรูปร่างเป็นก้อนกลมหรือเหลี่ยมเมื่อสะสมอยู่บนผิวหน้าสัมผัสในลักษณะของอนุภาคอิสระจะทำให้ความเสียดทานเพิ่มขึ้นและขูดขีดผิวหน้าวัสดุทำให้การสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น เกิดเป็นการสึกหรอ

แบบ three body abrasive แสดงในรูปที่ 2ก. แต่ถ้าหากว่า oxide debris มีความแข็งสูงกว่าผิวสัมผัสด้านใดด้านหนึ่งมากก็สามารถฝังตัวที่ผิวหน้าของวัสดุนั้น ส่งผลให้ความแข็งผิวของวัสดุนั้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน อนุภาคที่ฝังตัวก็จะไปขูดผิวคู่สัมผัสอีกด้านหนึ่งให้เกิดการสึกหรอสูงขึ้นได้

นอกจากนี้ ถ้าหาก oxide debris มีลักษณะที่อ่อนนุ่ม ขณะที่เกิดการเสียดสีมักจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเป็นแผ่นแบนขนาดใหญ่ซึ่งจะสร้างพันธะและเชื่อมติดกับผิวหน้าชิ้นงานได้ง่าย oxide debris ประเภทนี้สามารถทำตัวเป็นชั้นป้องกันที่เรียกว่า third body ปกคลุมผิวหน้าวัสดุและช่วยต้านทานการสึกหรอได้ [8-9] แสดงในรูปที่ 2ข.



ก. การสึกหรอแบบ Three body abrasive



ข. ชั้นป้องกัน Third body

รูปที่ 2 ลักษณะของการสึกหรอแบบ Three body abrasive และชั้นป้องกัน Third body

3. เกิดความล้าและการสึกหรอ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของการสึกหรอแบบเฟรตติ้งทำให้เกิดความเค้นวงรอบ (cyclic stress) และการสัมผัสกันของผิวหน้าทำให้เกิดรอยแตกจากการล้า (fatigue crack) ดังแสดงในรูปที่ 1ค.

2.2 งานวิจัยที่มีมาก่อน

การทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งในงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้นั้นส่วนใหญ่มักจะทดสอบด้วยเครื่องชนิด ball-on-flat และ flat-on-flat โดยได้มีการใช้เครื่องทดสอบชนิด ball-on-flat ในการศึกษาการสึกหรอแบบเฟรตติ้งของ carbon ion implant บนผิวเคลือบไททาเนียมไนไตรด์จากกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (physical vapour deposited, PVD) [1] และศึกษาการสึกหรอแบบเฟรตติ้งของผิวเคลือบนิกเกิลและโครเมียมจากการเคลือบด้วยเลเซอร์กับผิวเคลือบ Spheroidized Calcined Hydroxy Apatite ที่พื้นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา [2] ลักษณะของเครื่องที่ใช้มีทั้งแบบที่ให้แรงกดผ่านชิ้นงานลูกบอลซึ่งอยู่ด้านบนกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับแผ่นชิ้นงานผิวเคลือบที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ด้านล่างและแบบที่ให้แรงกดผ่านชิ้นงานลูกบอลที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ด้านบน งานวิจัยของ M. Kalin มีการออกแบบให้ใต้แผ่นชิ้นงานผิวเคลือบที่อยู่ด้านล่างมีเครื่องให้ความร้อน เพื่อให้สามารถปรับอุณหภูมิ ขณะทดลองได้ [3] แต่ในงานวิจัยดังกล่าวไม่มีการปรับเปลี่ยน อุณหภูมิในการทดสอบ เนื่องจากงานวิจัยต้องการนำเสนอการใช้

สมการคำนวณ ปริมาณการสึกหรอเทียบกับปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งคาดว่าในขั้นตอนทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องก่อนแต่ผลของสมการที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่มาก ในทุกงานวิจัยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยควบคุมน้ำหนักกด จำนวนรอบ ความถี่และระยะทางที่ชิ้นงานชิ้นล่างหรือชิ้นบนเคลื่อนที่แล้วศึกษาลักษณะรอยสึกที่ได้ ขนาดความกว้าง ความลึกของรอยด้วย SEM และการเปรียบเทียบภาพจาก X-ray imaging

การทดสอบแบบ ball-on-flat ชิ้นงานเป็นการสัมผัสแบบจุด มีแรงกดกระทำ ณ จุดเดียวอาจจะทำให้ผิวเคลือบที่ต้องการทดสอบการสึกหรอแตกอย่างรวดเร็ว ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบจะถูกจำกัด ซึ่งจะจำกัดความเสียหายในวงแคบ การเกิดเศษจากการสึกหรอจะต่างจากที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการสัมผัสแบบทั่วผิวหน้าและไม่สามารถจำลองการกระจายความร้อนที่ผิวงานที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอแบบเฟรตติ้งได้ ในขณะที่ทดสอบชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นหลายระดับจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาทิศทางเดียวซ้ำๆ กัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอ กลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากการสัมผัสแบบทั่วผิวหน้าซึ่งจะกระจายแรงกด การสึกหรอจึงค่อยๆ เกิดขึ้นทีละน้อยและระดับการเปลี่ยนแปลงความเค้นจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสึกหรอ

A.E. Segall [4] และ A.J. Freimains [5] ได้นำเสนอการใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอชนิด flat-on-flat

ในการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งแทนการใช้ ball-on-flat จะทำให้สามารถจำลองสภาพจากการใช้งานในอุตสาหกรรมซึ่งชิ้นส่วนต่างๆ มีผิวหน้าสัมผัสกันเป็นผิวแบนราบได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น งานวิจัยทั้งสองใช้เครื่องมือในลักษณะเดียวกัน โดยเครื่องประกอบด้วยแผ่นชิ้นงานลักษณะแบนขนาดเล็ก (block) กดลงบนชิ้นงานผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง และมีอุปกรณ์ให้ความร้อนอยู่ด้านล่าง โดยเริ่มแรกได้มีการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งของผิวเคลือบ Cu-Ni-In ที่พื้นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงและเปลวพลาสมานบนเหล็กกล้าเกรด 4340 โดยให้เสียดสีกับ Ti-6Al-4V ที่อุณหภูมิ 175 °ซ เพื่อทำการทดสอบในสภาวะเร่ง (acceleration) ด้วยน้ำหนักกด 250 นิวตัน ความถี่การเคลื่อนที่ 50 เฮิรตซ์ ระยะเคลื่อนที่ 100 ไมครอนและจำนวนรอบการเคลื่อนที่ 500,000 รอบ แล้วจึงทำการทดสอบ วิเคราะห์ผลด้วย SEM และ EDX ซึ่งพบรอยสึกเป็นบางบริเวณไม่ทั่วทั้งผิวหน้าชิ้นงานที่ทดสอบ เนื่องจากในระดับจุลภาคผิวหน้าชิ้นงานมีความขรุขระ บริเวณที่นูนของผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองจะเสียดสีกัน เกิดรอยสึก ซึ่งจาก SEM จะเห็นเป็นรอยสีดำ ขนาดเล็กกระจายบนผิวหน้าชิ้นงาน [4]

นอกจากนี้ยังมีการนำเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งชนิด flat-on-flat มาใช้จำลองสภาวะการเกิดการสึกหรอแบบเฟรตตั้งของใบพัดในสวนอัดอากาศ (compressor blades) กับส่วนฐาน (disk) ที่ใบพัดสวมอยู่ในเครื่อง Jet Turbine ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน ซึ่งชิ้นส่วนทั้งสองทำจากไททาเนียมอัลลอย เพื่อจำลองสภาวะการใช้งาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในสวนอัดอากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่างกัน โดยทำการทดสอบ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิต่ำที่ 227 °ซ และที่อุณหภูมิสูง 454 °ซ [5]

เครื่องทดสอบของทั้ง A.E. Segall [4] และ A.J. Freimains [5] เป็นเครื่อง flat on flat แบบที่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยสามารถควบคุมจำนวนรอบได้ เครื่องต้องใช้อุปกรณ์จำนวนมากและซับซ้อน เช่น อุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน อุปกรณ์ควบคุมและวัดจำนวนรอบที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ควบคุมระยะเวลาการเคลื่อนที่ ทั้งสองการทดลองทำการ

ทดสอบเฉพาะเชิงคุณภาพโดยดูลักษณะรอยสึกและดูว่ามีผิวเคลือบไปติดบนชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบหรือไม่

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งที่อุณหภูมิสูงชนิด flat on flat ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องที่มีอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนโดยออกแบบให้ใช้ air vibrator ในการจำลองการสั่นสะเทือน ซึ่งเครื่องทดสอบที่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนนี้จะจำลองการเกิดการสึกหรอแบบเฟรตตั้งได้ดีกว่าและใกล้เคียงกว่าเครื่องที่ชิ้นงานเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เครื่องทดสอบแบบที่ชิ้นงานเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในทิศทางเดียวจะจำลองการถ่ายเทความร้อนที่ผิวชิ้นงานและลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นซึ่งมีผลต่อการสึกหรอจากความล้าอันเป็นกลไกหนึ่งของการสึกหรอแบบเฟรตตั้งได้ไม่ดีเท่าการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในทุกทิศทางจากการสั่นสะเทือน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้สามารถนำเสนอผลการทดลองทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้

3. วิธีทดลอง

3.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งที่อุณหภูมิสูงและการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งที่อุณหภูมิ 500 °ซ

การทดสอบและเครื่องมือในการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตตั้งยังไม่มีมาตรฐานใดๆ รองรับ เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยอื่นก่อนหน้าจึงเป็นเพียงการจำลองการเคลื่อนที่เสียดสีในระยะต่ำกว่า 100 ไมครอนเท่านั้น การเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวคือให้ชิ้นงานชิ้นล่างหรือชิ้นบนมีการเคลื่อนที่กลับไป-กลับมา แต่การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลขณะใช้งานซึ่งเป็นสาเหตุของการสึกหรอแบบเฟรตตั้งมีทิศทางการเคลื่อนที่หลายทิศทางไม่แน่นอน เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีการออกแบบให้ใช้ air vibrator เป็นแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนทำให้สามารถจำลองการสั่นที่มีการเคลื่อนที่ทุกทิศทางได้ สามารถควบคุมระยะเวลาการเคลื่อนที่และความเร็วการสั่นโดยควบคุมความดันลมที่ผ่านเข้าสู่ air vibrator จึงทำให้เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถจำลองกลไกการสั่นสะเทือนและการเกิดการสึกหรอแบบเฟรตตั้งได้ใกล้เคียงการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ air vibrator ยังช่วยให้การปรับเปลี่ยนระยะเวลาการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งของการทดสอบทำได้ง่ายขึ้น

และยังลดความซับซ้อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม การเคลื่อนที่ลงได้ ทำให้ประหยัดต้นทุนการทดสอบได้มากกว่า

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงที่ อุณหภูมิสูงมีองค์ประกอบหลักคือ

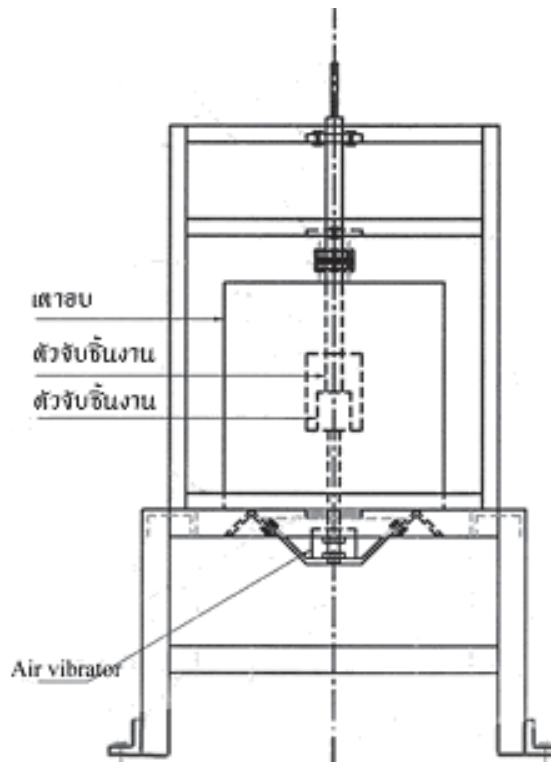
1. เตาอบและชุดควบคุมอุณหภูมิ เพื่อควบคุม อุณหภูมิให้สามารถทดสอบได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่ อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 500 °ซ จึงสามารถใช้ในการ ศึกษากลไกการสึกหรอแบบเฟรตติงได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง สามารถปรับเปลี่ยน อุณหภูมิได้ตามสภาวะทดสอบที่ต้องการ การวัดอุณหภูมิ ทำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ติดไว้บริเวณกลางเตาอบใกล้กับ ชิ้นงาน

2. ส่วนโครงเครื่องและแกนจับชิ้นงาน ประกอบด้วยโครงเครื่องที่แข็งแรงรับน้ำหนักได้มากกว่า 48 กก. และ แกนจับชิ้นงาน 2 ชั้นที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม แกนจับ ชิ้นงานชั้นล่างต่อกับ air vibrator ส่วนแกนจับชิ้นงานชั้น

บนจะมีน้ำหนักดซึ่งสามารถปรับเพิ่มหรือลดน้ำหนักดได้ ชิ้นงานชั้นบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. ชิ้นงานชั้น ล่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มม. ลักษณะเครื่องทดสอบ การสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิสูงแสดงในรูปที่ 3

3. Air vibrator ใช้ความดันลมขับเคลื่อน ลูกบอลในกระบอกหนึ่งศูนย์ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่ง การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทำให้ชิ้นงานชั้นล่างเคลื่อนที่ เสียดลกับชิ้นงานชั้นบน air vibrator รุ่นที่ใช้คือ Quan- tum air vibrator type VP10 ที่สามารถปรับความดัน ลมที่ผ่านเข้า air vibrator เพื่อทำให้วัตถุที่มีน้ำหนักถึง 48 กก. เกิดการสั่นสะเทือนได้

การปรับระยะการเคลื่อนที่และความเร็วการสั่น ทำได้โดยควบคุมความดันลมที่ผ่านเข้า air vibrator แล้ว วัดระยะการเคลื่อนที่และความเร็วในการสั่นสะเทือนด้วย เครื่องวัดการสั่นสะเทือนแบบพกพา Riovibro VM63a ซึ่ง ในงานวิจัยเลือกใช้ระดับความดันลมที่ทำให้ชิ้นงานเกิด การสั่นสะเทือนมีระยะการเคลื่อนที่ใกล้เคียงและไม่เกิน 100 ไมครอน



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิสูง

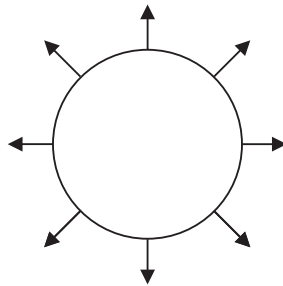
3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในงานวิจัยจะแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มที่ 1 เป็นชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ชนิดแท่งตัน และกลุ่มที่ 2 เป็นชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่พ่นเคลือบด้วย WC-17%Co โดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นรูปเหรียญ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. หนา 5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มม. หนา 5 มม. พ่นเคลือบให้มีความหนาผิวเคลือบประมาณ 0.3-0.4 มม. แล้วขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 500 และ 800 ตามลำดับให้ผิวเคลือบมีความหนาประมาณ 0.25 มม. ชิ้นงานทุกชิ้นจะถูกขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1200 อีกครั้งเพื่อปรับให้มีความหยาบผิวต่ำกว่า 0.8 ไมครอน ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a [10]

3.3 การทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้ง อุณหภูมิ 500 °ซ

การทดสอบการสึกหรอนี้เพื่อทดสอบความสามารถของเครื่องในการจำลองการสึกหรอแบบเฟรตติ้ง

ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 500 °ซ การทดสอบให้ชิ้นงานชนิดเดียวกันเสียดสีกันเอง ความดันลมที่ใช้ขับ air vibrator เท่ากับ 30 psi เพื่อกำหนดความแรงในการสั่นของ air vibrator ที่จะให้ได้ระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นงานไม่เกิน 100 ไมครอน ระยะการเคลื่อนที่และความเร็วการเคลื่อนที่วัดด้วยเครื่อง Riovibro VM63a pocketable vibration meter ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ในช่วง 40-80 ไมครอน ความเร็วการสั่น 3-4 มม./วินาที ใช้น้ำหนักกดในการทดสอบ 6 กก. ซึ่งเป็นน้ำหนักสูงสุดที่โครงสร้างเครื่องทดสอบ (ก้านกด) สามารถรับได้เพื่อเร่งความรุนแรงของการทดสอบ ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของวัสดุต่างๆ วัดจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปจากการทดสอบและลักษณะพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอ ในที่นี้นำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 24 ชม. โดยปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในเตาอบอย่างช้าๆ ทำการทดสอบ ชิ้นงานชิ้นละ 96 ชม. การชั่งน้ำหนักชิ้นงานทำโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง Electronic Precision Balance AND GR-200 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูงเป็นแบบการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานเมื่อมองจากด้านบน
ในเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิสูง

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

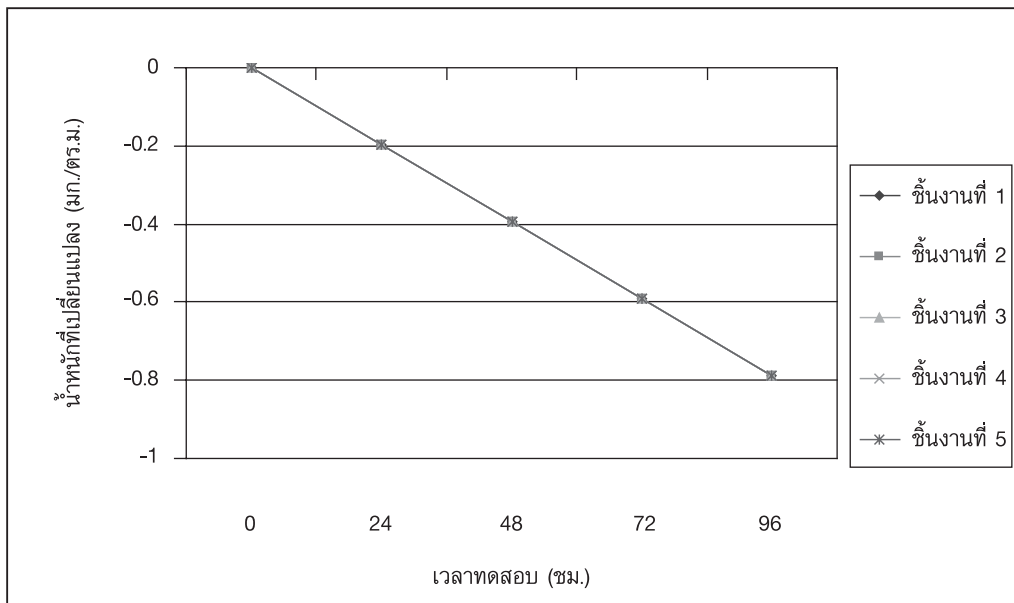
ตัดแบ่งครึ่งภาคตัดขวางชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว นำไปขึ้น เรือนด้วยเรซิน (mounted) และขัดเงา (polished) แล้วตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในการทดลองใช้ JEOL-6301F โดยตรวจสอบด้วย secondary electron mode

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การใช้งานเครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบสามารถคงระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นงานให้อยู่ในช่วง 40-80 ไมครอน ความเร็วการเคลื่อนที่ชิ้นงานช่วง 3-4 มม. ต่อวินาที และความถี่การสั่นสะเทือนที่ 50 เฮิรตซ์ ตลอดเวลา 96 ชม. ของการทดสอบชิ้นงานแต่ละชิ้น อุณหภูมิในการทดสอบคงที่ $500 \pm 1^{\circ}\text{C}$

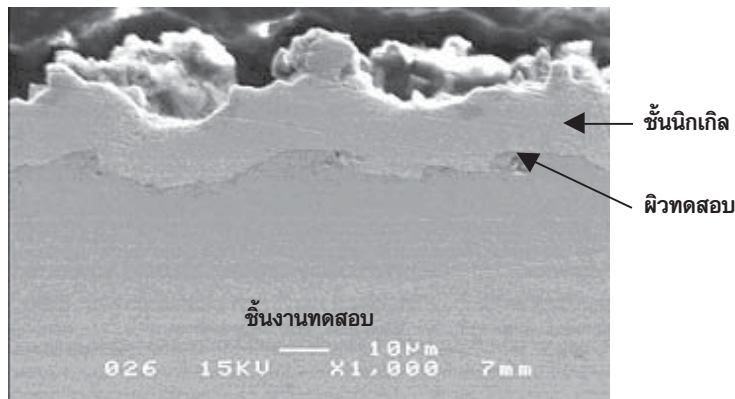
4.2 ผลการตรวจสอบชิ้นงานหลังจากทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม.



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 5 ชิ้นที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม.



รูปที่ 6 เศษจากการสึกหรอที่มีลักษณะกลมและร่องจากการสึกหรอบนผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิม หลังทดสอบการสึกหรอแบบเฟรดตั้งที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม.



รูปที่ 7 ภาคตัดขวางที่ผิวทดสอบของชิ้นงานหลังทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม. ชิ้นงานหลังทดสอบผ่านการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าก่อนการตัดและขัดเพื่อคงสภาพที่ผิว

จากรูปที่ 5 เมื่อสร้างกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานกับเวลาทดสอบ โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง = (น้ำหนักชิ้นงานที่ช่วง ณ เวลาต่างๆ-น้ำหนักชิ้นงานก่อนนำเข้าสู่เตา)/พื้นที่ชิ้นงาน พบว่าจากการทดสอบ 5 ครั้ง ในสภาวะเดียวกัน ผลที่ได้ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องมีการทำการทดลองซ้ำได้ดี ซึ่งน้ำหนักของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมจะลดลงเรื่อยๆ อย่างคงที่จากการสึกหรอ ในการทดสอบการสึกหรอด้วยกลไกที่มีอัตราการสึกหรอต่ำอย่างเช่นการสึกหรอแบบเฟรดตั้งจะพบว่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นผลมาจากการสึกหรอ

(น้ำหนักลดลง) การฝังตัวของอนุภาคหรือ Third body layer (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) และการเกิดฟิล์มออกไซด์ (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) จากการตรวจสอบผิวหน้าด้านบนหลังการทดสอบด้วย SEM ในรูปที่ 6 พบว่าการฝังตัวของเศษจากการสึกหรอน้อยมาก และจากการตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางด้วย SEM ในรูปที่ 7 ไม่พบชั้นออกไซด์ที่ผิวสัมผัสสาเหตุหลักของการเกิดชั้นออกไซด์ในการทดสอบลักษณะนี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิทดสอบที่ 500 °ซ ซึ่งสูงพอที่จะสร้างฟิล์มบางของโครเมียมออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมได้ แต่เนื่องจากผลการทดสอบแสดงการสึกหรอแบบ linear

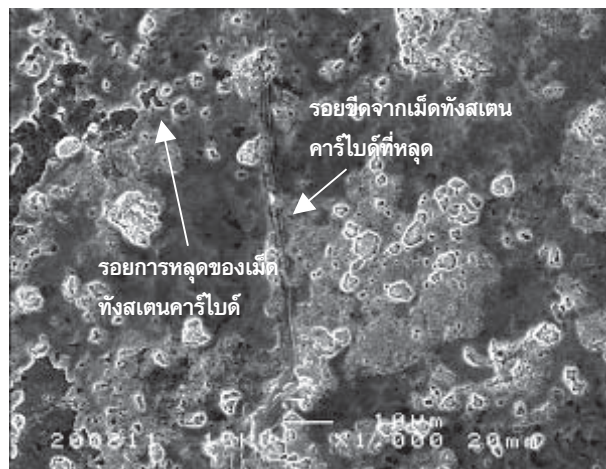
จึงคาดว่ามีการเกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์น้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ด้วย SEM โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับอัตราการเกิดการสึกหรอเนื่องจากเป็นวัสดุค่อนข้างแข็ง

ลักษณะการสึกหรอแสดงในรูปที่ 6 และ 7 กลไกการสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากการเสียดสีกันของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชิ้น ทำให้เกิดการเสียดสีรูปแบบพลาสติก บริเวณที่เสียดสีรูปแบบพลาสติกเมื่อถูกเสียดสีเรื่อยๆ หลุดออกเป็นเศษจากการสึกหรอ (wear debris) แล้วเสียดสีกับชิ้นงานต่อไปในลักษณะ three body abrasive [11] จนผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองมีลักษณะเป็นร่องคลื่น ส่วนเศษจากการสึกหรอจะเสียดสีไปมาจนมีรูปร่างกลม การเตรียมผิวชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแม้มีการขัดจนเรียบมันได้ค่าความหยาบผิว 0.8 ไมครอน Ra ตาม

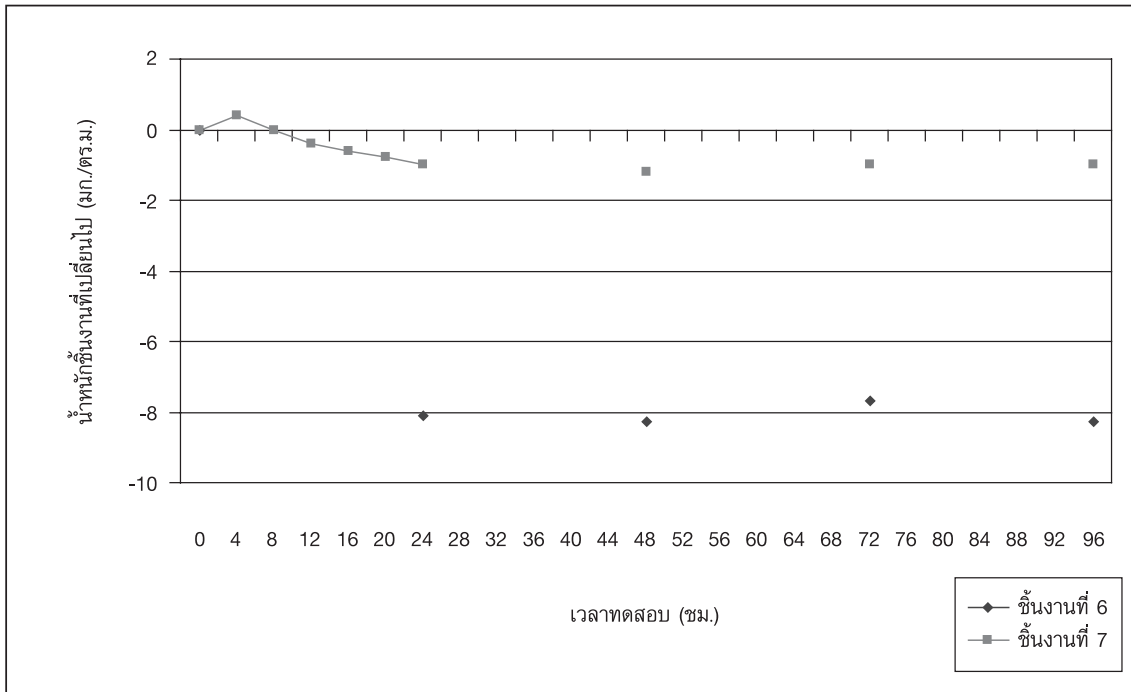
มาตรฐาน ASTM G99-95a แล้ว แต่ในระดับจุลภาคผิววัสดุไม่เรียบสมบูรณ์ ยังคงมีรอยขีดเหลื่ออยู่ การที่ทิศทางเคลื่อนที่ของชิ้นงานขึ้นล่างเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบทุกทิศทางแต่ที่เห็นรอยสึกเป็นร่องไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากอนุภาค oxide debris จะเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าเมื่อเคลื่อนที่ไปตามรอยขีด จึงทำให้ร่องคลื่นจากการสึกหรอเป็นแถบในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงานที่นำมาทดสอบจึงมีผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัส กล่าวคือ ลักษณะความหยาบที่เรียงกันเป็นระเบียบ เช่น ความหยาบที่ได้จากการขัดกระดาษทรายจะกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิสระไปตามแนวนั้น การสึกหรอเป็นร่องคลื่นทำให้ความหยาบผิวของชิ้นงานภายหลังการทดสอบเพิ่มขึ้น ดูตารางที่ 1 ประกอบ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ

ชิ้นงาน	ความหยาบผิวก่อนทดสอบ ($\mu\text{m Ra}$)	ความหยาบผิวหลังทดสอบ ($\mu\text{m Ra}$)
เหล็กกล้าไร้สนิม 304	0.12	1.15
ผิวเคลือบ WC-Co	0.12	0.93



รูปที่ 8 ผิวหน้าของผิวเคลือบ WC-17%Co ที่พื้นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง ผ่านการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติ้งที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม.



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานผิวเคลือบ WC-17%Co ฟันเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอแบบเฟรดตั้ง ที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 96 ชม.

จากรูปที่ 8 ผิวเคลือบ WC-17%Co ที่ฟันเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงมีรอยหลุดของเม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์และมีการสึกหรอลักษณะเป็นรอยขีดจากเม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่หลุดเพราะการเกิดออกซิเดชันและดีคาร์บูไรเซชันที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการรวมตัวเป็น $CoWO_4$ มีผลให้โคบอลต์ที่เป็นตัวประสานเม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์เสียคุณสมบัติในการยึดเกาะไป [12] โคบอลต์ในเนื้อผิวเคลือบจะมีค่า surface energy และ contact angle เปลี่ยนไปทำให้โคบอลต์ที่อยู่ในรูปของ $CoWO_4$ มีความสามารถในการเปียกผิวทั้งสเตนคาร์ไบด์ได้น้อยลง การยึดเกาะไม่ดี เม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์หลุดได้ง่ายขึ้นและกลายเป็น three body abrasive บนผิวชิ้นงาน ซึ่งผลกระทบของเศษจากการสึกหรออิสระที่มีพฤติกรรมเป็น three body abrasive ที่มีต่อการสึกหรอแบบเฟรดตั้งที่อุณหภูมิสูงของผิวเคลือบชนิดนี้แสดงในรูปที่ 9 พบว่าชิ้นงานที่นำออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 4 ชม. (ชิ้นงานที่ 7) มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันและดีคาร์บูไรเซชันที่

อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการรวมตัวเป็น $CoWO_4$ จากนั้นน้ำหนักชิ้นงานลดลงเนื่องจากโคบอลต์เสียคุณสมบัติในการยึดเกาะไปทำให้เม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์หลุดได้ง่ายและกลายเป็น three body abrasive บนผิวชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่นำออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 4 ชม. มีการลดลงของน้ำหนักต่ำกว่าชิ้นงานที่นำออกมาชั่งน้ำหนักทุก 24 ชม. (ชิ้นงานที่ 6) มาก เพราะการล้างชิ้นงานแล้วนำมาชั่งน้ำหนักทุก 4 ชม. เศษจากการสึกหรอที่สะสมมากถูกกำจัดออกในขั้นตอนการล้างชิ้นงาน ชิ้นงานจะมีเวลาในการสะสมเศษจากการสึกหรอน้อยกว่าจึงมีปริมาณเศษจากการสึกหรอสะสมบนผิวหน้าชิ้นงานน้อยกว่าชิ้นงานที่นำออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 24 ชม. เมื่อมีเศษจากการสึกหรอเสียดสีกับชิ้นงานน้อยกว่าการสึกหรอจึงเกิดขึ้นน้อยกว่าชิ้นงานชิ้นที่ชั่งน้ำหนักทุกๆ 24 ชม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษจากการสึกหรอมีผลต่อการสึกหรอแบบเฟรดตั้งและการหยุดเครื่องทดสอบเพื่อชั่งน้ำหนักจะส่งผลต่อผลการทดสอบที่ได้ จึงควรหลีกเลี่ยงการขัดจัดหระระหว่างทดสอบ

5. สรุปผลการทดลอง

1. เครื่องทดสอบสามารถจำลองการสึกหรอแบบเฟรตติงได้ โดยมีระยะเวลาเคลื่อนที่ 40-80 ไมครอน สามารถใช้ในการศึกษาลักษณะและผลกระทบของเศษจากการสึกหรอของวัสดุชนิดต่างๆ สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุชนิดแห้งตันและผิวเคลือบ

2. การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่อการสึกหรอแบบเฟรตติง เนื่องจากทำให้เกิด oxide debris ซึ่งมีส่วนทำให้การสึกหรอแบบเฟรตติงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีพฤติกรรมเป็น three body abrasive ซึ่งเครื่องทดสอบที่ผลิตขึ้นสามารถนำมาศึกษาการสึกหรอที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากความร้อนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดสอบและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดสอบและในการสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเฟรตติงที่อุณหภูมิสูง

7. เอกสารอ้างอิง

1. Roos, J.R., Celis, J.P., and Franck, M., 1991, "Fretting Wear of Carbon-ion Implanted Physical Vapour Deposited TiN Coatings", *Surface and Coating Technology*, Vol. 45, pp. 89-98
2. Fu, Y.Q., Batchelor, A.W., and Loh, N.L., 1998, "Revealing the Hiddenworld of Fretting Wear Processes of Surface Coatings by X-ray Imaging", *Surface and Coating Technology*, Vol. 107, pp. 133-141
3. Kalin, M. and Vizintin, J., 2000, "Use of Equations for Wear Volume Determination in Fetting Experiments", *Wear*, Vol. 237, pp. 39-48

4. Segall, A.E., et al, 1999, "Elevated Temperature Fretting Evaluations using a Flat-on-Flat Configuration", *Tribology Transactions*, Vol. 42, pp. 681-688
5. Freimanis, A.J., et al, 2000, "Elevated Temperature Evaluation of Fretting and Metal Transfer between Coated Titanium Compounds", *Tribology Transactions*, Vol. 43, pp. 653-657
6. Hutchings, I.M., 1992, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, London, p. 230
7. Krueger, F.E., 1975, *Metals Handbook*, American Society of Metals, U.S.A., pp. 154-155
8. Xu, G., et al, 2002, "The Effect of the Third Body on the Fretting Wear Behavior of Coatings", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 11, p. 288
9. Berthier, Y., Vincent, L., and Godet, M., 1989, "Fretting Fatigue and Fretting Wear", *Tribology International*, Vol. 22, No. 4, pp. 235-241
10. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus ASTM G99, 1997, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 3, Vol. 3.02, pp. 392-396.
11. Bayer, R.G., 1994, *Mechanical Wear Prediction and Prevention*, Marcel Dekker, Inc., U.S.A., p. 21
12. Koiprasert, H., Niranatlumpong, P., and Dumrongrattana, S., 2004, "Thermally Sprayed Coatings for Protection of Fretting Wear in Land-based Gas-Turbine Engine", *Wear*, Vol. 257, pp. 1-7