



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนเครื่องทออวนด้วยการเคลือบแข็ง

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชาญณรงค์ สายแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรกฎาคม 2562

สัญญาเลขที่ RSA5980025

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนเครื่องทอวนด้วยการเคลือบแข็ง

ผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. ชานนรงค์ สายแก้ว
สังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

คำนำ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับมหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.) สัญญาเลขที่ RSA 5980025 ภายในระยะเวลาดำเนินงานตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2559 ถึงเดือนมิถุนายน 2562 งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนของเครื่องทออวนให้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างเส้นใยไนลอนและผิวของชิ้นส่วนทออวน เมื่อผิวของชิ้นส่วนเครื่องทออวนมีรอยสึกหรอ ส่งผลให้เกิดขุยขึ้นที่เส้นใยทออวนและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การดำเนินการวิจัยจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นส่วนทออวนทั้งสองแบบคือ ตะขอล่างและตะขอบน โดยทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตตะขอล่างด้วยการเตรียมชิ้นงานก่อนและในขณะทำการชุบฮาร์ดโครม และทำการทดสอบการสึกหรอบนเครื่องทออวนจริง ในขณะที่การปรับปรุงคุณภาพผิวตะขอบนด้วยการเคลือบแข็งด้วย TiN, TiAlSiN, TiCrAlSiN, MoN, MoC และ MoCN และทำการทดสอบการสึกหรอบนเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทผลิตแหวนซึ่งเป็นบริษัทกรณีศึกษาที่ได้กรุณาให้ข้อมูลและให้ความร่วมมือในการเข้าไปทำการวิจัยภายในบริษัท ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานคือ ดร. อนุรัตน์ วิศิษฐ์สรอรรถ จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) รวมทั้งนักวิจัยจากศูนย์ดังกล่าวด้วย งานวิจัยนี้จะสำเร็จไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความร่วมมือจากนักศึกษาปริญญาเอกที่สำเร็จการศึกษาไปแล้วและท่านอื่นๆ ด้วย

ชาญณรงค์ สายแก้ว

กรกฎาคม 2562

สารบัญ

บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
Executive Summary	iii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 จุดประสงค์	3
1.3 ขอบข่ายการศึกษา	3
1.4 แนวทางการดำเนินการวิจัย	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 รูปแบบของการศึกษาหรือ	5
2.2 กระบวนการเคลือบ	6
2.3 การออกแบบการทดลอง	11
2.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อจำแนกทางเดียว	12
2.3.2 การเพิ่มจุดทดลองใน 2^k แฟคตอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	14
2.3.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัว	16
2.3.4 การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	23
3.1 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่าง	23
3.2 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอบน	26
3.2.1 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiN	26
3.2.2 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiAlSiN และ TiCrAlSiN	30
3.2.3 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN	32
บทที่ 4 ผลการวิจัย	35
4.1 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่าง	35
4.1.1 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่างด้วยการออกแบบการทดลอง	35
4.1.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการปรับปรุงตะขอล่าง	44
4.2 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอบน	45
4.2.1 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiN	45
4.2.2 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiAlSiN และ TiCrAlSiN	68
4.2.3 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN	80
4.2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการปรับปรุงตะขอบน	85
บทที่ 5 บทสรุป	89
5.1 ข้อจำกัดในงานวิจัย	91
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	91

เอกสารอ้างอิง	93
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	98
ภาคผนวก	100

บทความวิจัยระดับนานาชาติในฐานข้อมูล ISI

Intanon N. and Saikaew C. (2016). Effect of surface treatments on wear resistance of spring steel wire as a work piece material of a fishing net-weaving machine component, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 23, 79-81.

INDIAN JOURNAL OF ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCES

Impact Factor
0.794 0.963
2018 5 year

JCR ® Category	Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY	71 of 88	Q4
MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	257 of 293	Q4

Data from the 2018 edition of Journal Citation Reports

Publisher
NATL INST SCIENCE COMMUNICATION-NISCAIR, DR K S KRISHNAN MARG, PUSA
CAMPUS, NEW DELHI 110 012, INDIA

ISSN: 0971-4588
eISSN: 0975-1017

Research Domain
Engineering
Materials Science

Close Window

Srisattayakul P., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Phokharatkul D. (2017). Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel. *Wear* 378-379, 96-105.

WEAR

Impact Factor
2.95 3.315
2018 5 year

<i>JCR ® Category</i>	<i>Rank in Category</i>	<i>Quartile in Category</i>
ENGINEERING, MECHANICAL	31 of 129	Q1
MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	104 of 293	Q2

Data from the 2018 edition of Journal Citation Reports

Publisher
ELSEVIER SCIENCE SA, PO BOX 564, 1001 LAUSANNE, SWITZERLAND

ISSN: 0043-1648
eISSN: 1873-2577

Research Domain
Engineering
Materials Science

Close Window

Khanchaiyaphom S., Saikaew C., Wisitsoraat A., and SurinPhong S. (2017). Wear behaviours of filtered cathodic arc deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings on AISI 316 stainless steel fishing net-weaving machine components under dry soft-sliding against nylon fibres. *Wear* 390-391, 146.154.

WEAR

Impact Factor
2.95 3.315
2018 5 year

JCR ® Category	Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, MECHANICAL	31 of 129	Q1
MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	104 of 293	Q2

Data from the 2018 edition of Journal Citation Reports

Publisher
ELSEVIER SCIENCE SA, PO BOX 564, 1001 LAUSANNE, SWITZERLAND

ISSN: 0043-1648
eISSN: 1873-2577

Research Domain
Engineering
Materials Science

Close Window

Srisattayakul P., Saikaew C., and Wisitsoraat A. (2017). Effects of hard chrome and MoN-coated stainless steel on wear behaviour and tool life model under two-body abrasion wear testing. *Metalurgija* 56(3-4), 371-374.

METALURGIJA

Impact Factor
0.959 **0.848**
2014 5 year

JCR ® Category	Rank in Category	Quartile in Category
METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING	29 of 74	Q2

Data from the 2014 edition of Journal Citation Reports

Publisher
CROATIAN METALLURGICAL SOC, BERISLAVICEVA 6, ZAGREB, CROATIA
ISSN: 0543-5846
eISSN: 1334-2576
Research Domain
Metallurgy & Metallurgical Engineering

Close Window

Saikaew C. (2019). Process factors affecting deposition rate of tin coating on a machine component. *Materiali in Tehnologije* 53(3), 409-415.

MATERIALI IN TEHNOLOGIJE

Impact Factor
0.714 **0.71**
2018 5 year

JCR® Category	Rank in Category	Quartile in Category
MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	261 of 293	Q4

Data from the 2018 edition of Journal Citation Reports

Publisher
INST ZA KOVINSKE MATERIALE I IN TEHNOLOGIE, LEPI POT 11, LJUBJANA, 10000, SLOVENIA
ISSN: 1580-2949
eISSN: 1580-3414
Research Domain
Materials Science

Close Window

Khanchaiyaphom S., Saikaew C., and SurinPhong S. Experimental Analysis and Comparative Performance of Ti-Based Coatings on Hard-Chrome Plated Stainless Steel (to be appeared in *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* in 2020).

TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE



Impact Factor
0.644 **0.678**
2018 5 year

JCR ® Category	Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY	78 of 88	Q4

Data from the 2018 edition of Journal Citation Reports

Publisher
UNIV OSIJEK, TECH FAC, TRG IVANE BRLIC-MAZURANIC 2, SLAVONSKI BROD, HR-35000, CROATIA

ISSN: 1330-3651
eISSN: 1848-6339

Research Domain
Engineering

Close Window

บทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (indexed in SCOPUS)

Saikaew C. (2019). Influences of sputtering process factors on wear resistance of TiN coated on a machine component. 503 (1), article number 012023, 12th *International Scientific Conference on Functional Materials and Nanotechnologies*, FM and NT 2018; Radisson Blu Latvia Conference and Spa Hotel Riga; Latvia; 2 October 2018 through 5 October 2018.

Scopus

SearchSourcesAlertsListsHelp▼SciVal»Register>Login▼☰

Source detailsFeedback>Compare sources>

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Scopus coverage years: from 2009 to Present

ISSN: 1757-8981 E-ISSN: 1757-899X

Subject area: Engineering: General Engineering Materials Science: General Materials Science

[View all documents >](#)[Set document alert](#)[Journal Homepage](#)

CiteScore 20180.53 ⓘ

SJR 20180.192 ⓘ

SNIP 20180.531 ⓘ

Saikaew C. (2019). Factors Influencing Hardness of a Coating Material for Coating a Machine Component, *The 9th International Conference on Key Engineering Materials*, Oxford, United Kingdom; 29 March-1 April 2019.

Scopus

SearchSourcesAlertsListsHelpSciValRegisterLogin

Source detailsFeedbackCompare sources

Key Engineering Materials

Formerly known as: Mechanical and corrosion properties. Series A, Key engineering materials

Scopus coverage years: 1982, from 1986 to 1989, 1991, from 1994 to Present

Publisher: Trans Tech Publications Ltd

ISSN: 1013-9826

Subject area: Materials Science: General Materials Science Engineering: Mechanical Engineering
Engineering: Mechanics of Materials

[View all documents >](#)[Set document alert](#)[Journal Homepage](#)

CiteScore 20180.33

SJR 20180.180

SNIP 20180.290

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมทอวนเป็นธุรกิจหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ เครื่องทอวนใช้ผลิตอวนที่มีคุณภาพซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือตะขอทอวนที่มีสองแบบคือตะขอล่างและตะขอบนเพื่อใช้ในการถักทออวน ต้นทุนของตะขอสองและต้องทำการเปลี่ยนบ่อยเนื่องจากเกิดการสัมผัสกันระหว่างตะขอทั้งสองแบบและเส้นใยที่มีความตึง ดังนั้นคุณภาพผิวของตะขอต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้มีความสามารถผลิตอวนที่มีคุณภาพและสามารถยืดอายุการใช้งานของตะขอด้วย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพผิวตะขอของเครื่องทอวนเพื่อปรับปรุงคุณภาพอวน ยืดอายุการใช้งานของตะขอและลดจำนวนตะขอด้วย ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างสามารถกระทำได้จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเตรียมและการชุบฮาร์ดโครมด้วยการออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง ผลการศึกษาพิสูจน์ให้เห็นว่าการผลิตตะขอล่างที่สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของกระบวนการเตรียมและการชุบฮาร์ดโครมสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าการผลิตตะขอล่างที่สภาวะอื่น การปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของตะขอบนทำโดยการศึกษเปรียบเทียบศักยภาพของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ชุบฮาร์ดโครมและเคลือบแข็งด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปรียบเทียบพหุคูณของผลการทดลองวัดค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิวและค่าน้ำหนักที่หายไปก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตะขอบนที่ชุบฮาร์ดโครมและเคลือบแข็งด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าตะขอบนที่ชุบฮาร์ดโครม ในขณะที่ TiAlSiN มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุดตามผลการทดลองวัดค่าน้ำหนักที่หายไปก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ชุบฮาร์ดโครมและเคลือบแข็งด้วย MoN, MoC และ MoCN ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตะขอบนที่ชุบฮาร์ดโครมและเคลือบแข็งด้วย MoN มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ในขณะที่ตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้แย่ที่สุด การศึกษาโครงสร้างก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอสามารถกระทำได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

คำหลัก : ตะขอทอวน การสึกหรอ การเคลือบแข็ง การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Abstract

Fishing net industry is an important business for Thailand economy. Fishing net weaving machine is used to produce quality fishing net. A fishing net weaving machine uses two types of hooks called upper and lower hooks to perform net weaving operation. The costs of the hooks contribute a high fishing net production cost. These hooks must be frequently replaced due to rapid dry sliding wear occurred at non-lubricated contacts between the hooks and high-tension nets during weaving operation. Therefore, this research aimed to improve surface quality of the hooks. Wear resistance of the hooks was investigated in order to increase lifetime and the net product quality, and to reduce the number of hooks required in weaving operation. The wear resistance of lower hook was improved by systematically investigating the influence of hard-chrome plating process factors on the weight loss values and the mechanical properties of the lower hook using design of experiments (DOE) and response surface methodology (RSM). The results proved that the lower hook operating at the optimal operating condition of the hard-chrome plating process factors provided lower weight loss value than that operating at the non-optimal operating conditions. For wear resistance of upper hook improvement, the performances of cast stainless steel, hard-chrome plated cast stainless steel, and TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN hard coating deposited on the hard-chrome plated cast stainless steel were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and multiple comparisons based on the experimental results of hardness, surface roughness and wear tests. The results showed that Ti-based coatings displayed better wear resistance improvement than hard-chrome plating cast stainless steel whereas TiAlSiN coating exhibited the best dry sliding wear resistance with the lowest weight loss value. Moreover, experimental analysis was performed to evaluate the performances of cast stainless steel, hard-chrome plated cast stainless steel, and MoN, MoC and MoCN hard coating deposited on the hard-chrome plated cast stainless steel. The results showed that MoN hard coating deposited on the hard-chrome plated cast stainless steel revealed the best wear resistance while the cast stainless steel exhibited the worst. The scanning electron microscope (SEM) for sliding wear analysis and energy dispersive x-ray spectrometer (EDX) for film coating confirmation were also examined.

Keywords: fishing-net hook, wear, hard coating, design of experiments, analysis of variance

Executive Summary

ตะขอทอววนเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญสำหรับเครื่องทอววน ตะขอทอววนมีสองแบบคือตะขอล่างและตะขอบน ในขณะที่เครื่องกำลังทอววน มีการสัมผัสและเกิดการเสียดสีกันระหว่างเส้นใยที่ทำจากไนลอนและผิวด้านในของตะขอทั้งสองซึ่งก่อให้เกิดการสึกหรอที่บริเวณผิวของตะขอโดยส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอวน เช่น เกิดขุยของเส้นใยเนื่องจากการหลุดของรอยสึกหรอบนตะขอ การสึกหรอของตะขอเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนปลายส่วนโค้งของตะขอเนื่องจากถูกแรงกระทำจากพลังงานกลและพลังงานความร้อนในขณะที่ถักทอซึ่งส่งผลให้บริเวณส่วนปลายดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบางส่วนที่มีความแหลมคม เมื่อกระบวนการทอววนดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง ความคมของรอยสึกหรอบนตะขอจะหลุดกับเส้นใยและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอวนและทำให้อายุการใช้งานของตะขอสั้นลงด้วย ซึ่งผู้ผลิตจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนตะขอใหม่ทั้งหมด การเปลี่ยนตะขอจำเป็นต้องหยุดเครื่องทำให้สิ้นเปลืองทั้งแรงงานและเวลาในการเปลี่ยน ซึ่งเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทั้งในด้านต้นทุนการผลิตและเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตะขอ ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาระบบการสึกหรอของตะขอล่างและตะขอบน

แนวทางการแก้ปัญหาระบบการสึกหรอของตะขอทั้งสองแบบสามารถกระทำได้ด้วยการป้องกันการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานคือ การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการชุบฮาร์ดโครมบนตะขอล่างและการเคลือบแข็งบนตะขอบนด้วย Ti, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยใช้กระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกและการเคลือบแข็งด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทั้งตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม โดยใช้กระบวนการเคลือบแบบ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอริง สมบัติที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะของตะขอคือ ค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิวและค่าน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอทั้งจากการทดสอบบนเครื่องทอววนจริงและเครื่องทดสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design) และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology) ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการเตรียมชิ้นงานตะขอล่างก่อนชุบฮาร์ดโครมและในการชุบฮาร์ดโครมที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขอล่างโดยทดสอบการสึกหรอบนเครื่องทอววนจริง ปัจจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงานก่อนชุบฮาร์ดโครมและในการชุบฮาร์ดโครมคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป การขัดผิวตะขอและเวลาในการชุบฮาร์ดโครม ผลการศึกษาพบว่าความแข็งของตะขอล่างสูงขึ้นเมื่อขึ้นงานผ่านการขัดผิวที่ดีขึ้น สภาวะของระดับปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างดีขึ้น คือทำการขึ้นรูปตะขอล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C โดยทำการขัดผิวตะขอล่างด้วยใยขัดและขัดมันและทำการชุบฮาร์ดโครมในเวลา 40 นาที ถ้าพิจารณาในแง่เศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมแล้ว การขึ้นรูปตะขอล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C กระทำได้ง่าย และเวลาที่ใช้ชุบฮาร์ดโครมก็เป็นระยะเวลาที่ไม่ยาวนานซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพของแรงงานด้วย อายุการใช้งานตะขอล่างเพิ่มขึ้น 83.89% เมื่อใช้ตะขอที่ปรับปรุงกระบวนการผลิตตามผลการวิจัยนี้

การปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนด้วยการเคลือบ TiN โดยใช้กระบวนการเคลือบแบบ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบฐานรองชิ้นงานลาดเอียงโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองที่ใช้เป็นแนวทางหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบ ผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอในระดับที่มีความพึงพอใจอยู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 0.35 A ความดัน 50 Pa และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน 1.5 ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยค่าความพึงพอใจ (desirability function) ผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlaid contour plot) และผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (propagation of error) โดยที่ให้ค่า

ความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า 5% และ 57% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทั้งสองที่สถานะจุดกึ่งกลางของปัจจัย (กระแสไฟฟ้า 0.35 A ความดัน 70 Pa และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน 1.0)

การปรับปรุงคุณภาพของตะขอนด้วยการเคลือบ TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยใช้กระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโธดิก โดยทำการทดสอบการสึกหรอจากเครื่องทดสอบการสึกหรอที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา ซึ่งผ่านการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะเวลา 840 นาที ผลการศึกษาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณโดยใช้วิธี least significant difference ของข้อมูลค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิวและค่าน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบการสึกหรอของตะขอนพบว่า ตะขอนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตะขอนรูปแบบอื่นๆ

การปรับปรุงคุณภาพของตะขอนด้วยการเคลือบ MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทับตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม โดยใช้กระบวนการเคลือบแบบ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอริงและทำการทดสอบการสึกหรอโดยใช้เครื่องทดสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM G133-05 ซึ่งผ่านการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะเวลา 240 นาที พบว่า ตะขอที่ชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบด้วย MoN มีอายุการใช้งานและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า

บทที่ 1 บทนำ

อวน (fishing net) เป็นผลิตภัณฑ์ประมงที่ได้จากกระบวนการทอเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ประเภทไนลอน (polyamide) ให้มีลักษณะเป็นผืนตาข่ายสำหรับใช้ล่อจับสัตว์น้ำ กลุ่มผู้ใช้คือเรือลากอวนในอุตสาหกรรมประมง กระบวนการผลิตอวนเริ่มต้นจากการคัดเลือกเม็ดไนลอนที่มีคุณภาพ จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการชักใยหรือการปั่นหลอม โดยเม็ดไนลอนถูกส่งเข้าเครื่องปั่นหลอม แล้วทำการฉีดผ่านหัวฉีด และดึงยืด (drawing) เพื่อผลิตเป็นเส้นใยชนิดเส้นยาวเดี่ยวเรียกว่าเส้นใยโมโนฟิลาเมนต์ (monofilament fiber) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เส้นใยส่วนหนึ่งถูกส่งไปยังกระบวนการตีเกลียวซึ่งจะเป็นการนำเส้นใยชนิดเส้นยาวเดี่ยวหลายๆ เส้นมาบิดเป็นเกลียวเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องตีเกลียว ในขั้นตอนนี้เส้นใยจะเปลี่ยนลักษณะเป็นเส้นยาวกลุ่ม (multifilament fiber) ที่มีความแข็งแรงขึ้น จากนั้นเส้นใยแต่ละประเภทจะถูกม้วนเก็บในแกนหลอดด้ายเพื่อรอเข้าสู่กระบวนการทออวน (weaving) ด้วยเครื่องทออวน (fishing-net weaving machine) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.2 อวนที่ทอเสร็จแล้วจะถูกนำไปย้อมสีและอบเพื่อให้มีผิวเรียบและจะทำการตรวจสอบเพื่อให้มีความแข็งแรง ทนทาน ยืดหยุ่นและมันวาวซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานก่อนบรรจุหีบห่อส่งจำหน่ายต่อไป

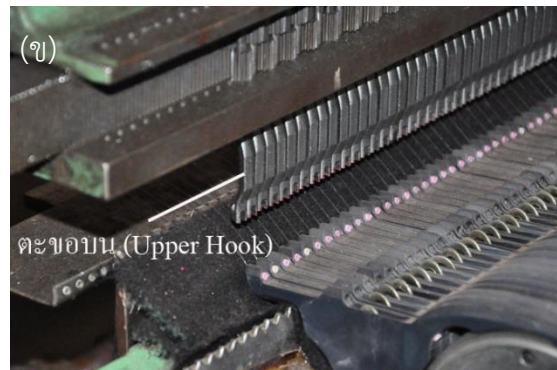


รูปที่ 1.1 เส้นใยชนิดโมโนฟิลาเมนต์ที่ใช้สำหรับทออวน

ตะขอทออวน (weaving hook) เป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญสำหรับเครื่องทออวน ตะขอทออวนมีสองแบบคือ ตะขอล่าง (lower hook) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3(ก) และตะขอบน (upper hook) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3(ข) ตะขอล่างผลิตจากเหล็กกล้าสปริง JIS G 3522-1991 SWP-A ($C = 0.60-0.95\%$ wt, $Si = 0.12-0.32\%$ wt, $Mn = 0.3-0.9\%$ wt) และผ่านกระบวนการชุบฮาร์ดโครม ในขณะที่ตะขอบนผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านกระบวนการชุบฮาร์ดโครมด้วยเช่นกัน เครื่องทออวนแต่ละเครื่องมีตะขอบนและตะขอล่างในจำนวนที่เท่ากันโดยเฉลี่ย 460-700 ชิ้นขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องทออวน ปัจจุบันต้นทุนการผลิตตะขอบนประมาณ 80 บาทต่อชิ้นและตะขอล่างประมาณ 5 บาทต่อชิ้น



รูปที่ 1.2 เครื่องทอวน



รูปที่ 1.3 ตะขอเครื่องทอวน (ก) ตะขอล่าง (ข) ตะขอบน

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การสัมผัสระหว่างเส้นใยในล่อนและผิวด้านในของตะขอก่อให้เกิดการสึกหรอที่บริเวณผิวของตะขอซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดขุยของเส้นใยเนื่องจากการขีดของรอยสึกหรอบนตะขอ การสึกหรอของตะขอเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนปลายส่วนโค้งของตะขอเนื่องจากถูกแรงกระทำจากพลังงานกลและพลังงานความร้อนในขณะถักทอซึ่งส่งผลให้บริเวณส่วนปลายดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบางส่วนที่มีความแหลมคม เมื่อกระบวนการทอวนดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ความคมของรอยสึกหรอบนตะขอจะขีดกับเส้นใยและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการทอและทำให้อายุการใช้งานของตะขอสั้นลงด้วย ซึ่งผู้ผลิตจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนตะขอใหม่ทั้งหมด การเปลี่ยนตะขอต้องหยุดเครื่อง โดยใช้พนักงานเปลี่ยนตะขอจำนวน 3 คนและใช้เวลาในการเปลี่ยนโดยเฉลี่ยประมาณ 2 ชั่วโมง นับเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทั้งในด้านต้นทุนการผลิตและเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตะขอ ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาการสึกหรอของตะขอ

ปัจจุบันผู้ผลิตใช้การชุบฮาร์ดโครมบนตะขอทอวนเนื่องจากการชุบฮาร์ดโครมทำให้ผิวมีลักษณะเรียบลื่นมันเงาและไม่เป็นสนิมซึ่งสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้ แต่การชุบผิวด้วยวิธีนี้มีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิว เช่น ความเรียบของผิวชิ้นงาน ความสะอาดของผิวชิ้นงาน การเตรียมชิ้นงานก่อนการชุบ กระบวนการชุบและอื่นๆ ซึ่งผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ทำให้ผิวเคลือบมีความหนาและมีความเรียบแตกต่างกัน อาจส่งผลกระทบต่อความต้านทานการสึกหรอที่แตกต่างกันด้วย การชุบฮาร์ดโครมสามารถสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพผู้ปฏิบัติงานเป็นอย่างมาก กล่าวคือสารละลายที่ใช้ในการชุบฮาร์ดโครมได้แก่ กรดซัลฟูริกและกรดฟอสฟอริกมีผลต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งยังมีโครเมียมและสารประกอบโครเมียมที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตด้วย

การเคลือบผิววัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่ผิวของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการใช้งาน วิธีการปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญคือ เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบาง (thin film) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความสามารถในการสร้างชั้นผิวเคลือบที่บางมากในระดับไมครอนได้ การเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำและควบคุมความหนาของชั้นผิวเคลือบได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบใหม่ทดแทนได้แก่ การเคลือบในสุญญากาศ (vacuum coating) การเคลือบนี้กระทำในสุญญากาศโดยไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเคลือบ การเคลือบในสุญญากาศสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (1) การเคลือบผิวเชิงเคมี (chemical vapor deposition, CVD) ซึ่งอาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิววัสดุและ (2) การเคลือบผิวเชิงฟิสิกส์ (physical vapor deposition, PVD) ซึ่งอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ (substrate)

1.2 จุดประสงค์

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวของตะขอทอวนทั้งสองแบบให้มีความสามารถต้านทานการสึกหรอโดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยของกระบวนการชุบฮาร์ดโครมต่อการสึกหรอของตะขอล่างด้วยการศึกษาการสึกหรอจากเครื่องทอวนจริง ส่วนการปรับปรุงตะขอบนเป็นการศึกษาผลกระทบของการเคลือบด้วยสารเคลือบ TiN, TiAlSiN, TiCrAlSiN, MoN, MoC และ MoCN ต่อการสึกหรอและสมบัติอื่นๆ เช่น ความแข็งและความหยาบผิว

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

- การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการสึกหรอแบบลื่นไถล ที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างวัสดุที่แข็งได้แก่ ตะขอล่างและตะขอบนของเครื่องทอวนที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวแบบต่างๆ กับเส้นใยไนลอน ลักษณะของการเสียดสีเป็นแบบลื่นไถลในสภาวะแห้ง โดยส่วนที่เป็นตะขอจะอยู่หนึ่งกับที่และเส้นใยจะไถลผ่านตะขอที่ระดับแรงดึงและความเร็วในการไถลผ่านคงที่
- วัสดุ เช่น ตะขอทอวนและเส้นใยไนลอนได้จากโรงงานกรณีศึกษา
- การทดสอบการสึกหรอของตะขอล่างใช้เครื่องทอวนจริงในโรงงานกรณีศึกษา ส่วนการทดสอบการสึกหรอของตะขอบนใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอที่ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่
- การวัดจากการทดสอบการสึกหรอใช้น้ำหนักที่หายไปซึ่งคำนวณจากน้ำหนักของตะขอก่อนและหลังจากการทดสอบการสึกหรอ

1.4 แนวทางการดำเนินการวิจัย

ตะขอล่าง

- เตรียมตะขอล่างที่ผ่านกระบวนการขัดผิวและทำการชุบฮาร์ดโครมแล้วทำการทดสอบความแข็ง และการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบจริงโดยปฏิบัติตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design)
- วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology, RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการชุบฮาร์ดโครม
- ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตะขอล่างก่อนและหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ
- ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตะขอบน

- เตรียมตะขอบนเพื่อเคลือบด้วย TiN แล้วทำการทดสอบความแข็ง และการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องที่ออกแบบและประดิษฐ์โดยปฏิบัติตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง
- วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตะขามีความสามารถในความต้านทานการสึกหรอได้อย่างเหมาะสม
- ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตะขอบนก่อนและหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ
- ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
- เตรียมตะขอบนเพื่อเคลือบด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN แล้วทำการทดสอบความแข็ง ความหยาบผิว และการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องที่ออกแบบและประดิษฐ์โดยปฏิบัติตามแผนการทดลองอย่างง่าย
- วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA)
- เปรียบเทียบพหุคูณ (multiple comparisons) เพื่อพิจารณาความแตกต่างของความแข็ง ความหยาบผิว และค่านำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ย
- ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตะขอบนก่อนและหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ
- ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
- เตรียมตะขอบนเพื่อเคลือบด้วย MoN, MoC และ MoCN แล้วทำการทดสอบความแข็ง ความหยาบผิว และการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องที่ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นมา
- วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติ
- ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตะขอบนก่อนและหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ
- ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

หมายเหตุ รายละเอียดแนวทางการดำเนินการวิจัยจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- อายุการใช้งานของตะขอล่างและตะขอบนยาวนานขึ้น
- ผลิตภัณฑ์ประเภทแหวนมีคุณภาพตามมาตรฐาน
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ เพื่อลดการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอทอวนแบบตะขอบนและตะขอล่าง ความรู้พื้นฐานที่นำเสนอได้แก่ รูปแบบของการสึกหรอ กระบวนการเคลือบ เครื่องมือที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์

2.1 รูปแบบของการสึกหรอ

การสึกหรอหมายถึงการสูญเสียเนื้อสารจำนวนหนึ่งออกไปจากชิ้นงาน ซึ่งมีรูปแบบหลายประการและมักจะเกิดร่วมกัน การสึกหรอเกิดจากผิววัสดุหนึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวอีกวัสดุหนึ่งรวมไปถึงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของผิววัสดุเนื่องจากมีแรงมากระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับผิววัสดุ (Rabinowicz, 1995) ในขณะที่ Stachowiak and Batchelor (2006) กล่าวว่า การสึกหรอเป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูกแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิววัสดุหนึ่งซึ่งทำให้อัตราการเกิดการเคลื่อนย้ายตัวจนเสียรูปร่างอย่างถาวร การสึกหรอจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ความเร็วของการสัมผัสระหว่างผิว ลักษณะของแรงที่มากระทำ โครงสร้างจุลภาคของผิววัสดุ ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ความหยาบผิว ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างผิว เป็นต้น Kalin et al. (2002) กล่าวว่าเมื่อความหยาบผิวและเวลาในการทดสอบการสึกหรอ (ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างผิว) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ Kellermann et al. (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของความหยาบผิวของชิ้นงานที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอ การสึกกร่อนและการหล่อลื่น (tribology) ของโลหะทนความร้อน โดยพบว่าพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของผลิตภัณฑ์บริเวณผิวให้อัตราการสึกหรอแตกต่างกัน ซึ่งผิวที่หยาบกว่าจะมีการสึกหรอที่มากกว่าเนื่องจากผิวที่หยาบกว่ามีบริเวณสัมผัสกันน้อยกว่าและมีแรงกระทำต่อพื้นที่สัมผัสสูงกว่าจึงทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่า หากอนุภาคที่เกิดจากการสึกหรอยังอยู่ในบริเวณสัมผัสจะส่งผลให้อนุภาคนั้นทำหน้าที่เป็นผงขัดทำให้การสึกหรอเกิดเร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น Pena et al. (2006) ศึกษาผลกระทบของแรงที่มากระทำและความเร็วของการสัมผัสระหว่างผิวที่มีผลต่อการสึกหรอแบบสัมผัสแห้ง (dry sliding wear) ของโลหะผสม CuZnAl โดยพบว่า น้ำหนักที่หายไป (การสึกหรอ) กับแรงที่มากระทำมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความสัมพันธ์กับแรงที่มากระทำแบบ exponential นอกจากนี้เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปกับความเร็วของการสั่นไถลพบว่า น้ำหนักที่หายไปกับความเร็วของการสั่นไถลมีความสัมพันธ์แบบ exponential

รูปแบบของการสึกหรอสามารถจำแนกตามสาเหตุของการเกิดได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

การสึกหรอแบบยึดติด (adhesive wear) เกิดจากการที่ผิวของชิ้นงานเสียดสีกัน และเกิดการหลุดร่อนออกมาเป็นอนุภาคขนาดเล็กอยู่ระหว่างผิวสัมผัส เมื่อมีความร้อนและความดันที่เหมาะสมจะทำให้อนุภาคลวมและยึดติดกับชิ้นงานใดชิ้นงานหนึ่ง โดยทั่วไปจะยึดติดกับชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่า เมื่อบริเวณดังกล่าวได้รับแรงกดหรือแรงกระทำก็จะหลุดออกและทำให้เนื้อของชิ้นงานหลุดออกมาด้วย

การสึกหรอแบบขัดสี (abrasive wear) เกิดจากการที่มีชิ้นส่วนของแข็งขนาดเล็กแตกหักหลุดเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสและครูดไถไปบนผิวหน้าของชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง การสึกหรอที่เกิดจากการแตกหักของชิ้นงานเองนี้เรียกว่า two-body abrasive wear แต่ถ้าของแข็งขนาดเล็กที่มาจากภายนอกและหลุดเข้าไปในบริเวณสัมผัสและทำให้เกิดการสึกหรอ จะเรียการสึกหรอนี้ว่าเป็น three-body abrasive wear

การสึกแบบแตกหัก (fatigue wear) เกิดจากการที่ชิ้นงานได้รับแรงกระทำในลักษณะกลับไปกลับมาหลายครั้ง และทำให้ชิ้นงานบริเวณนั้นแตกหัก การสึกหรอแบบนี้สังเกตได้จาก บริเวณที่เกิดการสึกหรอจะเป็นรอยลึกและเกิดรอยแตกขนาดใหญ่ การสึกหรอแบบแตกหักนี้จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายมากกว่าการสึกหรอแบบอื่น (Costa et al., 2010)

นอกจากการสึกหรอใน 3 รูปแบบข้างต้นแล้ว ยังมีรูปแบบของการสึกหรอที่สำคัญอีกรูปแบบหนึ่งคือ การสึกหรอที่เกิดจากการไถลผ่าน (sliding wear) การสึกหรอแบบนี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานค่อนข้างสูง การตรวจสอบการสึกหรอทำได้ยาก และมักจะเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันของวัสดุ 2 ชนิดที่มีความแข็งไม่เท่ากันโดยวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าจะไถลผ่านวัสดุที่มีความแข็งกว่า เมื่อระยะของการเสียดสีมีค่ามากหรือระยะเวลาของการเสียดสีนานๆ จะทำให้วัสดุที่แข็งกว่ามีการสึกหรอได้ กลไกการสึกหรอแบบนี้เกิดจากวัสดุ 2 ชนิดมีการเคลื่อนที่ผ่านกัน แรงที่มากระทำในขณะที่เคลื่อนที่มีทั้งแรงในแนวตั้งฉาก (normal force) และแรงในแนวการเคลื่อนที่ (tangential force) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเค้น (stress) ที่ผิวสัมผัส และความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุทั้งสอง ความเค้นและความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอ ดังนั้นสรุปได้ว่ากลไกการสึกหรอ (wear mechanism) ของการสึกหรอแบบนี้คือ มีแรงกด (pressure) และ ความเร็วของการไถลผ่าน (sliding speed) กระทำต่อชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นบริเวณสัมผัส อุณหภูมิที่จุดสัมผัสเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดการสึกหรอ การสึกหรอแบบไถลผ่านมีความรุนแรง 2 ระดับ ระดับแรกเรียกว่า การสึกหรอเล็กน้อย (mild wear) การสึกหรอแบบนี้ขนาดของอนุภาคหลุดออกมาซึ่งมีขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ โดยที่ผิวของชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอมีลักษณะเรียบ การสึกหรอระดับที่สองคือการสึกหรอแบบรุนแรง (severe wear) การสึกหรอแบบนี้ อนุภาคที่หลุดออกมามีขนาด $10\ \mu\text{m}$ - $100\ \mu\text{m}$ หรือผิวที่เสียหายมีขนาด $1\ \text{mm}^2$ การสึกหรอแบบลื่นไถลขั้นรุนแรงและการสึกหรอแบบลื่นไถลขั้นเล็กน้อยมีลักษณะการเกิดที่เหมือนกันคือเกิดจากการไถลของโลหะบนโลหะ ซึ่งก่อให้เกิดเศษโลหะหลุดออกจากผิว รายละเอียดของรูปแบบการสึกหรอสามารถศึกษาได้จาก ปนัดดาและคณะ (2547)

การป้องกันการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอะตอมธาตุต่างๆ ลงในสารละลายแข็ง และการใช้วัสดุใหม่ (Santecchia et al., 2015) หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ป้องกันการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลคือการเคลือบแข็ง

2.2 กระบวนการเคลือบ

การเคลือบเป็นการป้องกันการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเนื่องจากมีแรงยึดเกาะอย่างเหนียวแน่นระหว่างสารเคลือบและผิวของชิ้นส่วนทำให้เกิดความยากในการสูญเสียเนื้อสารจำนวนหนึ่ง

ออกไปจากชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การเคลือบผิวเชิงฟิสิกส์ เช่น วิธีสปัตเตอร์ริง การเคลือบด้วยไอจากการอาร์กในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโทดิก

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (electroplating)

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการเคลือบผิวโลหะที่นิยมกันแพร่หลายซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถควบคุมความหนาบางของโลหะที่เคลือบได้เป็นอย่างดี ผิวเคลือบมีความเรียบสม่ำเสมอ แผ่นโลหะสามารถบดองได้โดยไม่แตกร้าว โลหะที่นิยมนำมาเคลือบด้วยวิธีนี้ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล ทอง เงิน ดีบุก สังกะสี และอื่นๆ การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้ใช้ชิ้นงานที่จะนำโลหะอื่นมาเคลือบเป็น cathode (ขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า) ส่วนตัวโลหะที่จะถูกเคลือบจะเป็น anode (ขั้วลบต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า) ส่วนสารละลายก็จะมีเกลือของโลหะนั้นๆ ละลายอยู่ เมื่อเริ่มทำการชุบเคลือบผิว สารละลายจะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก และอีกส่วนหนึ่งจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่ขั้ว cathode ทำให้เกิดผิวใหม่ขึ้นมา และส่วนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่ขั้ว anode ซึ่งทำให้ประจุบวกหลุดออกมาอยู่ในสารละลายและทำให้ความเข้มข้นของสารละลายคงที่อยู่เสมอ การควบคุมการเคลือบผิวโลหะให้ได้ผลดีจะต้องทำให้โลหะที่เคลือบติดแน่นและสม่ำเสมอโดยจะต้องควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของการดำเนินงาน นอกจากนั้นต้องควบคุมสัดส่วนของพื้นที่ anode ต่อพื้นที่ cathode เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว รวมทั้งอุณหภูมิของสารละลายด้วย โดยทั่วไปแล้วความหนาของโลหะที่เคลือบผิวจะแตกต่างกันไป เช่น การเคลือบด้วยโครเมียมจะมีความหนาประมาณ 0.25-1.25 μm ในขณะที่การเคลือบด้วยนิกเกิลจะมีความหนาประมาณ 7.5-50 μm เป็นต้น ทั้งนี้ทั้งนั้น ก็ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นๆ เช่น การชุบโครเมียมอุตสาหกรรมจะชุบให้มีความหนาประมาณ 50 μm เพื่อป้องกันการสึกหรอและเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของวัสดุ

การเคลือบผิวเชิงฟิสิกส์ (physical vapor deposition, PVD)

การเคลือบผิวเชิงฟิสิกส์เป็นการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ (substrate) กระบวนการเคลือบผิวเชิงฟิสิกส์แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ การทำให้เป็นไอด้วยความร้อน (thermal evaporation) สปัตเตอร์ริง (sputtering) และการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (arc vapor deposition) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวิธีสปัตเตอร์ริงและการเคลือบด้วยไอจากการอาร์กในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโทดิก (filtered cathodic vacuum arc deposition)

- สปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริง (sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ เนื่องจากในการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการนี้ทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้ความหนาฟิล์มตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตโดยใช้กระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ (glow discharge)

ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC magnetron sputtering) เป็นต้น กระบวนการสปัตเตอร์ริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้กระบวนการโกล์ดิสซาร์จมากกว่าเนื่องจากป็นไอออนของการใช้ล้าอนุภาคจากป็นไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ

ปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการสปัตเตอร์ริงคือ อัตราของการเคลือบผิวหรือความหนาของผิวเคลือบและสมบัติทางกลของผิวเคลือบ อัตราการเคลือบคือการเพิ่มความหนาของผิวเคลือบต่อหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อพิจารณาจากกลไกและสภาพแวดล้อมของการเคลือบ อัตราการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงนี้ขึ้นกับปริมาณของอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ (target) และสภาพการเคลื่อนที่ของอะตอมที่หลุดออกมาไปยังชิ้นงาน (substrate) ถ้าอะตอมของเป้าสปัตเตอร์ริงออกมาได้มากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานได้สะดวก จะเป็นผลทำให้อัตราการเคลือบสูง นั่นคืออัตราการเคลือบขึ้นกับกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ ความดันก๊าซของการดิสซาร์จ ลักษณะของระบบการเคลือบฟิล์มบาง พลังงานและมวลของไอออนที่ใช้ชนเป้า ลักษณะโครงสร้างผลึกของเป้าสารเคลือบ มุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ รวมทั้งระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ

- การเคลือบด้วยไอจากการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโธดิก

การเคลือบผิวด้วยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโธดิกเป็นการตกตะกอนเพื่อสังเคราะห์สารหรือเพื่อการเคลือบผิวด้วยการใช้ไอที่ได้จากการอาร์คแล้วเปลี่ยนสภาพวัสดุที่ขั้วแคโทดให้กลายเป็นไอพลาสมา โดยไอเหล่านี้จะควบแน่นกลายเป็นตะกอนของสารสังเคราะห์หรือเป็นผิวเคลือบบางบนผิวของชิ้นงาน วิธีการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโธดิกสามารถใช้ผลิตสารสังเคราะห์และผิวเคลือบที่เป็นโลหะ เซรามิก และวัสดุเชิงประกอบ กระบวนการเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นให้เกิดการอาร์คบนผิวของแคโทด (เรียกว่าเป้าสารเคลือบหรือ target) การอาร์คเหล่านี้จะเกิดที่ความต่างศักย์ต่ำแต่มีกระแสสูงซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณจุดเล็กๆ ที่มีความกว้างของจุดเพียงไม่กี่ไมโครเมตรแต่พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาสูงมากซึ่งจะเรียกจุดนี้ว่าจุดอาร์ค หรือ cathode spot จุดเหล่านี้มีอุณหภูมิสูงมากซึ่งอาจสูงมากถึง 15,000 องศาเซลเซียส เพียงพอที่จะทำให้แคโทดกลายเป็นไอพลาสมาและพุ่งออกมาเป็นสายด้วยความเร็วสูง เมื่อแคโทดระเหยออกไปแล้วพื้นผิวบริเวณนั้นจะกลายเป็นหลุมแทน (target จะสึกกร่อนไป) อย่างไรก็ตามจุดอาร์คจะคงอยู่เพียงชั่วครู่เดียว จากนั้นจะสลายไปและเกิดจุดอาร์คใหม่ขึ้นมาในบริเวณที่ใกล้เคียงกับหลุมที่เกิดจุดอาร์คก่อนหน้านี้ พฤติกรรมเหล่านี้จะทำให้ดูเหมือนว่าจุดอาร์คมีการเคลื่อนที่ไปโดยรอบแคโทด การเคลื่อนไหวของจุดอาร์คสามารถควบคุมได้โดยการเหนี่ยวนำในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากจุดอาร์คคือตัวนำไฟฟ้าที่ดี วิธีนี้จะใช้เพื่อควบคุมให้เกิดการอาร์คไปโดยทั่วถึงตลอดผิวหน้าของ target

การอาร์คจะมีความเข้มข้นของพลังงานสูงยิ่งยวดและส่งผลให้ระดับการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณนั้นสูงมาก ซึ่งทำให้ได้ไอออนที่มีประจุต่างกันเกิดอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า กลุ่มก้อนอนุภาคหรืออนุภาคขนาดใหญ่ (macro-particle หรือ droplet) หากมีการใช้ก๊าซที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนการอาร์คของแคโทดนี้ ลำของไอออนจากการอาร์คจะกระตุ้นให้ก๊าซของปฏิกิริยานั้นแตกตัวกลายเป็นไอออนและกระตุ้นระดับพลังงานของก๊าซซึ่งทำให้ก๊าซเหล่านั้นสามารถทำปฏิกิริยากับไอพลาสมาของแคโทดแล้วเกิดเป็นผิวเคลือบที่เป็นวัสดุเชิงประกอบได้ (Paldey and Deevi, 2003)

การเคลือบผิวด้วยวิธีการอาร์คของแคโทดนี้มักใช้ในการเคลือบผิวให้มีความแข็งสูงเพื่อต้านทานการสึกหรอและเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดรวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ผิวเคลือบที่สามารถผลิตได้โดยกระบวนการแคโธดิกอาร์คนั้นมีมากมาย เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) อลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlCrTiN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) และอะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (AlCrTiSiN) เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว

งานวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมการตัดเฉือนโลหะด้วยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (computer numerical control) เช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ เป็นต้น นอกจากนี้ การเคลือบผิวบนชิ้นส่วนเครื่องจักรกลถือว่าการป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าด้วยโครเมียมหรือการชุบฮาร์ดโครมเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการสึกกร่อนและการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น การชุบโครเมียมไนไตรด์และโครเมียมคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าออสเทนไนติก (austenitic Fe-30.6Mn-6.8Al-0.9C) (Lee, 2005) การป้องกันการสึกกร่อนของท่อส่งน้ำมัน (oil casting tube) ด้วยโครเมียมไนไตรด์และโครเมียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็ก P110 (Lin et al., 2012) ซึ่งมีความสามารถป้องกันการสึกกร่อนได้ดีกว่าที่ไม่ได้ชุบฮาร์ดโครมแต่อย่างใด ความหนาของการชุบฮาร์ดโครมก็มีผลกระทบต่อความสามารถในความต้านทานการสึกกร่อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของการชุบฮาร์ดโครม เช่น อัตราส่วนของกรดซัลฟริกและกรดโครมิก เวลาในการชุบฮาร์ดโครม และอุณหภูมิในการชุบ (Bayramoglu et al., 2008) เป็นต้น

นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการเคลือบเครื่องมือตัดเฉือนด้วย TiN Chatterjee (1992) กล่าวถึงวิวัฒนาการการเคลือบด้วยวิธีการต่างๆ ของการเคลือบ TiN บนเครื่องมือตัดเฉือนในกระบวนการกลึง กัด เจาะและกระบวนการอื่นๆ การเคลือบ TiN บนเครื่องมือตัดเฉือนช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ปรับปรุงผิวชิ้นงาน ลดการใช้พลังงานในการตัดเฉือนโดยที่ต้นทุนการเคลือบ TiN มีราคาไม่แพงมากนัก (Hanafi et al., 2012; Saravanan et al., 2015) TiN ยังมีสมบัติที่ดีด้านความแข็งซึ่งถือว่าเป็นผลดีในด้านความสามารถต้านทานการสึกหรอ ผิวเคลือบของ TiN จะมีความแข็งสูง มักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างในกระบวนการเคลือบ เช่น ความหนาแน่นของกระแส (current density) พลังงานที่ใช้ในการดึงอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุล (ion energy) อุณหภูมิในการเคลือบ อัตราส่วนของแก๊สที่ไหลเข้าในห้องเคลือบ (Wolfe and Singh, 1999) ความแข็งของวัสดุที่ถูกเคลือบ (Polok-Rubiniec et al., 2007) เป็นต้น ความแข็งของ TiN มีค่าสูงถึง 37 GPa เมื่อทำการเคลือบด้วยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์ เนื่องจากแผ่นเคลือบ TiN มีความเค้นอัดหรือความเค้นแรงกด (compressive stress) สูงซึ่งเป็นผลมาจากการหน่วงไม่ให้เกิดการแพร่กระจายการแตกร่อนและทำให้ค่าความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ของแผ่นเคลือบดีขึ้น (Martin et al., 1999) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในความคงทนต่อการสึกหรอ ความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน และสมบัติทางด้านชีวการแพทย์ของวัสดุ Ti และ TiN แล้ว Uddin et al. (2019) กล่าวว่า TiN มีความสามารถในการคงทนต่อการสึกหรอ 4 เท่าของ Ti ในขณะที่มีความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนถึง 8 เท่าของ Ti นอกจากนี้ความแข็งจะมีผลกระทบต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอแล้ว Stallard et al. (2006) กล่าวว่าสมบัติด้านความแข็งแรงในการยึดแนบติด (adhesion strength) ระหว่าง TiN และผิวของชิ้นงานก็มีความสำคัญไม่น้อย Gerth and Wiklund (2008) พบว่าสมบัติด้านความแข็งแรงในการยึดแนบติดขึ้นกับความแข็งระหว่างวัสดุยึดติด เช่น Ti, W, Mo, Cr เป็นต้น และความแข็งของชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าอบสูง ASP 2060 ซึ่งถ้ามีความแข็งใกล้เคียงกัน จะทำให้มีสมบัติด้านความแข็งแรงในการยึดแนบติดดีมากและส่งผลให้ความสามารถในความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นด้วย ในขณะที่ Shah et al. (2017) รายงานว่าอายุการใช้งานของวัสดุด้านชีวการแพทย์ที่ใช้ TiN มีอายุยาวขึ้นจากการสึกหรอ ถ้าความแข็งแรงในการยึดแนบติดมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะทำการเคลือบให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

วัสดุเคลือบ TiN ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการเคลือบผิวชิ้นงานเพื่อต้านทานการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานของชิ้นงาน เช่น แบริ่ง (Vera et al., 2008) เกียร์ในขณะร้อนจัดของชิ้นส่วนเครื่องบิน (Costa et al., 2010) เครื่องสกัดแยกน้ำมันมะกอก (Bahri et al., 2015) เป็นต้น แต่ TiN มีข้อจำกัดในการป้องกันปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจน (Paldey and Deevi, 2003; Sun et al., 2003) ผิวเคลือบ TiAlN ถูกพัฒนาขึ้นให้มีการป้องกันปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง (Rodríguez-Baracaldo et al., 2007) และการเพิ่ม Si จะทำให้ผิวเคลือบ TiAlSiN มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าผิวเคลือบ TiAlN และ TiN (Faga et al., 2007); Yu et al., 2009; Çalışkan et al., 2013) นอกจากนี้ Sun and Vinh (2010) กล่าวว่าเทคโนโลยีดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาผิวเคลือบ TiSiN และ TiAlSiN เพื่อให้มีการป้องกันปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในขณะที่ Veprek et al. (2004) กล่าวว่าผิวเคลือบ TiAlSiN โดยการเคลือบในสุญญากาศทำให้สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นและ Paldey and Deevi (2003) ศึกษา ก่อนและพบว่าหากเป็นการเคลือบผิวแบบหลายชั้นยิ่งทำให้ความต้านทานการสึกหรอและความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น Chi-Lung and Ming-Don (2009) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทาง tribology ของผิวเคลือบ TiAlSiN บนทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ (WC) ด้วยวิธีการอาร์คแบบฟิลเตอร์คาโรติก ซึ่งพบว่าผิวเคลือบ TiAlSiN มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าผิวเคลือบ TiN และ TiSiN สำหรับการเคลือบ TiCrAlSiN นั้น Sun et al. (2003) ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกและพบว่า อิทธิพลของความดันก๊าซไนโตรเจน ค่ากระแสของการอาร์คที่ขั้วแคโทด (cathode arc current) และค่าแรงดันไบอัส (bias voltage) มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างของผิวเคลือบ โดยที่ถ้าเพิ่มความดันก๊าซไนโตรเจนและค่ากระแสของการอาร์คที่ขั้วแคโทดในขณะที่ปรับลดค่าแรงดันไบอัส จะส่งผลให้ความแข็งของ TiCrAlSiN เพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติทางกลที่ดี การเคลือบมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นงานรวมทั้งเครื่องมือตัดเฉือน โดย Zhang et al. (2015) ศึกษาการเคลือบ AlCrN, AlTiSiN และ AlCrTiSiN บนมิตดัดที่ทำด้วยเหล็กกล้ารอบสูง โดยพบว่า มิตดัดที่เคลือบด้วย AlCrTiSiN มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่ามิตดัดที่เคลือบด้วย AlCrN ในขณะที่อายุการใช้งานของมิตดัดที่เคลือบด้วย AlTiSiN และ AlCrTiSiN ยังไม่ปรากฏความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ธาตุโมลิบดีนัม (molybdenum: Mo) เป็นธาตุโลหะที่มีความสำคัญอย่างมากในการใช้ปรับปรุงความสามารถในความต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะผสมอื่นๆ การเคลือบด้วย MoN รวมทั้ง MoC เป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้เพิ่มความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ เพิ่มความแข็ง เพิ่มความคงตัวของสมบัติทางกลในขณะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Zhang et al., 2013) Perry et al. (1992) ศึกษาโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ ของ MoN ที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธีการอาร์คของแคโทดโดยพบว่าการเพิ่มปริมาณของก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบส่งผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ Yang et al. (2014) ยังได้ศึกษาโครงสร้าง สมบัติต่างๆ เช่น ความแข็ง Poisson's ratio และสมบัติที่สำคัญทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ MoN ที่มีโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ การประยุกต์ใช้การเคลือบด้วย MoN เพื่อเพิ่มความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของวัสดุประเภทต่างๆ มีงานวิจัยต่างๆ เช่น Ürgen et al. (1997) ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเคลือบ MoN บนผิวเหล็กกล้ารอบสูง (high speed steel) ด้วยวิธีการอาร์คของแคโทดที่มีผลกระทบต่อความแข็ง ความหนาและ โครงสร้างผลึกของ MoN ซึ่งพบว่าความแข็งของ MoN สูงขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจน นอกจากนี้ยังรายงานว่า MoN ที่เคลือบบนผิวเหล็กกล้ารอบสูงมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า TiN ที่เคลือบบนเหล็กกล้ารอบสูงด้วยจากการทดสอบการสึกหรอ ball-on-disk ด้วยอลูมินาบอล (alumina balls) Suszko et al. (2005) ทำการเคลือบ Mo₂N บนผิวเหล็กกล้า AISI 440C ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแล้วทำการทดสอบการสึกหรอด้วยอลูมินาบอลที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการแตกร้าว และความต้านทานการกัดกร่อน Hazar (2010) ทำการปรับปรุงผิวของลูกสูบเครื่องยนต์ดีเซลที่เคลือบด้วย MoN ด้วยวิธีการอาร์คซึ่งพบว่าผิวของลูกสูบมีความแข็งแรงมากกว่าผิวของลูกสูบที่ไม่ได้เคลือบเกือบ 20 เท่าและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าด้วย ผู้วิจัยและคณะได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ MoN บนตะขอบนด้วยกระบวนการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงซึ่งพบว่าค่าโมดูลัสสูงสุดอยู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 A แรงดันก๊าซเท่ากับ 0.01 mbar และอัตราส่วนก๊าซ Ar/N₂ เท่ากับ 1.5 และค่าน้ำหนักตะขอที่หายไป (การทดสอบการสึกหรอ) ต่ำสุดอยู่ที่ระดับปัจจัยดังนี้ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.45 A แรงดันก๊าซเท่ากับ 0.01 mbar และอัตราส่วนก๊าซ Ar/N₂ เท่ากับ 0.5 (Srisattayakul et al., 2014, 2016)

MoC จัดเป็นวัสดุประเภททนไฟ โดยมีสมบัติที่สำคัญต่างๆ มากมาย ได้แก่ จุดหลอมเหลวสูง ความแข็งแรงสูง และนำไฟฟ้าได้ดี จากสมบัติที่น่าสนใจเหล่านี้จึงทำให้วัสดุ MoC เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ Danroc et al. (1987) กล่าวว่า การเคลือบผิววัสดุ MoC และ MoN ด้วยวิธีการดี.ซี.รีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงจะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 30 GPa และ 35 GPa ตามลำดับและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุที่ชุบฮาร์ดโครม ในขณะที่ Liu et al. (2006) ได้ยืนยันว่าการเติมสาร C ลงไปเพื่อเคลือบเป็นสาร MoCN ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น Novak et al. (2010) สนับสนุนการศึกษาเพื่อพิสูจน์สมบัติไทรโบโลยีเกี่ยวกับการเติมคาร์บอนในกระบวนการเคลือบ MoC โดยการเติมธาตุคาร์บอนในปริมาณที่ต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ต่ำกว่า 0.1 และอัตราการสึกหรอต่ำกว่า 5×10^{-7} mm³/Nm Deng et al. (2013) ศึกษาอิทธิพลของ Mo และ MoC ที่สามารถฝังตัวเข้าไปในโครงสร้างระดับไมโครในกระบวนการเคลือบผิวโลหะต่างๆ ช่วยให้ค่าความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของ TiN เพิ่มขึ้นอีกได้ด้วย MoC ที่ฝังตัวเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งจะดีกว่าการที่มีเพียง Mo อย่างเดียว

2.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อหาปัจจัย (factors, x) ที่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติที่มีผลต่อตัวผลตอบสนอง (responses, y) โดยลดความผันแปรของผลตอบสนองให้น้อยที่สุดในขณะที่ทำให้ผลตอบสนองอยู่ในเป้าหมายของการออกแบบมากที่สุด การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม อีกทั้งเพื่อเป็นการลดความผันแปรของตัวแปรกระบวนการหรือตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติหรืออาจจะควบคุมตัวแปรนี้ได้ในขณะที่ทำการทดลอง ถ้ามีการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตโดยมีผลกระทบอย่างน้อยจากแหล่งของความแปรปรวนจากภายนอก ซึ่งเป็นผลให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด กระบวนการนี้เรียกว่า robust process (Montgomery, 1999)

2.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อจำแนกทางเดียว

สมมติว่าในการทดลองหนึ่งมีหนึ่งปัจจัยและจำนวนระดับ a ระดับที่ผู้ทำการทดลองต้องการที่จะเปรียบเทียบค่าตอบสนองโดยเฉลี่ยที่วัดได้จากแต่ละ a ระดับ ลักษณะทั่วไปของข้อมูลสำหรับการทดลองในหนึ่งปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.1 ค่าที่ใส่ลงไปในตารางที่ 2.1 (เช่น y_{ij}) แทนค่าสังเกตซ้ำที่ j ที่วัดได้จากการทดลองในระดับที่ i ของปัจจัยนั้น โดยทั่วไปแล้ว การทดลองในระดับที่ i ของปัจจัยนั้นจะมีค่าซ้ำ n จำนวน การทดลองในแต่ละครั้งจะต้องทำภายใต้การสุ่มลำดับการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามกฎเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง ดังนั้น การทดลองนี้จึงถูกเรียกว่าแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) (Montgomery, 2001)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของข้อมูลสำหรับการทดลองในหนึ่งปัจจัยและจำนวนระดับ a ระดับ

ระดับ	1	2	...	n	ผลรวม	ค่าเฉลี่ย
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1\bullet}$	$\bar{y}_{1\bullet}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2\bullet}$	$\bar{y}_{2\bullet}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{an}	$y_{a\bullet}$	$\bar{y}_{a\bullet}$
					$y_{\bullet\bullet}$	$\bar{y}_{\bullet\bullet}$

โดยที่

$$y_{i\bullet} = \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$\bar{y}_{i\bullet} = \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$\bar{y}_{\bullet\bullet} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}}{an}$$

การศึกษาการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถใช้ตรรกคือ เปรียบเทียบความแปรปรวนภายในแต่ละระดับ (within each treatment) และเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างแต่ละระดับ (between each treatment) การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (formal test of ANOVA) แสดงได้ด้วย

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j, \text{ for at least one pair } (i, j) \quad (2.1)$$

โดยที่ μ_i คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในแต่ละระดับ หรือ

$$\begin{aligned}
 H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \\
 H_1 : \tau_i \neq 0, \text{ for at least one } i
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

โดยที่ τ_i เป็นผลกระทบเนื่องจากความแตกต่างของระดับ (treatment effect)

สถิติที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$F_0 = \frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E} = \frac{SS_{\text{Treatments}}/a-1}{SS_{\text{Error}}/an-a} \tag{2.3}$$

โดยที่ $SS_{\text{Treatments}}$ คือผลรวมกำลังสองเนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ (sum of squares due to treatments) SS_{Error} คือผลรวมกำลังสองเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม (sum of squares due to error) $MS_{\text{Treatments}}$ คือค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ (mean square due to treatments) MS_{Error} คือค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม (mean square due to error) ค่า $SS_{\text{Treatments}}$ คำนวณจาก

$$SS_{\text{Treatments}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{an} \tag{2.4}$$

และค่า SS_{Error} คำนวณจาก

$$SS_{\text{Error}} = SS_T - SS_{\text{Treatments}} \tag{2.5}$$

โดยที่ SS_T คำนวณจาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{an} \tag{2.6}$$

จะได้ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

แหล่งของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง	องศาอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F_0
ระหว่างระดับ	$SS_{\text{Treatments}}$	$a-1$	$\frac{SS_{\text{Treatments}}}{a-1} = MS_{\text{Treatments}}$	$\frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_{\text{Error}}}$
ค่าความคลาดเคลื่อนภายในระดับ	SS_{Error}	$an-a$	$\frac{SS_{\text{Error}}}{an-a} = MS_{\text{Error}}$	
ผลรวม	SS_{Total}	$an-1$		

- การเปรียบเทียบพหุคูณ

หลังจากทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน และสรุปผลว่าค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในแต่ละระดับแตกต่างกัน นั่นคือ ปัจจัยมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง ซึ่งจำเป็นต้องทดสอบต่อไปว่าค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตของระดับคู่ใดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ผู้ทดลองสามารถเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตระหว่างคู่ต่างๆ ได้จาก $H_0: \mu_i = \mu_j, i \neq j$ วิธีที่ได้รับการยอมรับและสามารถทำการทดสอบโดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตระหว่างคู่ ซึ่งมี 4 วิธีคือ วิธี the least significant difference method (LSD) วิธี Duncann's multiple range test วิธี Newman-Keuls test และวิธี Tukey's test ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวิธีแรก

ผู้ทดลองสามารถทำการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในแต่ละระดับเป็นคู่ โดยใช้ t -test ซึ่งค่าสถิติที่ใช้ทดสอบของวิธีนี้ คือ

$$t_0 = \frac{\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{j\cdot}}{\sqrt{MS_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}}, \quad \forall i \neq j \quad (2.7)$$

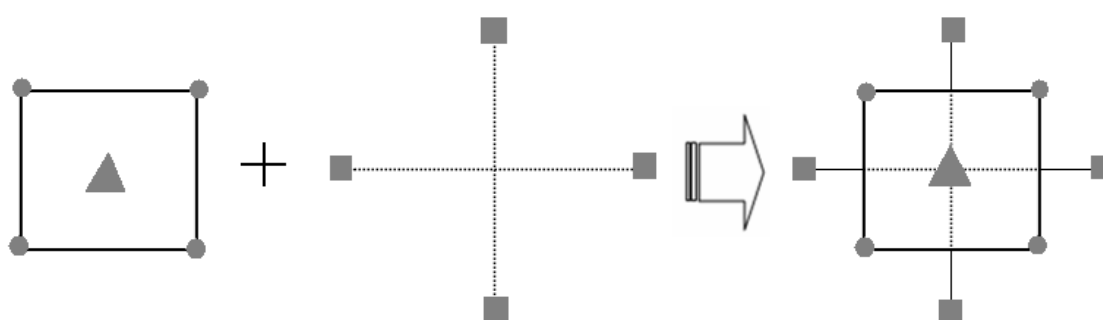
ถ้า $|\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{j\cdot}| > t_{\alpha/2, an-a} \sqrt{MS_E [(1/n_i) + (1/n_j)]}$ จะได้ว่าคู่ของค่าเฉลี่ย μ_i และ μ_j มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่า $t_{\alpha/2, an-a} \sqrt{MS_E [(1/n_i) + (1/n_j)]}$ หรือค่า LSD (least significant difference) คือความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ปฏิเสธ H_0 ถ้า $|\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{j\cdot}| > LSD$ จะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่าคู่ของ μ_i และ μ_j แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.2 การเพิ่มจุดทดลองใน 2^k แฟคตอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

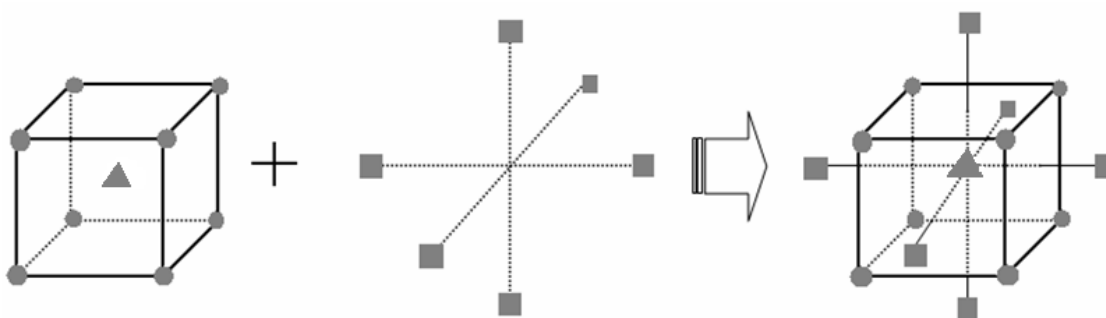
การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลที่พบว่ามีส่วนโค้งใน รูปแบบสมการถดถอยจำเป็นต้องเพิ่มข้อมูลจากการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลอย่างเดียวยังคงไม่เพียงพอที่จะให้สมการพื้นผิวผลตอบสนองที่เป็นตัวแทนที่แท้จริงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มจุดทดลองนอกเหนือจากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design, CCD) เป็นการออกแบบการทดลองหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมที่สามารถแก้ปัญหาในรูปแบบสมการถดถอยที่พบว่ามีส่วนโค้งในพื้นที่พื้นผิวผลตอบสนอง การออกแบบการทดลองนี้ถูกริเริ่มโดย Box and Wilson (1951)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเป็นเทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology) ที่ได้รับความนิยมในการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต (Myers and Montgomery, 2002) การออกแบบการทดลองแบบนี้ประกอบด้วย 2^k แฟคตอเรียลพร้อมด้วยจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย รวมกับจุดในแนวแกน (axial point) หรือในแนวรูปดาว (star) รูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 2^2 แฟคตอเรียลและแบบ 2^3

แฟคตอเรียล โดยที่จุดที่ต้องการทำการทดลองแบบแฟคตอเรียลเขียนแทนด้วยรูปวงกลม ในขณะที่จุดที่ต้องการทำการทดลองที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยเขียนแทนด้วยรูปสามเหลี่ยม และจุดที่ต้องการทำการทดลองในแนวแกนหรือในแนวรูปดาวเขียนแทนด้วยรูปสี่เหลี่ยม (Anderson and Whitcomb, 2005) การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 2^2 แฟคตอเรียลมีจำนวนจุดที่ต้องทำการทดลองคือ 4 จุด (ตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟคตอเรียล) รวมกับจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยอีก 4-6 จุด และจุดในแนวแกนอีก 4 จุด รวมเป็น 12-14 จุด ส่วนการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 2^3 แฟคตอเรียลมีจำนวนจุดที่ต้องทำการทดลองคือ 8 จุด (ตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟคตอเรียล) รวมกับจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยอีก 4-6 จุด และจุดในแนวแกนอีก 6 จุด รวมเป็น 18-20 จุด เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางของ 2^2 แฟคตอเรียล (ชาญณรงค์, 2557)



รูปที่ 2.2 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางของ 2^3 แฟคตอเรียล (ชาญณรงค์, 2557)

ในทางปฏิบัติ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ (sequential experimentation) กล่าวคือ การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลถูกนำมาใช้เพื่อฟิตข้อมูลเข้ากับแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (the first-order model) และพจน์ที่มีปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย (two-factor interaction) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยสามารถช่วยให้ได้รูปแบบสมการถดถอยที่มีความน่าเชื่อถือและมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่สมการถดถอยมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง ซึ่งอาจมีพจน์กำลังสองอยู่ด้วย ถ้าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลพร้อมด้วยจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง ผู้ทดลองจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มโดยรวมรวมกับจุดในแนวแกน ในทำนองกลับกัน ถ้าผลการวิเคราะห์ความ

แปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบ 2^k แพคตอเรียลพร้อมด้วยจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยไม่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง ผู้ทดลองจำเป็นต้องหาระดับของปัจจัยใหม่จนกว่าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง การหาระดับของปัจจัยใหม่สามารถกระทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (steepest ascent) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสนองสูงสุด หรือวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (steepest descent) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการลดลงของผลตอบสนองต่ำสุด (Box and Wilson, 1951)

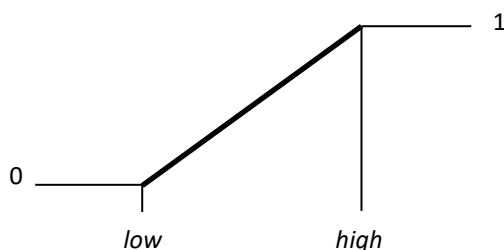
ผู้สนใจการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก ชาญณรงค์ (2557) Myers and Montgomery (2002), Anderson and Whitcomb (2005) เป็นต้น

2.3.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัว

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองหลายตัว (multiple responses) เช่น ค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิวเคลือบบนตะขอ ค่าน้ำหนักที่หายไปหลังจากการทดสอบการสึกหรอ เป็นต้น การแก้ปัญหาเกี่ยวกับผลตอบสนองหลายตัวสามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlaid contour plot) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยมาก เนื่องจากการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองต้องใช้กราฟสองมิติ และจะต้องทำตัวแปรที่เหลืออีก $k - 2$ ตัวให้อยู่ในระดับคงที่ โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย นอกจากนี้ วิธีนี้ยังทำให้เกิดความยุ่งยากและไม่แน่นอนในการวางแผนโครงร่างซ้อนกัน นอกจากการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกันแล้ว การใช้แนวทางการหาค่าเหมาะสมด้วย constrained optimization problem หรือ nonlinear programming methods ก็สามารถแก้ปัญหาก็ได้เช่นกัน Deringer and Suich (1980) แนะนำวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง งานวิจัยนี้จะใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจร่วมกับการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน

วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าที่ดีที่สุดในการมีผลตอบสนองหลายตัวที่สะท้อนให้เห็นถึงระดับของผลตอบสนองแต่ละตัวในเทอมของผลตอบสนองที่น้อยที่สุดไปถึงผลตอบสนองที่มากที่สุด โดยมีค่าน้ำหนักตั้งแต่ 0 ถึง 1 วิธีนี้เริ่มจากการแปลงค่าผลตอบสนอง y_i เป็นฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยว (individual desirability function, d_i) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq d_i \leq 1$ ถ้าผลตอบสนอง y_i อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของผู้ทำการทดลองแล้ว ค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะเดียวกัน ถ้าผลตอบสนอง y_i ไม่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของผู้ทำการทดลองแล้ว ค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 0 ในการแปลงค่าจากผลตอบสนองแต่ละตัวให้เป็นค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดียวนั้นมีวัตถุประสงค์ 3 ประการด้วยกันคือ ต้องการให้ได้ค่าที่มากที่สุด (maximization) ต้องการค่าที่น้อยที่สุด (minimization) และต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนด (meeting the target) Deringer and Suich (1980) แนะนำแนวทางในการแปลงค่าจากผลตอบสนองแต่ละตัวให้เป็นค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวตามวัตถุประสงค์ทั้งสามดังรูปที่ 2.3-2.5 จากรูป ค่า r หมายถึงน้ำหนัก

ของฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability weight parameter) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันความพึงพอใจจะมีผลทำให้ฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแตกต่างกันไปตามแต่ละวัตถุประสงค์

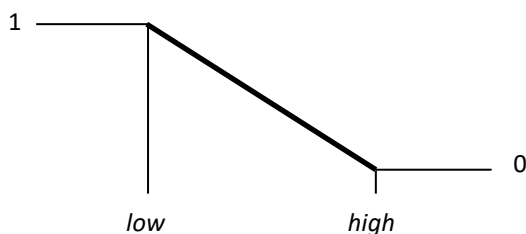


รูปที่ 2.3 ทางลาดของฟังก์ชันความพึงพอใจในกรณีที่ต้องการค่ามากที่สุด (ชาญณรงค์, 2557)

ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ต้องการให้ได้ค่ามากที่สุดคือ

$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i > T \\ \left(\frac{y_i - Low}{T - Low} \right)^r, & T \leq y_i \leq high \\ 0, & y_i < Low \end{cases} \quad (2.8)$$

โดยที่ y_i คือค่าผลตอบสนอง Low คือค่าผลตอบสนองต่ำสุดที่ยอมรับได้ และ T คือค่าเป้าหมายสูงสุดของผลตอบสนอง

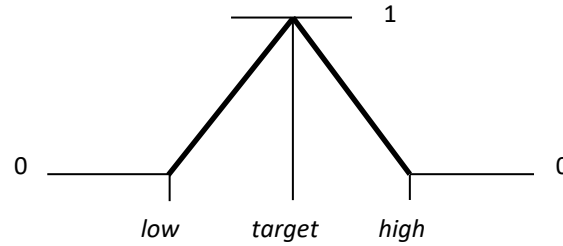


รูปที่ 2.4 ทางลาดของฟังก์ชันความพึงพอใจในกรณีที่ต้องการค่าน้อยที่สุด (ชาญณรงค์, 2557)

ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ต้องการให้ได้ค่าน้อยที่สุดคือ

$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i < T \\ \left(\frac{high - y_i}{high - T} \right)^r, & T \leq y_i \leq high \\ 0, & y_i > high \end{cases} \quad (2.9)$$

โดยที่ y_i คือค่าผลตอบสนอง $high$ คือค่าผลตอบสนองสูงสุดที่ยอมรับได้ และ T คือค่าเป้าหมายสูงสุดของผลตอบสนอง



รูปที่ 2.5 ทางลาดของฟังก์ชันความพึงพอใจในกรณีที่ต้องการค่าที่กำหนด (ชาญณรงค์, 2557)

และค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดียวที่ต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนดคือ

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{y_i - low}{T - low} \right)^{r1}, & low \leq y_i \leq T, \\ \left(\frac{high - y_i}{high - T} \right)^{r2}, & T \leq y_i \leq high, \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.10)$$

หลังจากแปลงค่าผลตอบแทนเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแล้ว ฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแต่ละผลตอบแทนจะถูกแปลงเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจรวม (overall desirability function, D) แล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของ D

$$D = (d_1^{w1} \times d_2^{w2} \times \dots \times d_n^{wn})^{1/\sum w_i} = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{1/\sum w_i} \quad (2.11)$$

โดยที่ D คือฟังก์ชันความพึงพอใจรวม d_i คือฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยว n คือจำนวนผลตอบแทนและ w_i คือค่าความสำคัญของผลตอบแทนต่างๆ ซึ่งมีค่า $0 < w_i < 1$ และ $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

จุดประสงค์ของค่าความพึงพอใจรวมคือการหาค่าสูงสุดของ D ซึ่งค่าที่ให้ความพึงพอใจสูงสุดคือ 1 การหาค่าที่ดีที่สุดของ D สามารถทำได้จากอัลกอริทึม (algorithm) หลายวิธี อัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่งคือ การหาค่าที่ดีที่สุดแบบซิมเพล็กซ์ (simplex optimization) ซึ่งเสนอโดย Spendley et al. (1962) และได้รับการปรับปรุงอัลกอริทึมจาก Nelder and Mead (1965)

2.3.4 การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

บางครั้งจุดที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทนอาจไม่เป็นจุดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่มีผลตอบแทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของปัจจัย บางกระบวนการผลิตต้องให้ความระมัดระวังในการปรับระดับของปัจจัย เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อความผันแปรในผลตอบแทนน้อยที่สุด กระบวนการใดที่มีค่าผลตอบแทนเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการปรับระดับของปัจจัยเล็กน้อย จะทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น จุดที่เหมาะสมที่ให้ค่าผลตอบแทนสูงสุดมีโอกาสดังลงเหวได้ ถ้ามี

ความผันแปรเกิดขึ้นที่จุดนั้น การหาจุดที่เหมาะสม ณ ตำแหน่งอื่นที่ทำให้ค่าผลตอบแทนไม่ดิ่งลงเหวหรือมีความราบเรียบของพื้นผิวผลตอบแทนเป็นสิ่งที่ทำให้กระบวนการผลิตหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความผันแปรน้อยที่สุด โดยที่จุดที่เหมาะสมนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นจุดสูงสุด การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมในลักษณะนี้สามารถดำเนินการได้โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (propagation of error, POE) การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาระดับของปัจจัยที่ทำให้กระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีที่สุด โดยทำให้ความผันแปรของผลตอบแทนมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นแนวคิดของวิธีการซิกม่า (six sigma)

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทนโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ การดำเนินการเริ่มจากการพิชิตรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุในผลการทดลองตามสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.12)$$

ขั้นตอนต่อไปคือ หาค่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (error variance, σ_e^2) ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นคำนวณหาค่าความแปรปรวนของปัจจัย $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{kk}^2$ แสดงได้ดังเมตริกซ์

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{kk}^2 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

คำนวณหาค่าความแปรปรวนของผลตอบแทนได้จากสมการ

$$\text{Var}(y) = \nabla' \Sigma \nabla + \sigma_e^2 \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

ซึ่งค่าความแปรปรวนของผลตอบแทนจะเป็น

$$\text{Var}(y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} & \frac{\partial y}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{kk}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix} + \sigma_e^2 \quad (2.16)$$

นั่นคือ

$$\text{Var}(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{11}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{22}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \right)^2 \sigma_{kk}^2 + \sigma_e^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้น จะได้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

$$POE = \sqrt{\text{Var}(y)} \quad (2.18)$$

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนจะให้ค่าความผันแปรของผลตอบสนองน้อยที่สุด โดยเกิดจากการส่งผ่านของปัจจัยหรือตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ จุดเหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้อาจจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้วิเคราะห์ด้วย โดยที่ต้องทำให้กระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนจะให้ค่าความผันแปรของผลตอบสนองน้อยที่สุด โดยเกิดจากการส่งผ่านของปัจจัยหรือตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ด้วย รายละเอียดสามารถศึกษาได้จาก Myer and Montgomery (2002), Anderson and Whitcomb (2005)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

นักวิจัยหลายกลุ่มประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบต่างๆ รวมทั้งการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมการตัดเฉือนโลหะและผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดและชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวัสดุต่างๆ อาทิ ในงานขัดแต่งผิวหลังจากการตัดเฉือนโลหะซึ่งเป็นงานที่อาศัยความละเอียดเพื่อให้ได้ผิวงานที่เหมาะสมกับงานมากที่สุด Krajnik et al. (2005) ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยระยะห่างทางเทคนิคการขัดแต่งผิว อัตราการป้อน ความเร็วรอบของล้อและความเร็วในการขัดที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวของโลหะ 9SMn28 โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองโดยใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ งานวิจัยของ Aggarwal et al. (2008) ศึกษากระบวนการแปรรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง CNC โดยใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองควบคู่กับการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัวด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจด้วยผลตอบสนองที่ทำการวิเคราะห์พร้อมกันคือ อายุการใช้งานของมีดกลึงและการใช้พลังงาน ในขณะที่ปัจจัยที่พิจารณา มี 2 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบในการตัด และความลึกของการตัด Rajmohan and Palanikumar (2013) ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วแกนหมุน อัตราป้อน และน้ำหนักร่อง SiC ที่มีผลกระทบต่อแรงผลัก ความหยาบผิวชิ้นงานและความสูงเสี้ยน (burr height) ในการเจาะชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Al/SiC + Mica) ด้วยเครื่องเจาะอัตโนมัติที่มีวัสดุเจาะทำด้วยคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

6 มิลลิเมตร โดยพบว่า การเพิ่มอัตราการป้อนในการเจาะชิ้นงานมีผลทำให้เกิดแรงผลักของเครื่องเจาะมากขึ้นและทำให้เกิดแรงบิดและความร้อนสูงขึ้นและนำไปสู่การเพิ่มความหยาบผิวชิ้นงาน

ตามที่กล่าวว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ กล่าวคือ การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แพคตอเรียลถูกนำมาใช้เพื่อพิตข้อมูลเข้ากับแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และพจน์ที่มีปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย การเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยสามารถช่วยให้ได้รูปแบบสมการถดถอยที่มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งหรือไม่ ซึ่งอาจมีพจน์กำลังสองอยู่ด้วย Rathod and Lalwani (2017) ใช้หลักการดังกล่าวในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วตัด อัตราป้อน และประเภทของชิ้นงานที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอของมิดกิล (TiN coated cubic boron nitride) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (AISI H11) การศึกษานี้ทำให้ทราบว่า รูปแบบสมการที่เหมาะสมของการสึกหรอของมิดกิลเป็นแบบเส้นตรง ในขณะที่รูปแบบสมการที่เหมาะสมของความหยาบผิวเป็นเส้นโค้งซึ่งจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มที่จุดแนวแกน อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยควรใช้หลักการของวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (steepest descent) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการลดลงของผลตอบสนองต่ำสุด (Box and Wilson, 1951) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสามที่ทำให้ค่าการสึกหรอของมิดกิลต่ำสุด

การซุบฮาร์ดโครมเป็นกระบวนการหนึ่งในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล Bayramoglu et al. (2008) ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยการซุบฮาร์ดโครมที่มีผลกระทบต่อนาฬิกาของผิวเคลือบ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง ผลการศึกษาพบว่าความหนาของผิวเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดโครมิกในการซุบ แต่ความเข้มข้นที่ทำให้เกิดความหนาสูงสุดอยู่ที่ 282 g/l หากเข้มข้นมากกว่านี้ความหนาของผิวจะลดลง ในขณะเดียวกันอัตราส่วนของกรดซัลฟูริกกับกรดโครมิกก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อนาฬิกา โดยอัตราส่วนที่ให้ผลดีที่สุดอยู่ระหว่าง 0.0005-0.010 โดยที่อัตราส่วนที่ดีที่สุดอยู่ที่ 0.0075 นอกจากนี้ อุณหภูมิในอ่างมีผลกระทบค่อนข้างสูงต่อความหนาของผิวเคลือบเช่นกัน โดยความหนาของผิวเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในอ่างเคลือบ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลองอยู่ที่ 58 °C

การเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และวัสดุอื่นๆ ด้วยวิธีการเคลือบแบบต่างๆ มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและเครื่องมือตัดเฉือนโลหะ การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอก็เป็นงานวิจัยที่มีการศึกษามาเป็นระยะเวลานานจนถึงปัจจุบันก็ยังมีการวิจัยไม่น้อยก็ยังคงใช้แนวทางการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง Saravanan et al. (2016) ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบ Box Behnken การวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจและการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlaid contour plot) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยการทดสอบการสึกหรอที่มีผลกระทบต่อนาฬิกาที่หายไปของวัสดุที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ (wear mass loss) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) ค่าความหยาบผิว (surface roughness)

ค่าความลึกของรอยสึกหรอ (wear depth) และค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN บนวัสดุประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L

จากการศึกษางานวิจัยการเคลือบแข็งด้วยวัสดุต่างๆ มีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงความสามารถในความสามารถต้านทานการสึกหรอของตะขอที่เกิดจากการเสียดสีของวัสดุที่อ่อนกว่า (ในล่อน) ด้วยการทดลองจริงจากเครื่องทออวนและเครื่องที่ผู้วิจัยและคณะได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบเชิงทดลองและวิเคราะห์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองและทางสถิติ

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยในการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การวิจัยศึกษาความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างและบน โดยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่างซึ่งศึกษาผลกระทบของปัจจัยของกระบวนการชุบฮาร์ดโครมต่อการสึกหรอของตะขอล่างส่วนการปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนซึ่งศึกษาผลกระทบของการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างๆ บนตะขอบน

3.1 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่าง

ตะขอล่างทำจากเหล็กกล้าสปริง JIS G 3522-1991 SWP-A ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย C = 0.60-0.95 wt%, Si = 0.12-0.32 wt%, Mn = 0.3-0.9 wt% ขั้นตอนการทำตะขอล่างเริ่มต้นด้วยการขึ้นรูปตะขอล่างให้มีลักษณะเป็นตะขอด้วยเครื่องตัดเหล็กและเครื่องตัดเหล็กให้มีลักษณะเป็นตะขอ การขึ้นรูปต้องเป็นการขึ้นรูปเย็น (cold work) เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของชิ้นงาน หลังจากได้ตะขอที่มีรูปร่างเป็นตะขอแล้ว จำเป็นต้องเตรียมผิวให้มีความเรียบพอที่จะนำไปชุบฮาร์ดโครมต่อไป การเตรียมผิวสามารถกระทำได้จากการขัดด้วยผ้า จากนั้น ก็นำตะขอไปชุบฮาร์ดโครมในอ่างชุบ ขั้นตอนการทำตะขอล่างแสดงดังรูปที่ 3.1 การชุบฮาร์ดโครมมีจุดประสงค์หลักอย่างหนึ่งคือช่วยต้านทานการสึกหรอของตะขอล่าง การสึกหรอของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบฮาร์ดโครมมีปัจจัยที่สำคัญคือ

- ความหนาของผิวชุบฮาร์ดโครมโดยที่ผิวชุบที่หนากว่ามีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า ความหนาของผิวชุบขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยาชุบ อัตราส่วนระหว่างกรดแต่ละชนิด กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของอ่างน้ำยาและเวลาที่ทำการชุบ
- ความเรียบของผิวชิ้นงานโดยที่ความเรียบของผิวชุบขึ้นอยู่กับผิวเดิมของชิ้นงาน ถ้าความหนาของผิวชุบมาก ความเรียบของผิวชุบอาจจะไม่ขึ้นอยู่กับผิวเดิม และทำให้ความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มมากขึ้นแต่ต้องใช้เวลา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างโดยปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่

- อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันอาจทำให้ผิวของชิ้นงานมีความเรียบแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ศึกษามี 5 ระดับ ตามรูปแบบของการทดลองแบบส่วนประสมกลาง การขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 0, 30, 105, 180 และ 210 °C ถ้าขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 210 °C ชิ้นงานเกิดการแตกหักเป็นจำนวนมาก และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของชิ้นงาน
- การขัดผิวชิ้นงานก่อนนำไปชุบฮาร์ดโครม ซึ่งในปัจจุบันการขัดผิวชิ้นงานได้ใช้เส้นใยขัด (เส้นด้ายที่เคลือบด้วยผงขัด) เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ผิวที่ได้ไม่พอเหมาะกับการชุบฮาร์ดโครม จึงมีการทดลองเพิ่มการขัดมันโดยใช้ผ้าขัดอีกขั้นตอนหนึ่งโดยกำหนดเวลาในการขัดมัน 2 นาทีต่อชิ้น
- เวลาในการชุบ ในการศึกษานี้กำหนดเวลาในการชุบ 32, 40, 60, 80 และ 88 นาที อัตราการชุบปกติเท่ากับ 50 ไมครอนต่อชั่วโมง ดังนั้นถ้าชุบ 40 นาทีจะได้ความหนาของผิวเคลือบเท่ากับ 35 ไมครอน และถ้าชุบ 80 นาทีจะได้ความหนาของผิวชุบเท่ากับ 65 ไมครอน
- ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางโดยมีปัจจัยสองปัจจัยที่เป็นแบบเชิงปริมาณ (quantitative) คืออุณหภูมิในการขึ้นรูปและเวลาในการชุบในขณะที่อีกปัจจัยเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (qualitative) คือการขัดผิวชิ้นงานก่อนนำไปชุบฮาร์ดโครม ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยในกระบวนการชุบฮาร์ดโครมของตะขอล่าง ตารางที่ 3.2 แสดงตารางบันทึกผลการทดลองในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางโดยที่มีผลตอบสนองคือค่าความแข็งของผิวฮาร์ดโครมและผลการทดสอบการสึก

หรือโดยทำการบันทึกผลการทดลองน้ำหนักของตะขอก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอจากการทดสอบการสึกหรอของตะขอล่างด้วยเครื่องทอวนจริงในโรงงานกรณีศึกษา

- ค่าความแข็งแรงใช้เครื่องวัดค่าความแข็งแรงยี่ห้อ Galileo, Microscan OD



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำตะขอล่าง (Intanon and Saikaew, 2016)

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในกระบวนการชุบฮาร์ดโครมของตะขอล่าง

ปัจจัย	ระดับ				
	ต่ำสุด (จุดดาว)	ต่ำ	กลาง	สูง	สูงสุด (จุดดาว)
อุณหภูมิ, A ($^{\circ}\text{C}$)	0	30	105	180	210
เวลา, B (นาทีก)	32	40	60	80	88

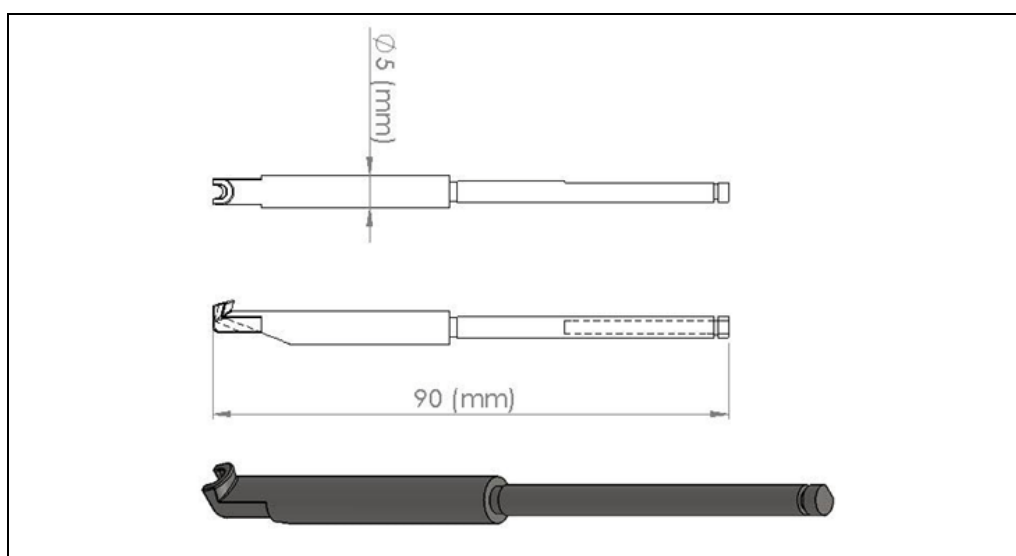
ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการทดลองในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ลำดับ	ปัจจัย			ความแข็ง (HRC)	ผลการทดสอบการสึกหรอ (g)		
	อุณหภูมิ,	เวลา,	การขัดผิวชิ้นงาน,		ก่อน (g)	หลัง (g)	น้ำหนักที่ หายไป (g)
	A	B	C				
1	30	40	Thread				
2	180	40	Thread				
3	30	80	Thread				
4	180	80	Thread				
5	0	60	Thread				
6	210	60	Thread				
7	105	32	Thread				
8	105	88	Thread				
9	105	60	Thread				
10	105	60	Thread				
11	105	60	Thread				
12	105	60	Thread				
13	105	60	Thread				
14	30	40	Thread&polished				
15	180	40	Thread&polished				
16	30	80	Thread&polished				
17	180	80	Thread&polished				
18	0	60	Thread&polished				
19	210	60	Thread&polished				
20	105	32	Thread&polished				
21	105	88	Thread&polished				
22	105	60	Thread&polished				
23	105	60	Thread&polished				
24	105	60	Thread&polished				
25	105	60	Thread&polished				
26	105	60	Thread&polished				

นอกจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการทางสถิติแล้ว งานวิจัยนี้ยังวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ทั้งก่อนและหลังการทดสอบความแข็งแรงและการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอด้วย

3.2 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอบน

ตะขอบนผลิตจากการหล่อเหล็กกล้าไร้สนิมแบบขี้ผึ้งหาย (lost wax) โดยตะขอบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และยาว 90 มิลลิเมตร รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะและขนาดของตะขอบนที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรง การทดสอบความหยาบผิวชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแข็งและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ



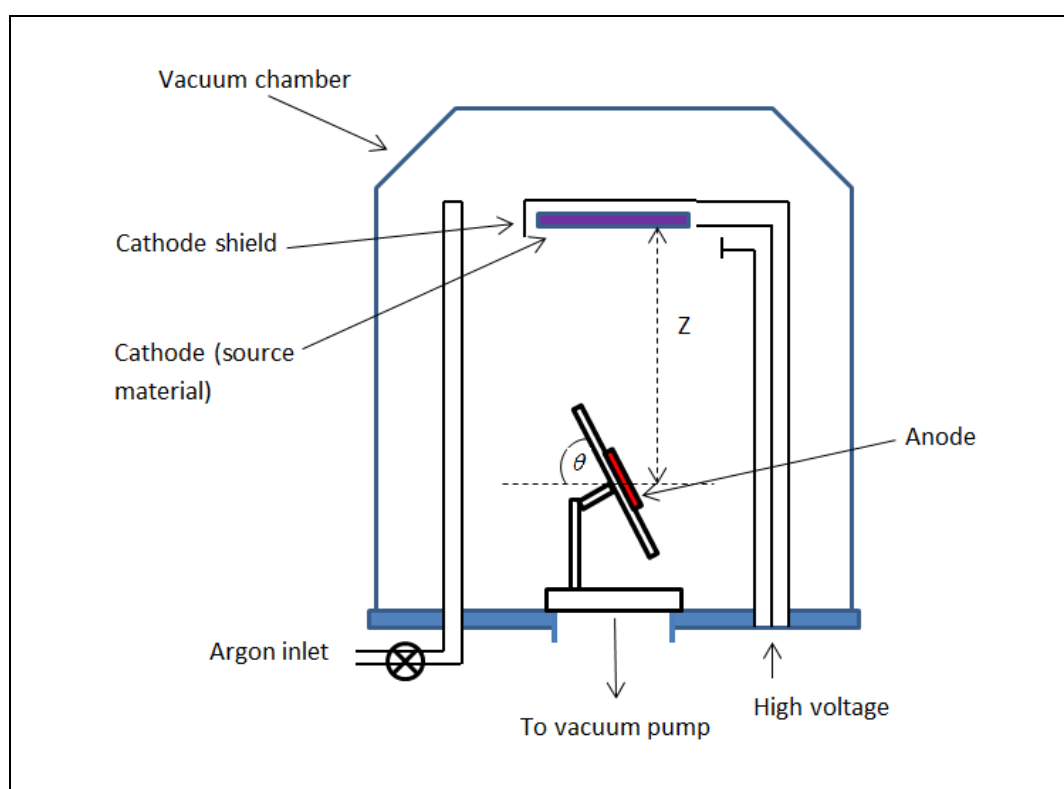
รูปที่ 3.2 ลักษณะและขนาดของตะขอบน

ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiN ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiAlSiN และ TiCrAlSiN และระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiN

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอและสมบัติอื่นๆ ของตะขอบนในกระบวนการเคลือบแข็งด้วย TiN การเคลือบแข็งด้วย TiN สามารถกระทำได้หลายวิธี วิธี oblique angle sputtering เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเคลือบ TiN บนตะขอบน รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการเคลือบด้วยวิธี oblique angle sputtering ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) Saikaew (2019) ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเคลือบบนตะขอบนในกระบวนการเคลือบแข็ง TiN ด้วยวิธี oblique angle sputtering โดยให้ ระยะห่างระหว่างวัสดุที่ถูกเคลือบ (เช่น ตะขอ) และวัสดุที่เคลือบ (เช่น Ti) เป็นระยะคงที่คือ 50 มิลลิเมตร ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

คือ มุมลาดเอียงของอุปกรณ์สำหรับวางตะขอบน (θ) อัตราการหมุนรอบตัวของอุปกรณ์สำหรับวางตะขอบน กระแสไฟฟ้า ความดันและอัตราส่วนการไหลก๊าซ Ar/N₂ โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคชั่นนัลแฟคตอเรียลแบบ 2⁵⁻¹ (fractional factorial design) ผลการศึกษาพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมุมลาดเอียงของอุปกรณ์สำหรับวางตะขอบน (θ) และกระแส และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมุมลาดเอียงของอุปกรณ์สำหรับวางตะขอบน (θ) และอัตราส่วนการไหลก๊าซ Ar/N₂ มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเคลือบ TiN บนตะขอทอวน อัตราการเคลือบสูงสุดของ TiN อยู่ที่ระดับมุมลาดเอียงของอุปกรณ์สำหรับวางตะขอบน (θ) คือ 75 องศา กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ระดับ 0.45 A และอัตราส่วนการไหลก๊าซ Ar/N₂ อยู่ที่ระดับ 1.33 ส่วนอีกสองปัจจัยอยู่ที่ระดับที่สามารถปฏิบัติการเคลือบได้อย่างเหมาะสมในแง่ของเศรษฐศาสตร์และอื่นๆ ใน การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาอิทธิพลของกระแส ความดันและอัตราส่วนการไหลก๊าซ Ar/N₂ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผิวเคลือบ คำนวณน้ำหนักที่หายไปของตะขอบนที่ผ่านการทดสอบการสึกกร่อน โดยที่ค่าความแข็งใช้เครื่องวัดค่าความแข็ง (nano indenter) ยี่ห้อ UMIS รุ่น UMIS II



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเคลือบด้วยวิธี oblique angle sputtering

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในกระบวนการเคลือบแข็ง TiN

ปัจจัย	ระดับ				
	ต่ำสุด (จุดดาว)	ต่ำ	กลาง	สูง	สูงสุด (จุดดาว)
(ค่าปัจจัยในรูปตัวแปรรหัส)	(-1.682)	(-1)	(0)	(1)	(1.682)
กระแส (A)	0.32	0.35	0.40	0.45	0.48
ความดัน (Pa)	33	50	75	100	117
อัตราส่วนการไหลก๊าซ Ar/N ₂	0.15	0.50	1.00	1.50	1.84

ตารางที่ 3.3 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยในกระบวนการเคลือบแข็ง TiN จากตารางจะเห็นว่าค่าปัจจัยแสดงในรูปตัวแปรรหัส (coded variable) และในรูปตัวแปรจริง (natural variable) โดยทั่วไปแล้วรูปแบบสมการถดถอยจะแสดงในรูปตัวแปรรหัสเพราะค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ สามารถแปลความหมายและเข้าใจได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนต้องใช้รูปแบบสมการถดถอยในรูปตัวแปรจริง

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่อยู่ในรูปรหัสและปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริงแสดงได้ดังนี้ สำหรับปัจจัยกระแสไฟฟ้า (A) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A = \frac{DC - (DC_{high} + DC_{low}) / 2}{(DC_{high} - DC_{low}) / 2} \quad (3.1)$$

โดยที่ DC คือปัจจัยกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง DC_{high} คือระดับสูงของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ในขณะที่ DC_{low} คือระดับต่ำของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ดังนั้น

$$A = \frac{DC - (0.45 + 0.35) / 2}{(0.45 - 0.35) / 2} = \frac{DC - 0.4}{0.05}$$

สำหรับปัจจัยความดัน (B) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$B = \frac{Pa - (Pa_{high} + Pa_{low}) / 2}{(Pa_{high} - Pa_{low}) / 2} \quad (3.2)$$

โดยที่ Pa คือปัจจัยความดันที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง Pa_{high} คือระดับสูงของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ในขณะที่ Pa_{low} คือระดับต่ำของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ดังนั้น

$$B = \frac{Pa - (100 + 50) / 2}{(100 - 50) / 2} = \frac{Pa - 75}{25}$$

สำหรับปัจจัยอัตราส่วนของ Ar/N₂ (C) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C = \frac{Ar - (Ar_{high} + Ar_{low}) / 2}{(Ar_{high} - Ar_{low}) / 2} \quad (3.3)$$

โดยที่ Ar คือปัจจัยอัตราส่วนของ Ar/N₂ ที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง Ar_{high} คือระดับสูงของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ในขณะที่ Ar_{low} คือระดับต่ำของปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง ดังนั้น

$$C = \frac{Ar - (1.5 + 0.5) / 2}{(1.5 - 0.5) / 2} = \frac{Ar - 1}{0.5}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่อยู่ในรูปรหัสและปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริงแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบสมการถดถอยว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงหรือไม่นั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (the mean absolute percentage error, MAPE) ของค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการถดถอย ซึ่งนิยามได้จาก

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|actual - predicted\ value|}{actual\ value} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ *actual* คือค่าที่ได้จากการทดลอง *predicted value* คือค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการถดถอย และ n คือจำนวนที่ทำการทดลองหรือจำนวนทรีตเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combinations) ในการทดลอง เช่น $n = 18$ ตามตารางที่ 3.4 เป็นต้น ความหมายของค่า *MAPE* แสดงดังตารางที่ 3.5 (Makridakis et al., 1983)

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่อยู่ในรูปรหัสและปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง

No.	ปัจจัยที่อยู่ในรูปปัจจัยจริง			ปัจจัยที่อยู่ในรูปรหัส		
	DC current (Amp), A	Pressure (Pa), B	Ar/N ₂ , C	DC current, A	Pressure, B	Ar/N ₂ , C
1	0.35	50	0.5	-1	-1	-1
2	0.45	50	0.5	1	-1	-1
3	0.35	100	0.5	-1	1	-1
4	0.45	100	0.5	1	1	-1
5	0.35	50	1.5	-1	-1	1
6	0.45	50	1.5	1	-1	1
7	0.35	100	1.5	-1	1	1
8	0.45	100	1.5	1	1	1
9	0.40	75	1.0	0	0	0
10	0.40	75	1.0	0	0	0
11	0.40	75	1.0	0	0	0
12	0.40	75	1.0	0	0	0
13	0.32	75	1.0	-1.6	0	0
14	0.48	75	1.0	1.6	0	0
15	0.40	33	1.0	0	-1.68	0
16	0.40	117	1.0	0	1.68	0
17	0.40	75	0.16	0	0	-1.68
18	0.45	75	1.84	1	0	1.68

ตารางที่ 3.5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์	ความหมาย
$MAPE < 10\%$	ดีเยี่ยม
$10\% \leq MAPE < 20\%$	ดี
$20\% \leq MAPE < 50\%$	สามารถยอมรับได้
$MAPE \geq 50\%$	ไม่สามารถยอมรับได้

เพื่อให้ตรงตามจุดประสงค์ของการศึกษานี้ การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยและการแก้ปัญหาเกี่ยวกับผลตอบสนองหลายตัว (เช่น ค่าความแข็ง ค่าน้ำหนักที่หายไป) ที่ทำให้ได้ตามจุดประสงค์สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) (Deringer and Suich, 1980) โดยที่มีการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlaid contour plot)

นอกจากนี้ ยังดำเนินการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาระดับของปัจจัยที่ทำให้กระบวนการเคลือบ TiN มีคุณภาพดีที่สุด โดยทำให้ความผันแปรของผลตอบแทนมีค่าน้อยที่สุด โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert® V.7.0 เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการสึกหรอน้อยที่สุด โดยใช้ค่าความพึงพอใจ (desirability) ที่เหมาะสม

นอกจากนั้นการวิเคราะห์ลักษณะของผิวของตะขอด้วยภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เป็นแนวทางหนึ่งในการพิจารณาการตัดสินใจของผู้ประกอบการเพื่อเลือกวัสดุที่สามารถยืดอายุการใช้งานของตะขอและสามารถรักษาคุณภาพของอวนที่ทอได้ด้วย

3.2.2 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiAlSiN และ TiCrAlSiN

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในด้านความต้านทานการสึกหรอ พฤติกรรมการสึกหรอ และศึกษาสมบัติเชิงกลของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติก โดยเปรียบเทียบกับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมซึ่งโรงงานใช้งานอยู่

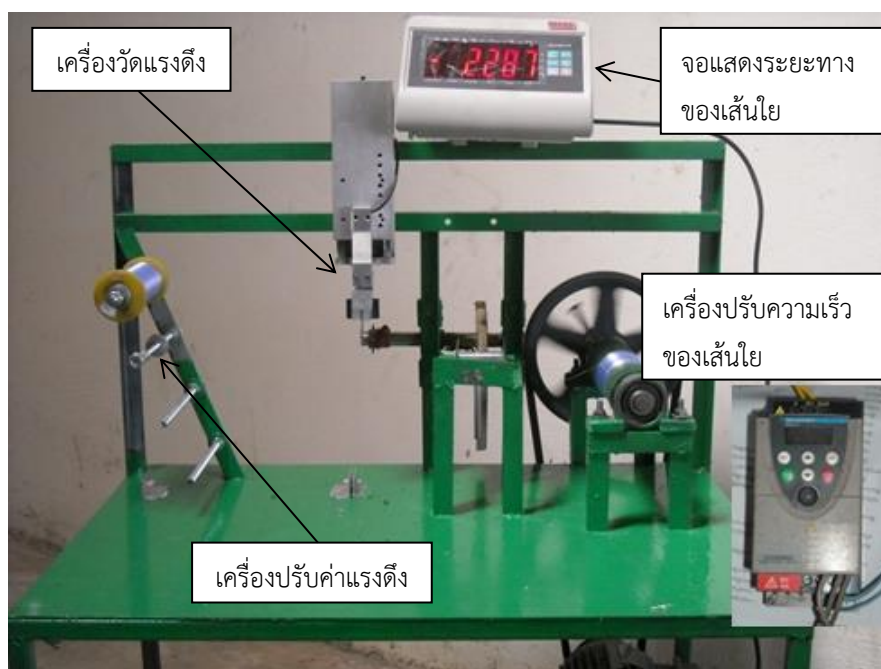
การดำเนินการเคลือบผิวตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อโดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN เริ่มด้วยการนำชิ้นงานไปขัดผิวให้เรียบ แล้วทำความสะอาดโดยสารซักฟอกในน้ำด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นนำชิ้นงานเข้าเครื่องเคลือบโดยเครื่องที่ใช้เป็นระบบอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกซึ่งมีหัวจ่ายสาร 5 หัวโดยที่ทุกหัวติดตั้งระบบ straight duct filter เมื่อชิ้นงานเข้าสู่เครื่องเคลือบจะทำการสูบล้างอากาศออกจากเครื่องพร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน เมื่อความดันในเครื่องลดลงถึง 5×10^{-3} ปาสคาลและอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสแล้วชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดด้วยพลาสมาของโลหะจากการอาร์คแบบฟิลเตอร์คาโรติกโดยมีการจ่ายไฟให้ชิ้นงาน (substrate bias) ที่ 1,000 โวลต์ เพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์เอาสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงาน ในกรณีของ TiN จะใช้พลาสมาของ Ti เพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์เอาสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและอะตอมของ Ti จะถูกฝังลงไปบนผิวชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการเคลือบ Ti เป็นชั้นรองพื้นแล้วจึงเคลือบ TiN ที่ความดัน 0.5 ปาสคาล โดยมีการจ่ายไฟให้ชิ้นงานที่ 100 โวลต์ ในกรณีของ TiAlSiN จะใช้พลาสมาของ Cr เพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์เอาสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและอะตอมของ Cr จะถูกฝังลงไปบนผิวชิ้นงานในเวลาเดียวกัน จากนั้นจึงทำการเคลือบ Cr เป็นชั้นรองพื้นแล้วจึงเคลือบชั้นของ nano-composite TiCrAlSiN จากนั้นจึงเคลือบทับชั้นบนสุดด้วย TiAlSiN ที่ความดัน 2 ปาสคาล โดยมีการจ่ายไฟให้ชิ้นงาน 75 โวลต์ ในกรณีของ TiCrAlSiN จะใช้พลาสมาของ Cr เพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์เอาสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและอะตอมของ Cr จะถูกฝังลงไปบนผิวชิ้นงานในเวลาเดียวกัน จากนั้นทำการเคลือบ Cr เป็นชั้นรองพื้นแล้วจึงเคลือบชั้นของ nano-composite TiCrAlSiN ที่ความดัน 2 ปาสคาล โดยมีการจ่ายไฟให้ชิ้นงาน 75 โวลต์ การเคลือบทั้งสามกรณีต้องรักษาอุณหภูมิห้องเคลือบไว้ที่ 350 องศาเซลเซียสตลอดทั้งกระบวนการ ความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบจากกระบวนการนี้ประมาณ 3 ไมครอน ในการศึกษาตะขอทั้ง 5 รูปแบบนี้ ตะขอแต่ละชนิดถูกเตรียมขึ้นมาชนิดละ 5 ตัวเพื่อใช้ในการทดสอบค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิว และการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอ

งานวิจัยในอดีตมีการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเพื่อจำลองสภาพการทำงานจริงสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอกัน เช่น Mondal et al. (2005) ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

(abrasive wear) เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มธาตุสังกะสีต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีกับโลหะผสม Al-Zn โดยกำหนดสภาวะการทดสอบด้วยแรงกด 1-7 N ระยะการเคลื่อนที่ไป-กลับ 108 m และจำนวนการเคลื่อนที่ไป-กลับ 400 cycles/time ในขณะที่ Vasquez et al. (2008) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอโดยประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM G133-02 ในรูปแบบ ball-on-flat เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุผสมโพลิเมอร์ โดยกำหนดสภาวะการทดสอบด้วยแรงกด 25 N ระยะการเคลื่อนที่ไป-กลับ 10 mm และทดสอบในสภาวะแบบมีสารหล่อลื่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารหล่อลื่น Yousif (2013) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอเพื่อศึกษาศาสตร์ทางโทรโบโลยี โดยประยุกต์ใช้มาตรฐานต่างๆ เกี่ยวกับการทดสอบการสึกหรอ ได้แก่ มาตรฐาน ASTM G99, ASTM G77, G137-953, ASTM G655 และ ASTM G105 เป็นต้น โดยสามารถทดสอบได้ทั้งการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบพื้นที่ นอกจากนี้ จากการศึกษายังสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการสึกหรอและแรงเสียดทานคือ สภาวะเกี่ยวกับผิวสัมผัสระหว่างกัน และกัน นอกจากนี้ เครื่องทดสอบการสึกหรอที่ออกแบบและสร้างขึ้นในรูปแบบ pin-on-disk ก็มีการสร้างกันอย่างแพร่หลายอีกมากมาย ได้แก่ Guicciardi et al. (2002), Cetinkaya (2006), Ferrer et al. (2010) เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบเส้นไถแบบแห้ง (dry sliding wear) การสึกหรอของตะขอเป็นการสึกหรอแบบเส้นไถแบบแห้งที่เป็นผลมาจากการไหลผ่านของเส้นใยที่มีแรงดึงผ่านบริเวณคอ (บริเวณพับขึ้นรูป) ของตะขอโดยที่ขนาดของเส้นใย ความตึงของเส้นใยและความเร็วของการไหลผ่านมีค่าคงที่ ดังนั้น ขนาดของการสึกหรอจึงขึ้นกับระยะหรือความยาวของเส้นใยที่ผ่านตะขอ เครื่องที่ใช้ในการทดสอบจึงมีกลไกสำคัญ ได้แก่ ต้องมีเครื่องวัดแรงดึงของเส้นใยในขณะที่เส้นใยไหลผ่านตะขอ ต้องสามารถปรับค่าแรงดึงของเส้นใยได้ ต้องสามารถปรับความเร็วของเส้นใยได้ และต้องสามารถวัดระยะทางของเส้นใยได้ จากแนวทางดังกล่าวจึงสามารถออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอ ดังแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอที่เคลือบด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN (Intanon and Saikaew, 2016)

ก่อนที่จะทำการทดสอบการสึกหรอของเครื่องที่ออกแบบ ผู้วิจัยต้องทำการทดสอบการสึกหรอของตะขอบนเครื่องทอวนจริงในโรงงานกรณีศึกษา โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบให้ใกล้เคียงกับการใช้งานในโรงงาน ได้แก่ ความตึงของเส้นใยเท่ากับ 0.3 นิวตัน (เท่ากับ ความตึงของเส้นใยที่เกิดขึ้นในการทอวนจริง) ความเร็วการไหลผ่านของเส้นใย 60 เซนติเมตรต่อวินาที (36 เมตร/นาที่) ระยะทดสอบ 72,000 เมตร และเส้นใยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.12 มิลลิเมตร

การทดสอบการสึกหรอใช้การชั่งน้ำหนักและทำการคำนวณหาน้ำหนักที่หายไปของตะขอแต่ละตัว การชั่งน้ำหนักจะทำการชั่งน้ำหนักที่ระยะทดสอบเท่ากับ 72,000 เมตรโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง

ขั้นตอนการศึกษา

- ก่อนที่จะทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิว (Ra) วัดค่าความแข็งและทำการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ งานวิจัยนี้ยังทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM/EDX
- นำตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกและตะขอบนที่โรงงานใช้ในปัจจุบัน (ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการชุบฮาร์ดโครม) มาทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (roughness tester) ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1 โดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของตะขอบน 3 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย
- นำตะขอบนทั้ง 5 รูปแบบๆ ละ 5 ตัวมาทำการทดสอบวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดค่าความแข็ง (nano indenter) ยี่ห้อ UMIS รุ่น UMIS II โดยใช้น้ำหนักกด 50 mN แล้วทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของตะขอบน 3 จุด จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ย
- นำตะขอบนทั้ง 5 รูปแบบๆ ละ 5 ตัวมาทำการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอโดยชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบแล้วหาผลต่างซึ่งก็คือน้ำหนักที่หายไป โดยที่ทำการหาน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลาในการทดสอบคือ 60, 120, 180, 240, ..., 840 นาที
- วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี LSD ของข้อมูลค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิว และค่าน้ำหนักที่หายไป
- วิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM/EDX ก่อนและหลังการทดสอบ
- วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

3.2.3 ระเบียบวิธีวิจัยการปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN

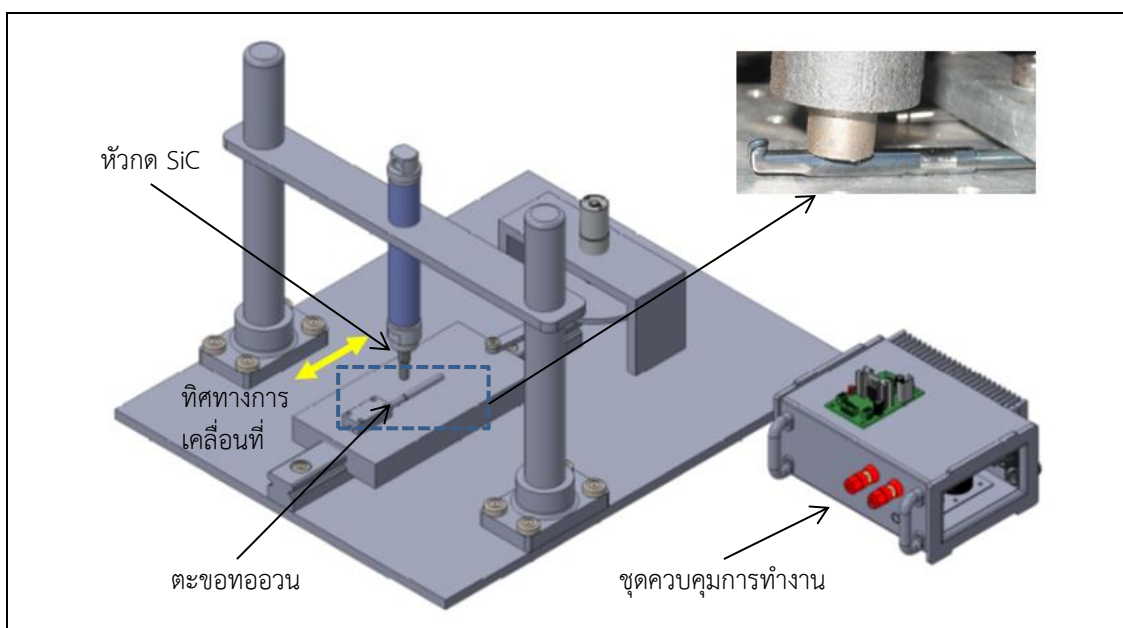
งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในด้านความต้านทานการสึกหรอ พฤติกรรมการสึกหรอ และศึกษาสมบัติเชิงกลของตะขอบน 8 รูปแบบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN, MoC และ MoCN ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN, MoC และ MoCN โดยกระบวนการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

การดำเนินการเคลือบผิวตะขอด้วยวิธีการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงเริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดชิ้นงานตะขอด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกแล้วล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) จากนั้นทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ในกลุ่มชิ้นงานตะขอที่ชุบฮาร์ดโครมนั้นมีสถานะการเคลือบด้วยสารละลายกรดโครเมียมกับกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วน 100:1 ณ อุณหภูมิในการชุบ 55 °C และเวลาในการชุบ 80 นาที ซึ่งได้ความหนาผิว

เคลือบประมาณ 70 μm จากนั้นจึงนำชิ้นงานตะขอทั้ง 2 กลุ่มคือ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมมาทำการเคลือบผิวตะขอทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ MoN, MoC และ MoCN ด้วยวิธีการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยใช้แผ่นสารเคลือบ Mo ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ทำการติดตั้งให้มีระยะห่างจากชิ้นงานตะขอที่จะทำการเคลือบเท่ากับ 80 mm ในกระบวนการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงต้องปรับให้ระดับสุญญากาศในห้องเคลือบเป็นสุญญากาศที่ระดับประมาณ 1×10^{-4} Pa ก่อนทำการเคลือบจำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงานตะขอทอวนด้วยพลาสมาความถี่วิทยุ (radio frequency plasma: RF-plasma) 75 w ที่ระดับแรงดันก๊าซอาร์กอน 0.1 Pa ด้วยระยะเวลา 20 นาที ในขั้นตอนการเคลือบผิว Mo ในขั้นตอนต่อมาต้องใช้ระดับแรงดันก๊าซผสม 0.5 Pa ณ ระดับไฟฟ้ากระแสตรง 0.4 A โดยมีรูปแบบปฏิกิริยาของก๊าซผสมไนโตรเจนและก๊าซอะเซทิลีนในการเคลือบผิวทั้ง 3 รูปแบบด้วยอัตราส่วนก๊าซผสม Ar/N₂ คือ 50:50 สำหรับผิวเคลือบ MoN อัตราส่วนก๊าซผสม Ar/C₂H₂ คือ 50:50 สำหรับผิวเคลือบ MoC และอัตราส่วนก๊าซผสม Ar/N₂/C₂H₂ คือ 50:25:25 สำหรับผิวเคลือบ MoN ตามลำดับ ซึ่งความหนาผิวเคลือบที่ได้โดยเฉลี่ยประมาณ 3 μm สำหรับผิวเคลือบทั้ง 3 รูปแบบ

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอ

เนื่องจากการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอใช้เวลาทดสอบนานและมักประสบปัญหาความขัดข้องของเครื่องทดสอบและการทดสอบ ดังนั้นทีมงานวิจัยจึงออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอที่เคลือบด้วย MoN, MoC และ MoCN ขึ้นมาใหม่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอที่เคลือบด้วย MoN, MoC และ MoCN
(Srisattayakul et al., 2017)

ในการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอที่เคลือบด้วย MoN, MoC และ MoCN โดยประยุกต์มาตรฐาน ASTM มุ่งเน้นให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริง องค์ประกอบสำคัญต่างๆ ของเครื่องทดสอบการสึกหรอโดยประยุกต์มาตรฐาน ASTM นี้ จึงได้มีการนำเอามาตรฐานของ ASTM ในแต่ละรูปแบบมาใช้งาน โดยมีมาตรฐาน ASTM G133-05 เป็นมาตรฐานหลัก มาตรฐาน ASTM G133-05 มีขอบเขตครอบคลุมการศึกษาเพื่อพิสูจน์ความสามารถในความต้านทานการสึกหรอแบบลื่นไถล ในลักษณะการเคลื่อนที่ไป-กลับ

(reciprocating) ของวัสดุเซรามิก วัสดุโลหะ และวัสดุที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน โดยมีรูปแบบผิวสัมผัสระหว่างกัน แบบ flat-on flat ตามมาตรฐาน ASTM G132 ซึ่งมีหัวกดวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ขนาดความหยาบ 1000 grit โดยออกแรงกด 5 นิวตัน ในแนวตั้งลงบนชิ้นงานที่วางอยู่ในแนวแกนนอน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นๆ ได้แก่ ความยาวช่วงระยะการเคลื่อนที่ไป-กลับเท่ากับ 1.8 เมตรต่อนาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ไป-กลับเท่ากับ 70 รอบต่อนาที จำนวนการเคลื่อนที่ไป-กลับ 60 รอบต่อนาที ช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 40-240 นาที โดยแบ่งเป็น ช่วงๆ เพิ่มขึ้นทีละ 40 นาที และทดสอบในสภาวะแบบแห้ง

ขั้นตอนการศึกษา

- ก่อนที่จะทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิว วัดค่าความแข็งและทำการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ งานวิจัยนี้ยังทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM/EDX
- นำตะขอบน 8 รูปแบบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครมและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN, MoC และ MoCN ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN, MoC และ MoCN มาทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิว ด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1 โดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของตะขอบน 3 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย
- นำตะขอบนทั้ง 8 รูปแบบๆ ละ 5 ตัวมาทำการทดสอบวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งยี่ห้อ UMIS รุ่น UMIS II โดยใช้น้ำหนักกด 50 mN แล้วทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของตะขอบน 3 จุด จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ย
- นำตะขอบนทั้ง 8 รูปแบบๆ ละ 5 ตัวมาทำการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอโดยใช้น้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบแล้วหาผลต่างซึ่งก็คือน้ำหนักที่หายไป โดยที่ทำการหาน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลาในการทดสอบคือ 40, 80, 120, ..., 240 นาที
- วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติของข้อมูลค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิว และค่าน้ำหนักที่หายไป
- วิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM/EDX ก่อนและหลังการทดสอบ
- วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

บทที่ 4 ผลการวิจัย

บทนี้แสดงผลการวิจัยเป็นสองหัวข้อใหญ่คือ การปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่างซึ่งศึกษาผลกระทบของปัจจัยของกระบวนการชุบฮาร์ดโครมต่อการสึกหรอของตะขอล่างและการปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนซึ่งศึกษาผลกระทบของการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างๆ บนตะขอบน

4.1 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่าง

4.1.1 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอล่างด้วยการออกแบบการทดลอง

ตะขอล่างผลิตจากเหล็กลวดสปริง (spring wire steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.39 มิลลิเมตร มาตรฐานของเหล็กลวดนี้คือ JIS G 3522 เกรด SWP-A ส่วนผสมสำคัญของเหล็กลวดนี้คือ C = 0.60-0.95% wt, Si = 0.12-0.32% wt, Mn = 0.3-0.9% wt เหล็กลวดนี้ผลิตโดยกระบวนการขึ้นรูปเย็นที่ทำให้ลวดมีความแข็งแรง มีความต้านทานการเปลี่ยนรูปสูง แต่สามารถดัดงอได้ ส่วนผสมของคาร์บอนที่สูงสามารถที่จะกระทำกระบวนการชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะการทำงานของตะขอล่างของเครื่องทอวน ผลการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของตะขอล่างและผลกระทบของปัจจัยของกระบวนการชุบฮาร์ดโครมต่อการสึกหรอของตะขอล่าง

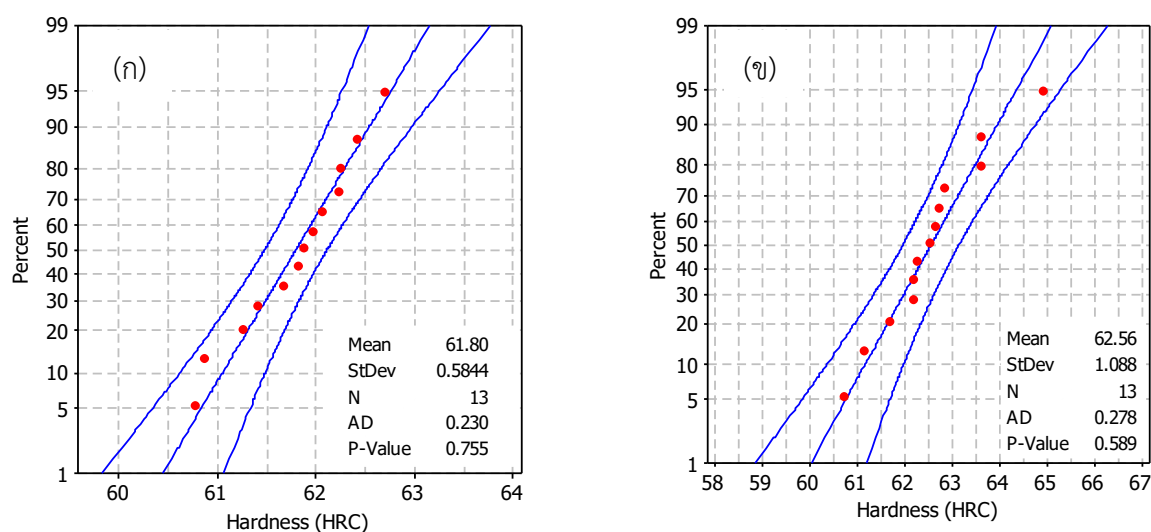
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองค่าความแข็งแรงและการสึกหรอของตะขอล่างด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design) โดยแยกรูปแบบการขัดออกเป็นสองรูปแบบคือ การขัดผิวด้วยใยขัด (thread) และการขัดผิวด้วยใยขัดและการขัดมัน (thread and polished) การสึกหรอของตะขอล่างวัดด้วยความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของตะขอก่อนและหลังจากการทดสอบการสึกหรอซึ่งเรียกว่าน้ำหนักที่หายไป (weight loss) ผลการทดลองค่าความแข็งแรงและการสึกหรอของตะขอล่างสามารถแสดงให้อยู่ในรูปกราฟความน่าจะเป็น (probability plot) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติหรือไม่ รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความน่าจะเป็นของข้อมูลค่าความแข็งแรงเมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและด้วยใยขัดและขัดมัน จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีแนวโน้มอยู่ในแนวเส้นตรงและอยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่มีค่า p -value สูงกว่า 0.05 เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี Anderson and Darling ซึ่งเป็นการยืนยันว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ นั่นคือ ข้อมูลทั้งสองชุดสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งสามที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยของตะขอล่าง การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติ (model adequacy checking) จำเป็นต้องกระทำก่อนที่จะวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขอล่าง

No.	Temp (° C), A	Time (min), B	Polishing condition (C)	Hardness (HRC)	Before (g)	After (g)	Weight loss (g)
1	30	40	Thread	61.89	1.21510	1.21500	0.00010
2	180	40	Thread	62.25	1.06774	1.06762	0.00012
3	30	80	Thread	62.26	1.25012	1.24988	0.00024
4	180	80	Thread	61.27	1.07426	1.07400	0.00026
5	0	60	Thread	60.78	1.23534	1.23526	0.00008
6	210	60	Thread	62.08	1.07570	1.07566	0.00004
7	105	32	Thread	61.83	1.15510	1.15498	0.00012
8	105	88	Thread	62.71	1.23666	1.23618	0.00048
9	105	60	Thread	61.41	1.21756	1.21746	0.00010
10	105	60	Thread	62.42	1.23640	1.23600	0.00040
11	105	60	Thread	60.87	1.22578	1.22552	0.00026
12	105	60	Thread	61.67	1.21278	1.21262	0.00016
13	105	60	Thread	61.97	1.07600	1.07584	0.00016
14	30	40	Thread & Polished	60.74	1.05378	1.05360	0.00018
15	180	40	Thread & Polished	62.74	1.06604	1.06590	0.00014
16	30	80	Thread & Polished	64.92	1.06500	1.06484	0.00016
17	180	80	Thread & Polished	61.70	1.08076	1.08050	0.00026
18	0	60	Thread & Polished	61.17	1.05316	1.05310	0.00006
19	210	60	Thread & Polished	62.28	1.07586	1.07566	0.00020
20	105	32	Thread & Polished	62.21	1.06328	1.06308	0.00020
21	105	88	Thread & Polished	62.67	1.10030	1.10014	0.00016
22	105	60	Thread & Polished	62.53	1.08168	1.08132	0.00036
23	105	60	Thread & Polished	62.20	1.08064	1.08042	0.00022
24	105	60	Thread & Polished	63.61	1.09284	1.09270	0.00014
25	105	60	Thread & Polished	62.85	1.07678	1.07644	0.00034
26	105	60	Thread & Polished	63.60	1.11032	1.11006	0.00026

รูปที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พอเหมาะสำหรับข้อมูลค่าความแข็งของตะขอล่าง รูปที่ 4.2(ก) แสดงกราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ รูปที่ 4.2(ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต จากกราฟ จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าสังเกตในแต่ละระดับ รูปที่ 4.2(ค) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ จากกราฟ จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเป็นอิสระต่อกัน รูปที่ 4.2(ง) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยเวลาในการชุบฮาร์ดโครม จากกราฟ จะเห็นว่าค่าประมาณในแต่ละระดับเวลาในการชุบฮาร์ดโครมมีค่าไม่แตกต่างจากค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองจริงในแต่ละระดับเวลาในการชุบฮาร์ดโครม จากการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยการตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบสรุปได้ว่า ค่าสังเกตที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มี

ผลกระทบต่อค่าความแข็งของตะขอล่างมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป โดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องแปลงข้อมูล ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ



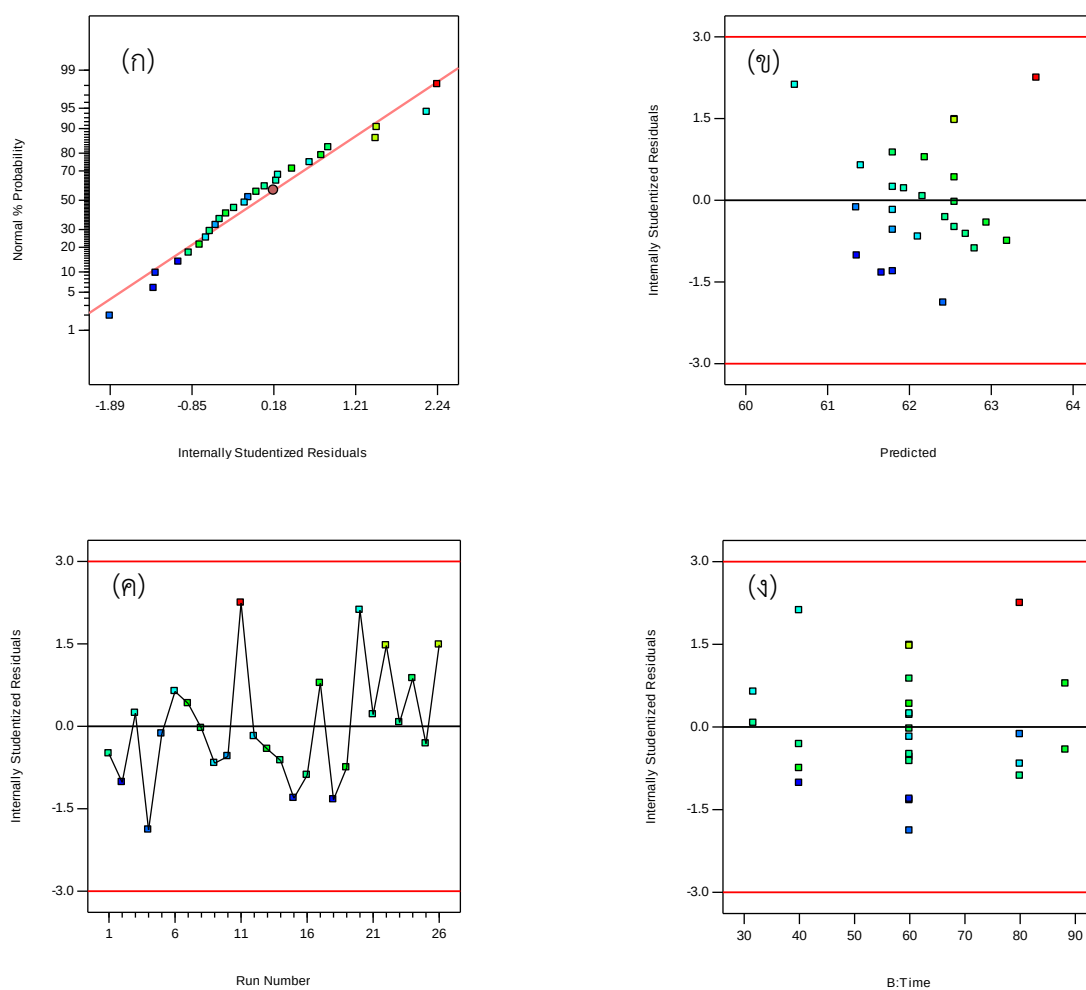
รูปที่ 4.1 กราฟความน่าจะเป็นของข้อมูลค่าความแข็ง (ก) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและ (ข) เมื่อพิจารณาการการขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน

ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าความแข็งของตะขอล่างตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบสมการถดถอยที่มีปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปตะขอล่างและเวลาในการชุบฮาร์ดโครมและปัจจัยหลักทั้งสามมีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลค่าความแข็ง นอกจากนี้ ค่า p -value ของ lack-of-fit ยังมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการยืนยันอย่างชัดเจนว่ารูปแบบสมการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Hardness} = 62.18 + 0.097A + 0.28B + 0.38C - 0.82AB \quad (4.1)$$

โดยที่ Hardness คือค่าความแข็ง A คืออุณหภูมิในการขึ้นรูปและ B คือเวลาในการชุบฮาร์ดโครม

จากสมการที่ (4.1) นำมาเขียนเป็นเส้นโครงร่าง (contour plot) ของความแข็งดังรูปที่ 4.5(ก) ซึ่งเป็นการแสดงเส้นโครงร่างของความแข็งกรณีตะขอล่างขัดผิวด้วยใยขัด จากรูป จะเห็นว่าเส้นโครงร่างที่แสดงค่าความแข็งสูงสุดคือ 62.6 HRC อยู่ที่มุมซ้ายด้านบนของกราฟ ซึ่งเป็นบริเวณที่ค่าของอุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากับ 30°C และเวลาในการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ 80 นาที ในส่วนที่อยู่ตรงข้าม (มุมขวาด้านล่าง) ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นโครงร่างเข้าใกล้ที่มุมมากขึ้น ค่าที่มุมขวาด้านล่างคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป 180°C และเวลาในการชุบฮาร์ดโครม 40 นาที การเกิดพฤติกรรมลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสอง (อุณหภูมิในการขึ้นรูปและเวลาในการชุบฮาร์ดโครม) จากเส้นโครงร่างควรเลือกกระบวนการผลิตที่เป็นการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 30°C และชุบนาน 80 นาที

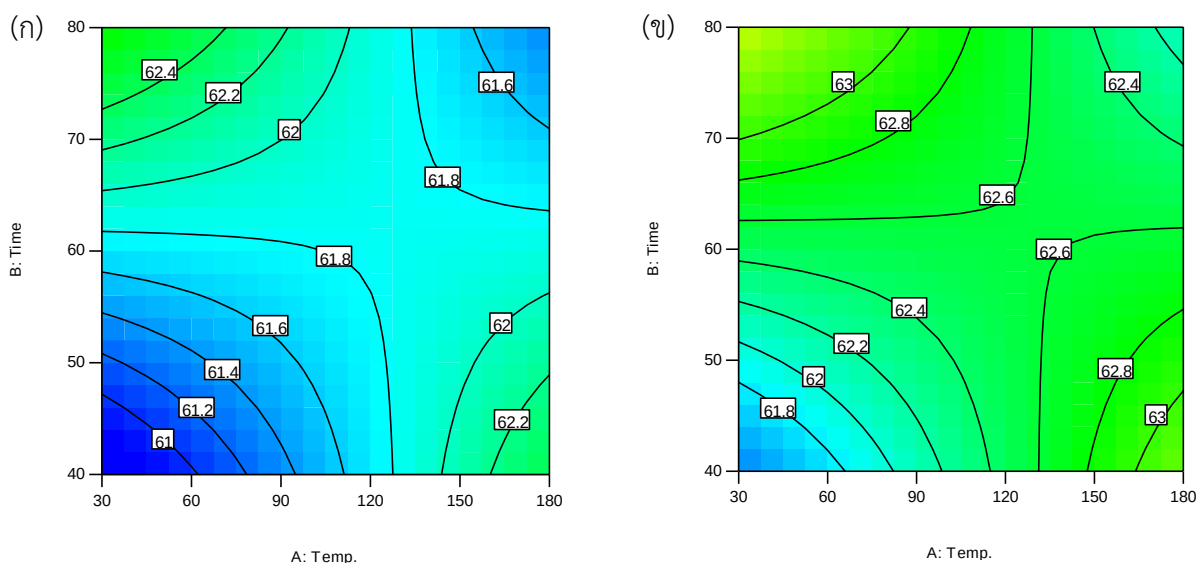


รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พหุคูณกับข้อมูลค่าความแข็ง (ก) กราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยเวลาในการชุบฮาร์ดโครม

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าความแข็งของตะขอล่างตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	10.47	4	2.62	4.77	0.0068
A-Temperature	0.15	1	0.15	0.28	0.6045
B-Time	1.22	1	1.22	2.23	0.1502
C- Polishing	3.70	1	3.70	6.74	0.0168
AB	5.40	1	5.40	9.83	0.0050
Error	11.52	21	0.55		
Lack of fit	8.56	13	0.66	1.78	0.2102
Pure error	2.97	8	0.37		
Total	22.00	25			

รูปที่ 4.3(ข) เป็นการแสดงเส้นโครงร่างของความแข็งแกร่งตะขอขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน จากรูป จะเห็นว่า เส้นโครงร่างที่แสดงค่าความแข็งแกร่งมีลักษณะคล้ายกันกับเส้นโครงร่างในรูปที่ 4.3(ก) กล่าวคือที่บริเวณมุมซ้าย ด้านบนและบริเวณมุมขวาด้านล่างเป็นบริเวณที่แสดงค่าความแข็งแกร่งที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ยิ่งเข้าไปใกล้มุมค่าความแข็งแกร่งก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสอง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าความแข็งแกร่งของตะขอล่างจะมีพฤติกรรมเหมือนกัน แต่ค่าความแข็งแกร่งของตะขอล่างที่ขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมันนั้นมีค่าสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองในขณะที่ตะขอล่างผ่านการขัดผิวต่างกันเป็นตัวทำให้ค่าความแข็งแกร่งแตกต่างกันได้



รูปที่ 4.3 เส้นโครงร่างค่าความแข็งแกร่งของตะขอล่าง (ก) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและ (ข) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน (Intanon and Saikaew, 2016)

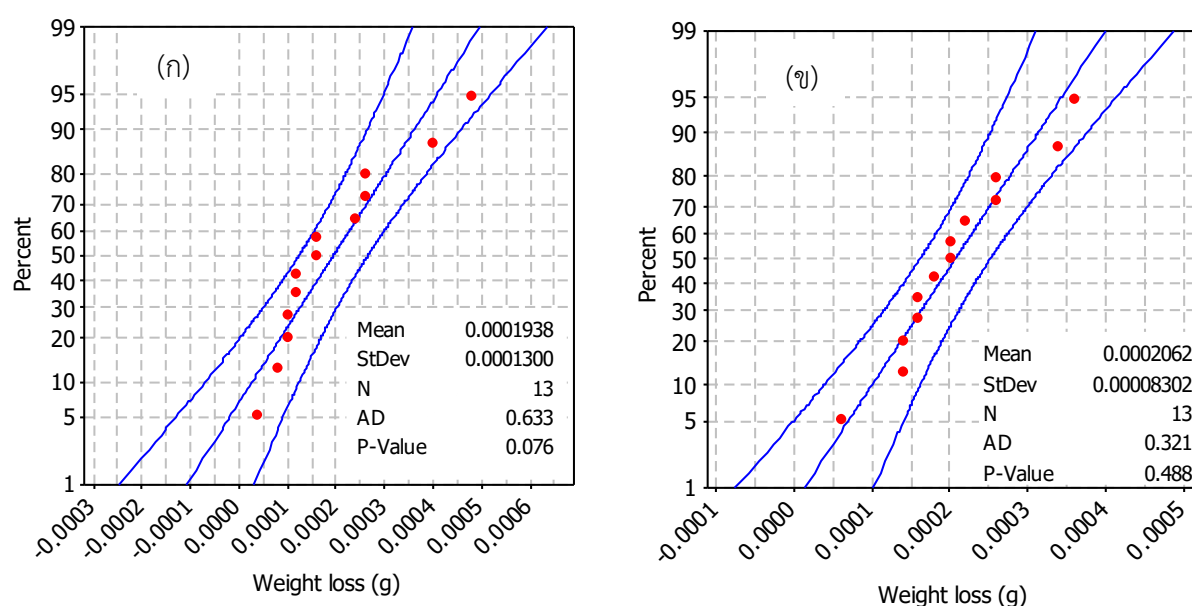
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความน่าจะเป็นของค่าน้ำหนักที่หายไป เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและด้วยใยขัดและขัดมัน จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีแนวโน้มอยู่ในแนวเส้นตรงและอยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่มีค่า p -value สูงกว่า 0.05 เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี Anderson and Darling ซึ่งเป็นการยืนยันว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ นั่นคือ ข้อมูลทั้งสองชุดสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งสามที่มีผลกระทบต่อค่าน้ำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ยในการทดสอบความสึกหรอของตะขอล่างด้วยเครื่องทอวนจริง การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติจำเป็นต้องกระทำก่อนที่จะวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พอเหมาะสำหรับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่าง รูปที่ 4.5(ก) แสดงกราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ รูปที่ 4.5(ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต จากกราฟ จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าสังเกตในแต่ละระดับ รูปที่ 4.5(ค) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ จากกราฟ จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเป็นอิสระต่อกัน รูปที่ 4.5(ง) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยเวลาในการชุบฮาร์ดโครม จากกราฟ จะเห็นว่าค่าประมาณในแต่ละระดับเวลาในการชุบฮาร์ดโครมมีค่าไม่แตกต่างจากค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองจริงในแต่ละระดับเวลาในการชุบฮาร์ดโครม

โครม จากการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยการตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบสรุปได้ว่า ค่าสังเกตที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่างมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป โดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องแปลงข้อมูล ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

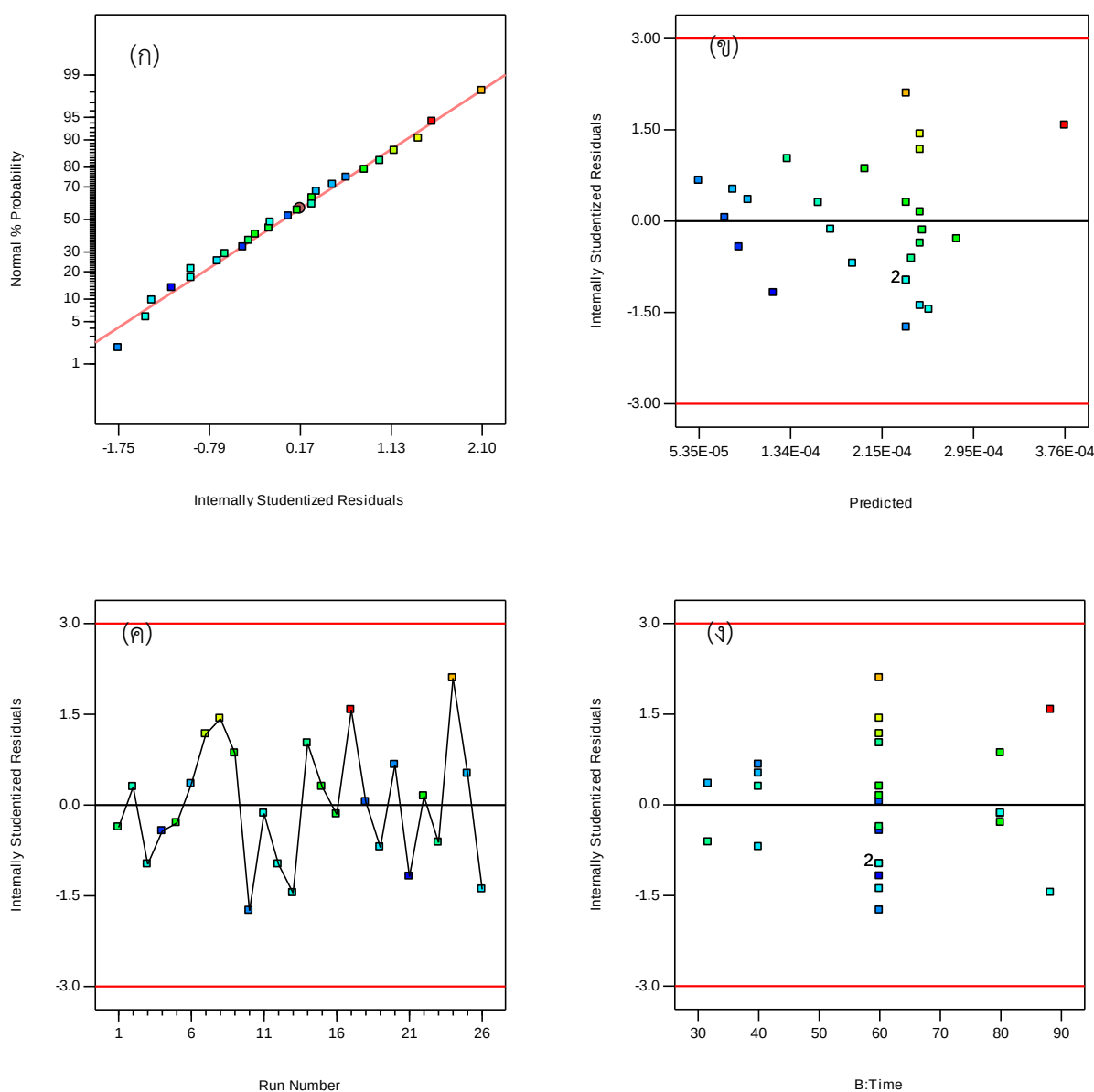
ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่างตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบสมการถดถอยที่มีปัจจัยร่วมระหว่างเวลาในการชุบฮาร์ดโครมและรูปแบบการขัด พจน์กำลังสองของอุณหภูมิในการขึ้นรูป รวมทั้งปัจจัยหลักทั้งสามมีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไป นอกจากนี้ ค่า p -value ของ lack-of-fit ยังมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการยืนยันอย่างชัดเจนว่ารูปแบบสมการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลน้ำหนักที่หายไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\text{Loss} = 0.000243 + 0.0000151A + 0.000052B + 0.0000062C - 0.0000466BC - 0.000069A^2 \quad (4.2)$$

โดยที่ Loss คือน้ำหนักที่หายไป A คืออุณหภูมิในการขึ้นรูป B คือเวลาในการชุบฮาร์ดโครมและ C คือรูปแบบการขัด



รูปที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นของข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไป (ก) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและ (ข) เมื่อพิจารณาการการขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน

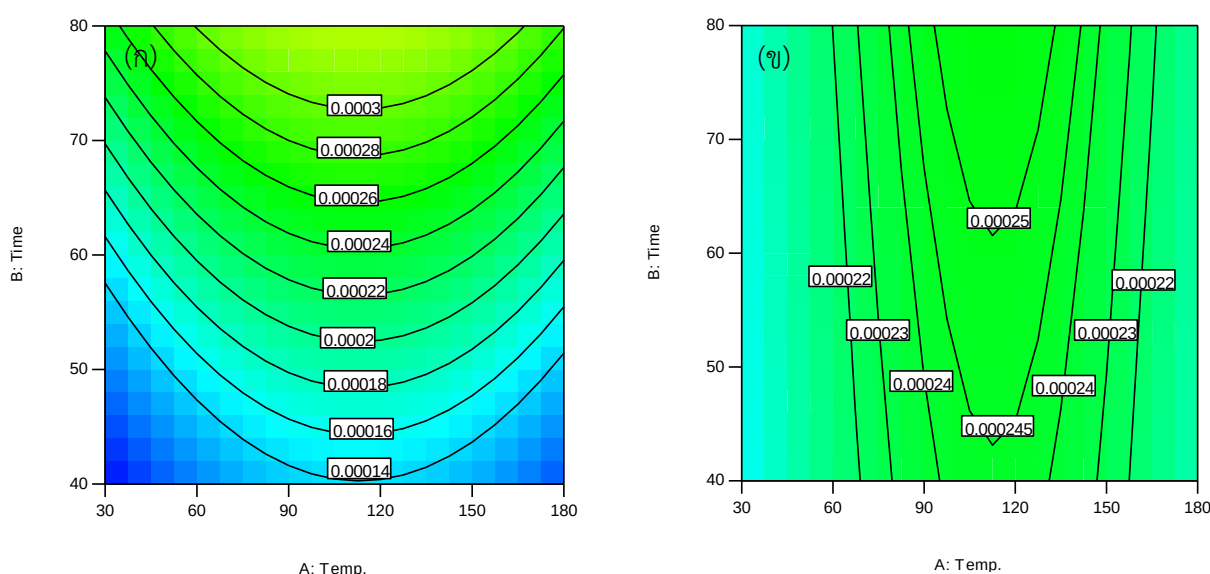


รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พหุเหมาะ กับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอบน (ก) กราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยเวลาในการชุบฮาร์ดโครม

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่างตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	1.506×10^{-7}	5	3.011×10^{-8}	4.43	0.0070
A-Temperature	3.643×10^{-9}	1	3.643×10^{-9}	0.54	0.4725
B-Time	4.332×10^{-8}	1	4.332×10^{-8}	6.38	0.0201
C- Polishing	9.846×10^{-10}	1	9.846×10^{-10}	0.14	0.7074
BC	3.475×10^{-8}	1	3.475×10^{-8}	5.12	0.0350
A ²	6.785×10^{-8}	1	6.785×10^{-8}	9.99	0.0049
Error	1.358×10^{-7}	20	6.792×10^{-9}		
Lack of fit	4.800×10^{-8}	12	4.000×10^{-9}	0.36	0.9439
Pure error	8.784×10^{-8}	8	1.098×10^{-8}		
Total	2.864×10^{-7}	25			

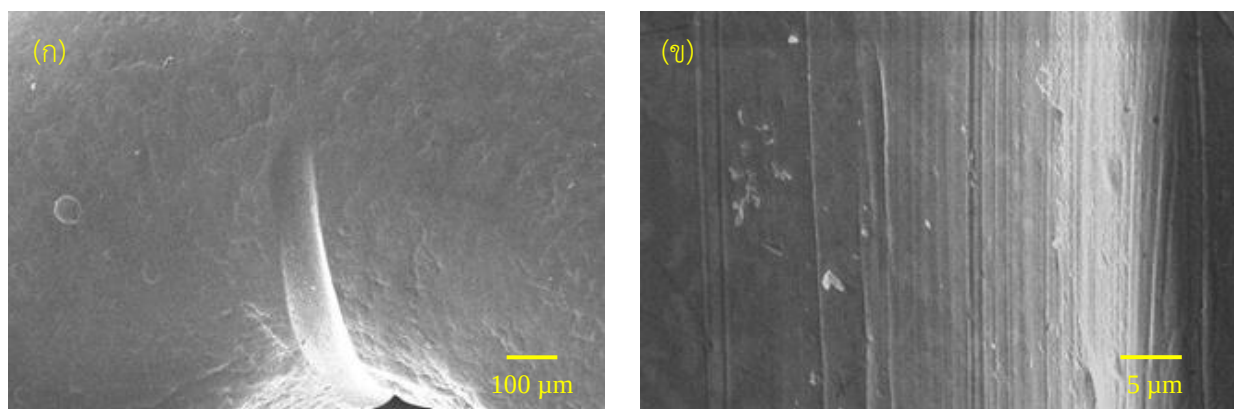
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่แสดงดังสมการที่ (4.2) สามารถนำไปสร้างเส้นโครงร่างน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่างดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดจะเห็นว่าน้ำหนักที่หายไปมีค่าลดลง (นั่นคือค่าความต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างดีขึ้น) ถ้าทำการชุบฮาร์ดโครมในเวลาทีลดลงโดยที่ทำการขึ้นรูปตะขอล่างที่ระดับอุณหภูมิคงที่ ในทางตรงกันข้าม น้ำหนักที่หายไปมีความเป็นอิสระกับเวลาในการชุบฮาร์ดโครมเมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน สภาพะของระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่าต่ำสุด (นั่นคือค่าความต้านทานการสึกหรอของตะขอล่างดีขึ้น) คือทำการชุบฮาร์ดโครมในเวลา 40 นาทีและทำการขึ้นรูปตะขอล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C โดยทำการขัดผิวตะขอล่างด้วยใยขัดและขัดมัน ถ้าพิจารณาในแง่เศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมแล้ว การขึ้นรูปตะขอล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C กระทำได้ง่าย และเวลาที่ใช้ชุบฮาร์ดโครมก็เป็นระยะเวลาที่ไม่ยาวนานซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพของคนงานด้วย



รูปที่ 4.6 เส้นโครงร่างน้ำหนักที่หายไปของตะขอล่าง (ก) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและ (ข) เมื่อพิจารณาการขัดผิวด้วยใยขัดและขัดมัน (Intanon and Saikaew, 2016)

โดยทั่วไปแล้วกลไกการสึกหรอประกอบด้วยการสึกหรอเป็นแบบยึดติด (adhesion) กลไกการสึกหรอเป็นแบบขัดสี (abrasion) การสึกหรอเป็นแบบแตกหัก (fatigue) ถ้ากลไกการสึกหรอเป็นแบบยึดติด พื้นผิวจะมีลักษณะเรียบหรือมีร่องเป็นแนวยาวตามแนวทางการเสียดสี ถ้ากลไกการสึกหรอเป็นแบบขัดสี พื้นผิวจะไม่เรียบและมีรอยที่เกิดการขัดสีเป็นเส้นกระจายไปทั่วบริเวณ และถ้าการสึกหรอเป็นแบบแตกหัก พื้นผิวจะเกิดการหลุดลอกออกเป็นจุด ขอบของบริเวณที่หลุดลอกจะเรียบเป็นแนวที่ชัดเจน รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงภาพกำลังขยายสูงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณการสึกหรอของตะขอล่างของโรงงานและของตะขอซูบฮาร์ดโครมที่สภาวะที่เหมาะสมตามลำดับ

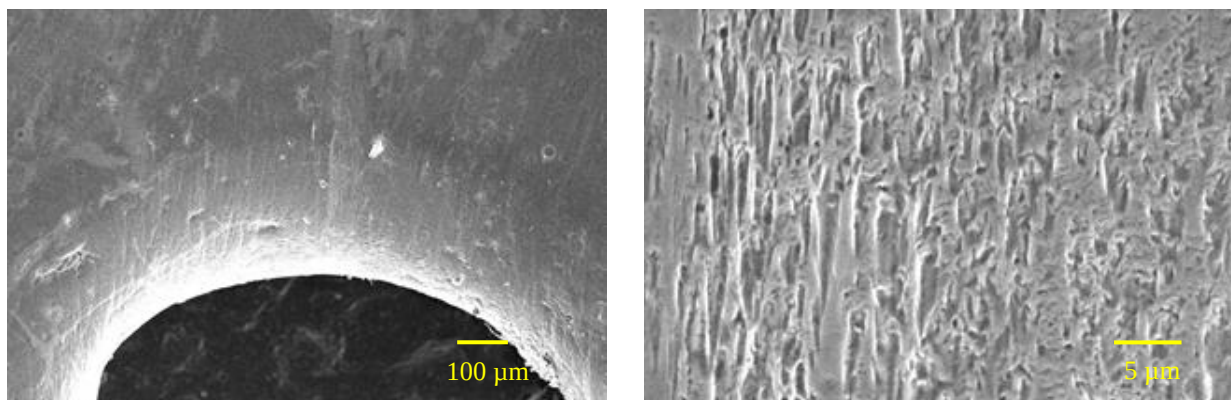
รูปที่ 4.7 แสดงภาพกำลังขยายสูงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดการสึกหรอของตะขอล่างของโรงงาน รูปที่ 4.7(ก) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตะขอเกิดรอยสึกเป็นร่องลึกตามแนวการเคลื่อนของเส้นใยในล่อนที่ใช้ทอวน รูปที่ 4.7(ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำลังขยาย 3000 เท่าที่บริเวณที่เป็นรอยสึกพบว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบและมีรอยขีดตามแนวยาวซึ่งรอยขีดมีทั้งลักษณะที่เรียบและรอยขีดที่เป็นลักษณะคล้ายถูกขีดด้วยของแข็ง รอยขีดที่มีลักษณะเรียบเป็นลักษณะของการสึกหรอแบบยึดติด ส่วนรอยขีดที่มีลักษณะคล้ายถูกขีดด้วยของแข็งนั้นเป็นการสึกหรอแบบขัดสี เมื่อเกิดการสึกหรอเกิดขึ้น อนุภาคโลหะของผิวชิ้นงานถูกเส้นใยดึงให้หลุดออกทีละน้อย บางส่วนอาจติดไปกับเส้นใย และหลุดออกเมื่อพื้นพื้นที่สัมผัส บางส่วนอาจหลุดออกก่อนพื้นพื้นที่สัมผัส และบางส่วนอาจหลุดออกจากเนื้อโลหะและตกอยู่ในบริเวณที่เกิดการเสียดสี เมื่อเส้นใยมากดทับที่บริเวณที่อนุภาคนั้นตกอยู่ อนุภาคนั้นก็อาจติดกับเส้นใยและทำหน้าที่เป็นวัสดุขัดสี ทำให้พื้นที่บริเวณนั้นเกิดรอยที่เกิดจากการยึดติดหรือขัดสีไปพร้อมๆ กัน



รูปที่ 4.7 SEM การสึกหรอของตะขอล่างของโรงงานด้วยกำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 3000 เท่า (Intanon and Saikaew, 2016)

รูปที่ 4.8 แสดงภาพกำลังขยายสูงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดการสึกหรอของตะขอล่างการสึกหรอของตะขอล่างที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่สภาวะที่เหมาะสม รูปที่ 4.8(ก) ไม่แสดงร่องรอยของการสึกหรออย่างชัดเจน รูปที่ 4.8(ข) พบว่า ภาพถ่ายตะขอล่างที่กำลังขยาย 3000 เท่าบริเวณที่เป็นรอยสึกพบว่า ผิวของตะขอมีลักษณะขรุขระ เป็นรอยพูนไม่เรียบ เนื้อโลหะบางส่วนหายไป บางส่วนเคลื่อนที่ไปรวมกัน ผิวของตะขอที่เป็นรอยพูนเกิดจากอนุภาคของโลหะเกิดการยึดติดกับเส้นใยและถูกดึงให้เคลื่อนที่ไปตามแนวการเคลื่อนที่ของเส้นใย ถ้าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสามารถเอาชนะแรงยึดติดระหว่างอนุภาคกับเส้นใยได้ อนุภาคนั้นจึงไม่ถูกดึงออกไป แต่อาจเคลื่อนที่ไปรวมกันที่จุดใดจุดหนึ่ง ส่วนอนุภาคที่แรงดึงดูดไม่สามารถเอาชนะแรงยึดติดได้ก็จะหลุดออกไป ทำให้ผิวบางที่เป็นแอ่งบางที่เป็นเนินที่เกิดจากการรวมกันของอนุภาคและบางที่เป็นบริเวณเรียบเพราะอนุภาคถูกดึงออกไป สภาวะเช่นนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มีการเสียดสีกันระหว่างตะขอล่างกับเส้นใย เมื่อระยะของการเสียดสีเพิ่มมากขึ้น จำนวนอะตอมที่หลุดออกก็จะมีมากขึ้นจนใน

ที่สุดก็เกิดเป็นร่องลึกเหมือนการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับตะขอล่างเดิมของโรงงาน ดังนั้นจะเห็นว่า ตะขอล่างที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่สภาวะที่เหมาะสมมีความแข็งแรงและสามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าตะขอล่างของโรงงาน



รูปที่ 4.8 SEM การสึกหรอของตะขอล่างที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่สภาวะที่เหมาะสมด้วยกำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 3000 เท่า (Intanon and Saikaew, 2016)

4.1.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการปรับปรุงตะขอล่าง

ต้นทุนการผลิตของตะขอล่างที่ผลิตจากโรงงานกรณีศึกษาเท่ากับ 5 บาทต่อชิ้น ปริมาณการใช้งานประมาณ 100,000 ชิ้นต่อเดือน อายุการใช้งานประมาณ 80 วัน ต้นทุนการผลิตก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการแสดงดังตารางที่ 4.4

การเพิ่มกระบวนการขัดมันที่ระดับกำลังการผลิต 100,000 ชิ้นต่อเดือนทำให้ต้องเพิ่มคนงานอีก 5 คน จากจำนวนพนักงานที่มีอยู่เดิม 15 คน รวมเป็น 20 คน ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30% ของค่าแรงงานเดิม ค่าวัสดุสิ้นเปลืองที่เพิ่มขึ้นคือค่าผ้าขัด ซึ่งผ้าขัด 1 ผืนใช้ได้กับตะขอประมาณ 2,500-3,000 ชิ้น นั่นคือใน 1 เดือนจะใช้ประมาณ 35-40 ผืน ซึ่งทำให้ต้นทุนของวัสดุสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ค่าไฟฟ้าและสารเคมีคิดตามอัตราการการทำงานที่ลดลงจากเดิมซบ 60-70 นาที ลดเป็น 40 นาที ซึ่งคิดเป็นเวลาเวลาที่ลดลง 20-30 นาที หรือ 33.00-42.86% ของเวลาเดิม โดยคิดเป็นเวลาการทำงานลดลงเฉลี่ย 38%

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนการผลิตตะขอล่าง

ชนิดของต้นทุน	ร้อยละของต้นทุน	ต้นทุน (บาท)	เพิ่ม (ลด) %	ต้นทุนใหม่ (บาท)
วัตถุดิบ	10	0.50	0	0.50
แรงงาน	30	1.50	30	1.95
วัสดุสิ้นเปลือง	25	1.25	10	1.38
ไฟฟ้าและสารเคมี	25	1.25	(38)	0.78
อื่นๆ	10	0.50	0	0.50
รวม	100	5.00		5.11

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ต้นทุนของตะขอล่างเพิ่มขึ้นจากเดิมขึ้นละ 5 บาท เป็นขึ้นละ 5.11 บาท หรือคิดเป็น 2.2%

จากการทดลองยืนยันผลพบว่า ที่ระยะเวลาการใช้งาน 10 วัน อัตราการสึกหรอโดยเฉลี่ยของตะขอเดิมของบริษัทกรณีศึกษาคือ 0.000847 กรัม ซึ่งเทียบได้ $0.000847/10 = 0.0000847$ กรัมต่อวัน ปกติอายุการใช้

งานของตะขอล่างเฉลี่ย 180 วัน นั่นคือน้ำหนักที่หายไปทั้งสิ้นเท่ากับ $0.0000847 \times 180 = 0.015246$ กรัม ปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษามีเครื่องทอประมาณ 1,000 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องใช้ตะขอล่างเฉลี่ย 600 ชิ้น ดังนั้นต้องใช้ตะขอทั้งหมด 600,000 ชิ้น ตะขอมีอายุการใช้งาน 180 วัน หรือ 2 ชุดต่อเครื่องต่อปี นั่นคือบริษัทกรณีศึกษาต้องใช้ตะขอทั้งสิ้น $600,000 \times 2 = 1,200,000$ ชิ้นต่อปี ซึ่งคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 6,000,000 บาท

อัตราการสึกหรอของตะขอใหม่ตามสภาวะที่เหมาะสมเท่ากับ 0.000046 กรัมต่อวัน อายุการใช้งานตะขอล่างตามสภาวะใหม่เท่ากับ 331 วัน นั่นคืออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 83.89% ใน 1 ปีจะใช้เพียง 1.0876 ชุดต่อเครื่องต่อปี นั่นคือบริษัทกรณีศึกษาใช้ตะขอทั้งสิ้น 652,658 ชิ้นต่อปี ราคาตะขอใหม่คือ 5.11 บาทต่อชิ้น ซึ่งคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 3,335,082 บาท นั่นคือบริษัทกรณีศึกษาสามารถประหยัดได้ 2,664,918 บาทต่อปี หรือประมาณ 7,300 บาทต่อวัน

ถ้าบริษัทกรณีศึกษาลงทุนเพิ่มเฉพาะในส่วนที่เป็นเครื่องขัดมันจำนวน 5 เครื่อง โดยราคาเครื่องละประมาณ 5,000 บาทรวมค่าติดตั้ง นั่นคือบริษัทกรณีศึกษาต้องลงทุนเพิ่มเท่ากับ $5,000 \times 5 = 25,000$ บาท การคำนวณระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{ต้นทุนคงที่/ผลตอบแทนที่สามารถประหยัดได้} \\ &= 25,000/7,300 = 3.42 \text{ วัน} \end{aligned}$$

ดังนั้น ถ้าบริษัทกรณีศึกษาเปลี่ยนกระบวนการผลิตตะขอล่างโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม จะมีระยะเวลาในการคืนทุนเพียง 3.42 วัน

4.2 การปรับปรุงคุณภาพของตะขอบน

4.2.1 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiN

ตะขอทอวนแบบที่สองที่ใช้ในการถักทอวนร่วมกับตะขอล่างคือตะขอบนซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9(ก) ตะขอบนก่อนการเคลือบแข็งเป็นตะขอที่ผ่านการผลิตแบบการหล่อเหล็กกล้าไร้สนิม (cast stainless steel) แบบซีฟิงหาย (lost wax casting process) แล้วผ่านกระบวนการตกแต่งด้วยกระบวนการกลึงและการกัดเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมในการทอวนต่อไป โดยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. และความยาว 90 มม. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมคือ Fe 61.28%, Ni 6.23%, Cr 20.75%, and Cu 3.06% การเตรียมตะขอบนเพื่อใช้ทดสอบความแข็ง ความหยาบผิว และความคงทนต่อการสึกหรอสามารถทำได้ด้วยการขัดผิวที่ใช้เม็ดขัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5 ถึง 8 มม. ในเครื่องขัดผิว การปรับปรุงความสามารถในความคงทนต่อการสึกหรอของตะขอบนสามารถทำได้ด้วยการเคลือบแข็งด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) การเคลือบแข็งใช้วิธีดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบฐานรองชันงานลาดเอียง (oblique angle DC magnetron sputtering technique) ด้วยระบบปฏิบัติการที่มีอุปกรณ์ระบบสุญญากาศ ปืนแมกนีตรอน ตัวกำเนิดความถี่คลื่น 600 วัตต์ กำลังทางไฟฟ้าขนาด 400 วัตต์ และระบบปั๊มสุญญากาศแบบ turbomolecular ชี้นงานตะขอบนถูกวางบนฐานรองชันงานลาดเอียงที่มีระยะห่างจากแผ่นไทเทเนียม 5 ซม. ชี้นงานตะขอบนถูกเคลือบแข็งภายใต้ส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน รูปที่ 4.9(ข) แสดงตะขอบนที่ผ่านการเคลือบแข็งด้วย TiN



รูปที่ 4.9 ตะขอบน (ก) ก่อนการเคลือบแข็ง (ข) หลังการเคลือบแข็งด้วย TIN

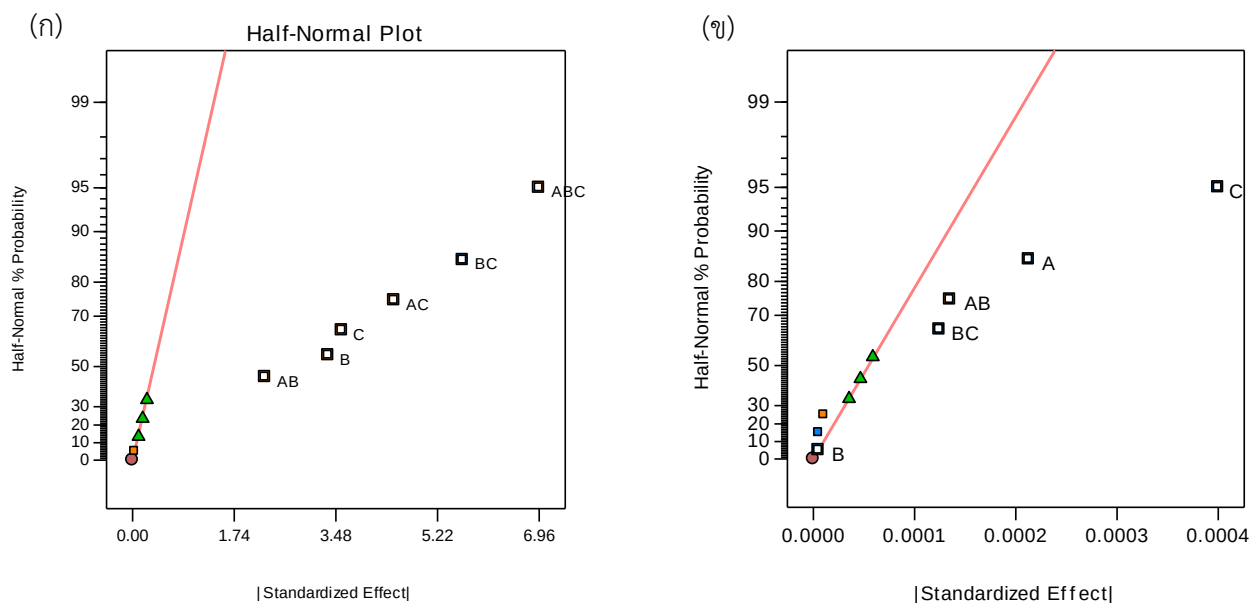
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดค่าความแข็งและการทดสอบความคงทนต่อการสึกหรอของตะขอบนตามแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 บวกจุดกึ่งกลาง 4 ซ้ำโดยที่มีการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยทั้งสามต่างๆ กัน ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยวิธีการสร้างกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขอบนตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 บวกจุดกึ่งกลาง 4 ซ้ำ

No.	DC current (Amp), A	Pressure (Pa), B	Ar/N ₂ , C	Hardness (GPa)	Before (g)	After (g)	Weight loss (g)
1	0.35	50	0.5	12.1600	10.31948	10.31853	0.00095
2	0.45	50	0.5	12.4078	11.62518	11.62458	0.00060
3	0.35	100	0.5	25.8514	11.70198	11.70105	0.00093
4	0.45	100	0.5	16.7180	11.17288	11.17203	0.00085
5	0.35	50	1.5	23.8738	9.79745	9.79678	0.00067
6	0.45	50	1.5	19.1636	11.29408	11.29373	0.00035
7	0.35	100	1.5	12.3472	11.71205	11.71163	0.00042
8	0.45	100	1.5	26.0868	11.04143	11.04108	0.00035
9	0.40	75	1.0	27.2440	11.06818	11.06695	0.00122
10	0.40	75	1.0	27.7866	11.00235	11.00108	0.00128
11	0.40	75	1.0	28.5384	10.45705	10.45595	0.00110
12	0.40	75	1.0	26.7526	10.45710	11.56270	0.00105

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสำหรับข้อมูลความแข็งและน้ำหนักที่หายไป จากรูปจะเห็นว่า ปัจจัยร่วมระหว่าง AB (ไฟฟ้ากระแสตรงและความดัน) และ AC (ไฟฟ้ากระแสตรงและ Ar/N₂) มีอิทธิพลต่อทั้งค่าความแข็งและน้ำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ย ในขณะที่มีเพียงปัจจัย C (Ar/N₂) ที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและน้ำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ย



รูปที่ 4.10 กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสำหรับข้อมูล (ก) ความแข็งแรงและ (ข) น้ำหนักที่หายไป

ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 สำหรับค่าความแข็งแรงและน้ำหนักที่หายไป ตามลำดับ จากตารางทั้งสองจะเห็นว่า อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ รวมทั้งอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงและน้ำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าความแข็งแรงตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 บวกจุดกึ่งกลาง 4 จุด

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	259.21	6	43.20	98.12	0.0003
B-Pressure	22.44	1	22.44	50.96	0.0020
C- Ar/N ₂	25.68	1	25.68	58.33	0.0016
AB	10.28	1	10.28	23.35	0.0085
AC	40.12	1	40.12	91.11	0.0007
BC	63.87	1	63.87	145.06	0.0003
ABC	96.82	1	96.82	219.89	0.0001
Curvature	216.21	1	216.21	491.02	< 0.0001
Error	1.76	4	0.44		
Lack of fit	0.0026	1	0.0026	0.0044	0.9512
Pure error	01.76	3	0.59		
Total	477.18	11			

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าการสึกหรอของตะขอบนตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 บวกจุดกึ่งกลาง 4 ข้ำ

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	4.432×10^{-7}	4	1.108×10^{-7}	19.560	0.0014
A-DC current	8.405×10^{-8}	1	8.405×10^{-8}	14.840	0.0084
C- Ar/N ₂	2.965×10^{-7}	1	2.965×10^{-7}	52.350	0.0004
AB	3.380×10^{-8}	1	3.380×10^{-8}	5.970	0.0523
BC	2.880×10^{-8}	1	2.880×10^{-8}	5.090	0.0650
Curvature	7.280×10^{-7}	1	7.280×10^{-7}	128.570	< 0.0001
Error	3.398×10^{-8}	6	5.663×10^{-9}		
Lack of fit	3.000×10^{-10}	3	1.000×10^{-10}	0.009	0.9986
Pure error	3.368×10^{-8}	3	1.123×10^{-8}		
Total	1.205×10^{-6}	11			

นอกจากนี้ จากตารางทั้งสอง ยังมีการรายงานผลกระทบของรูปแบบสมการควรรอยู่ในรูปแบบกำลังสองด้วย (quadratic model) โดยดูจาก “Curvature” ที่มีค่า p -value ต่ำกว่า 0.05 ค่าผลรวมกำลังสองเนื่องจากผลกระทบของรูปแบบสมการในรูปแบบกำลังสอง (สำหรับข้อมูลค่าความแข็ง) สามารถคำนวณได้ดังนี้

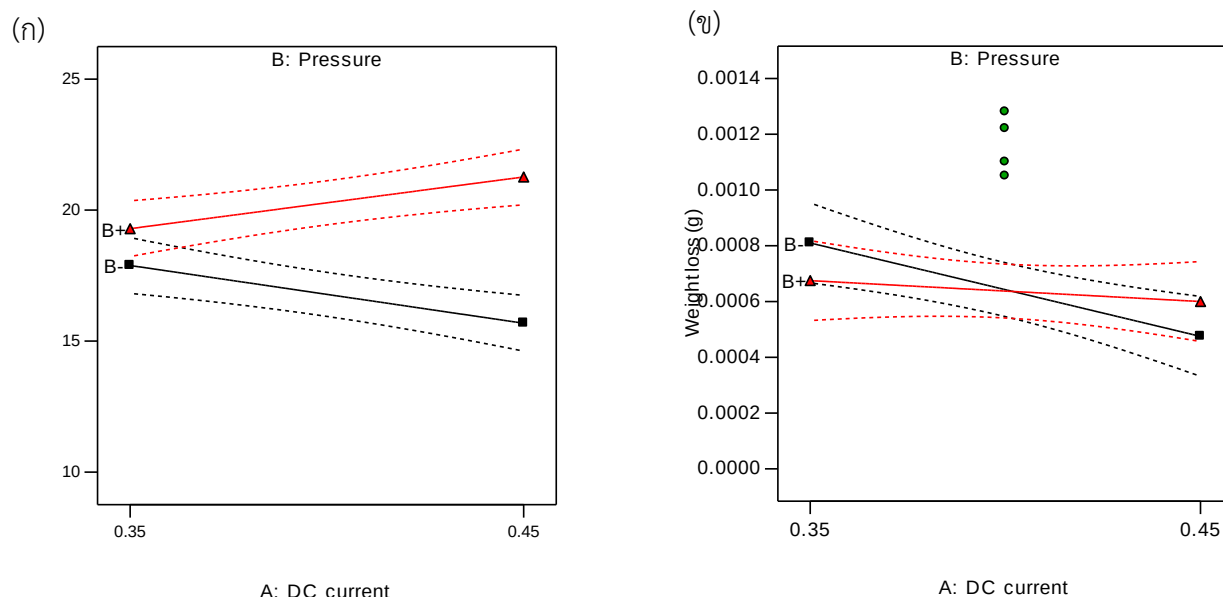
$$\begin{aligned}
 SS_{\text{Curvature}} &= \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \\
 &= \frac{(8)(4)(9.29 - 13.79)^2}{8 + 4} = 54.05
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยที่ $\bar{y}_F$ คือค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำให้การทดลองที่จุด 2^3 แฟคตอเรียล ในขณะที่ $\bar{y}_C$ ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำให้การทดลองที่จุดกึ่งกลางของปัจจัยทั้งสาม n_F เป็นจำนวนการทดลองที่ทำให้การทดลองที่จุด 2^3 แฟคตอเรียล ในขณะที่ n_C เป็นจำนวนการทดลองที่ทำให้การทดลองที่จุดกึ่งกลางของปัจจัยทั้งสาม สำหรับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปที่แสดงในตารางที่ 4.7 สามารถอธิบายผลกระทบของรูปแบบสมการควรรอยู่ในรูปแบบกำลังสอง โดยดูจาก “Curvature” เช่นเดียวกัน

นอกจากการดูผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว รูปที่ 4.11 ยังแสดงกราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไป โดยแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งสองในระดับกลางของแต่ละปัจจัย จากกราฟจะเห็นว่า ค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปทั้งสี่ค่าไม่อยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างระดับต่ำและระดับสูงของแต่ละปัจจัยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังนั้น รูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปควรรอยู่ในรูปแบบกำลังสอง เนื่องจากรูปแบบกำลังสองของปัจจัยทั้งสามและค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปแสดงได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{123} ABC \quad (4.4)$$

จากสมการ (4.4) จะเห็นว่าจำนวนพารามิเตอร์ที่จะต้องประมาณ 11 ค่า แต่จำนวนที่ทำให้การทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 บวกจุดกึ่งกลาง 4 ข้ำมีเพียงแค่ 9 จุดเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอในการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 11 ค่า ดังนั้น การทดลองที่จุดสตาร์ควรทำการทดลองเพิ่มเพื่อให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 11 ค่าได้แม่นยำยิ่งขึ้น

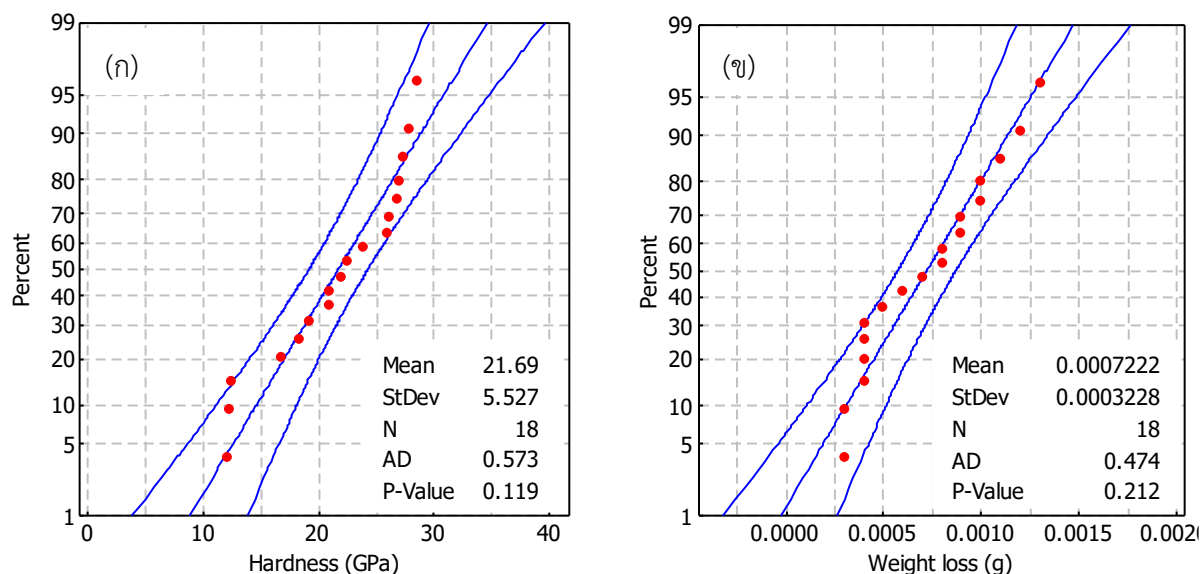


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อก (ก) ค่าความแข็ง (ข) ค่าน้ำหนักที่หายไปโดยแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งสองในระดับกลางของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขอบนตามการออกแบบการทดลองเพิ่มในจุดที่เป็นสตาร์ ผลการทดลองในตารางที่ 4.5 และ 4.8 รวมกันเรียกว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปพล็อตความน่าจะเป็น (probability plot) ของข้อมูลของค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปตามรูปที่ 4.12 ตามรูปจะเห็นว่าค่า p -value มีค่าสูงกว่า 0.05 อย่างมากตามการวิเคราะห์ข้อมูลว่ามีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติหรือไม่ด้วยวิธีของ Anderson and Darling (AD) ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ ซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

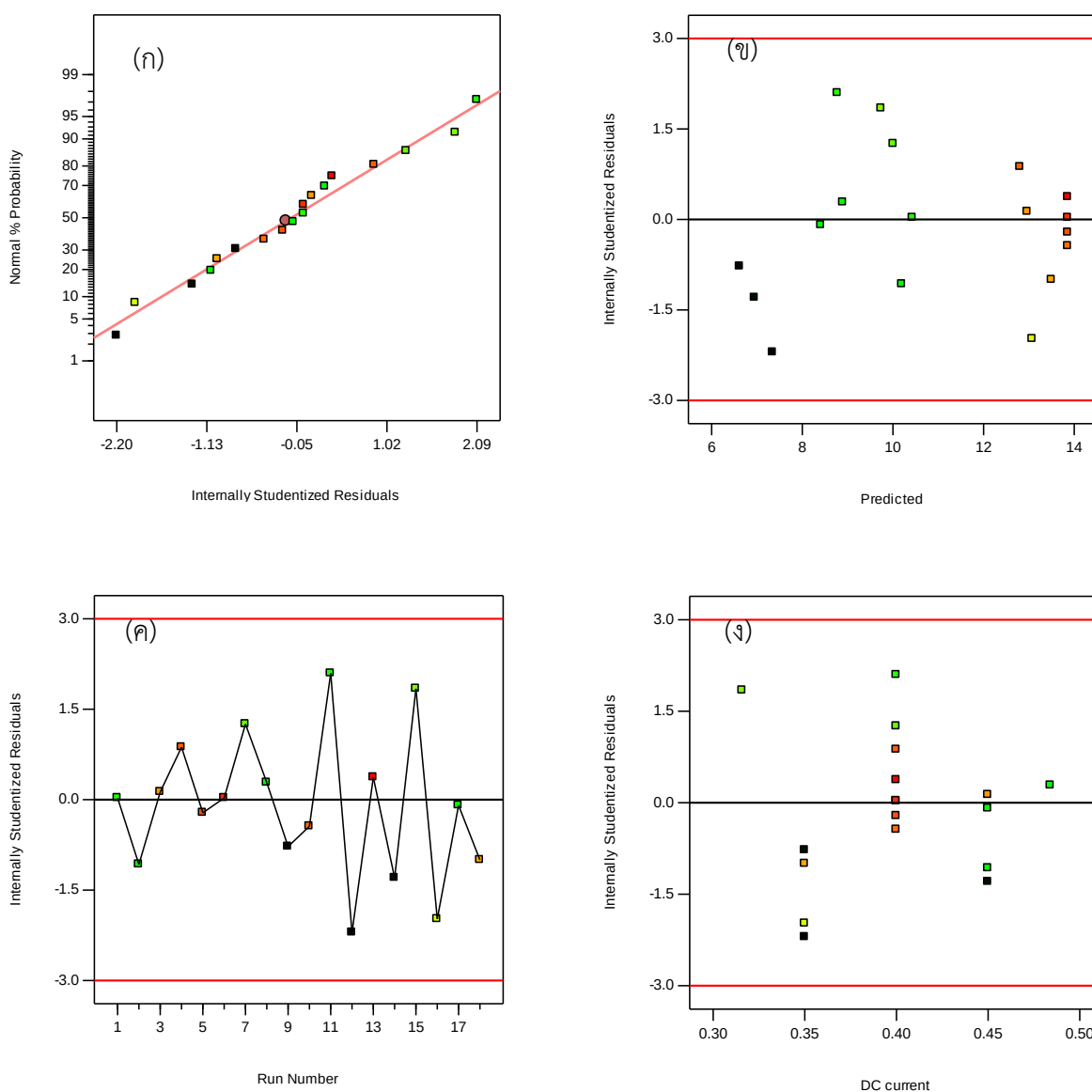
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขอบนตามการออกแบบการทดลองเพิ่มในจุดที่เป็นสตาร์

No.	DC current (Amp), A	Pressure (Pa), B	Ar/N ₂ , C	Hardness (GPa)	Before (g)	After (g)	Weight loss (g)
13	0.32	75	1.0	22.4208	10.55295	10.55260	0.00035
14	0.48	75	1.0	18.2480	11.65318	11.65288	0.00030
15	0.40	33	1.0	20.8960	11.71140	11.71115	0.00025
16	0.40	117	1.0	20.9108	11.23283	11.23190	0.00093
17	0.40	75	0.16	22.0146	11.14120	11.14070	0.00050
18	0.40	75	1.84	27.0020	11.06730	11.06650	0.00080

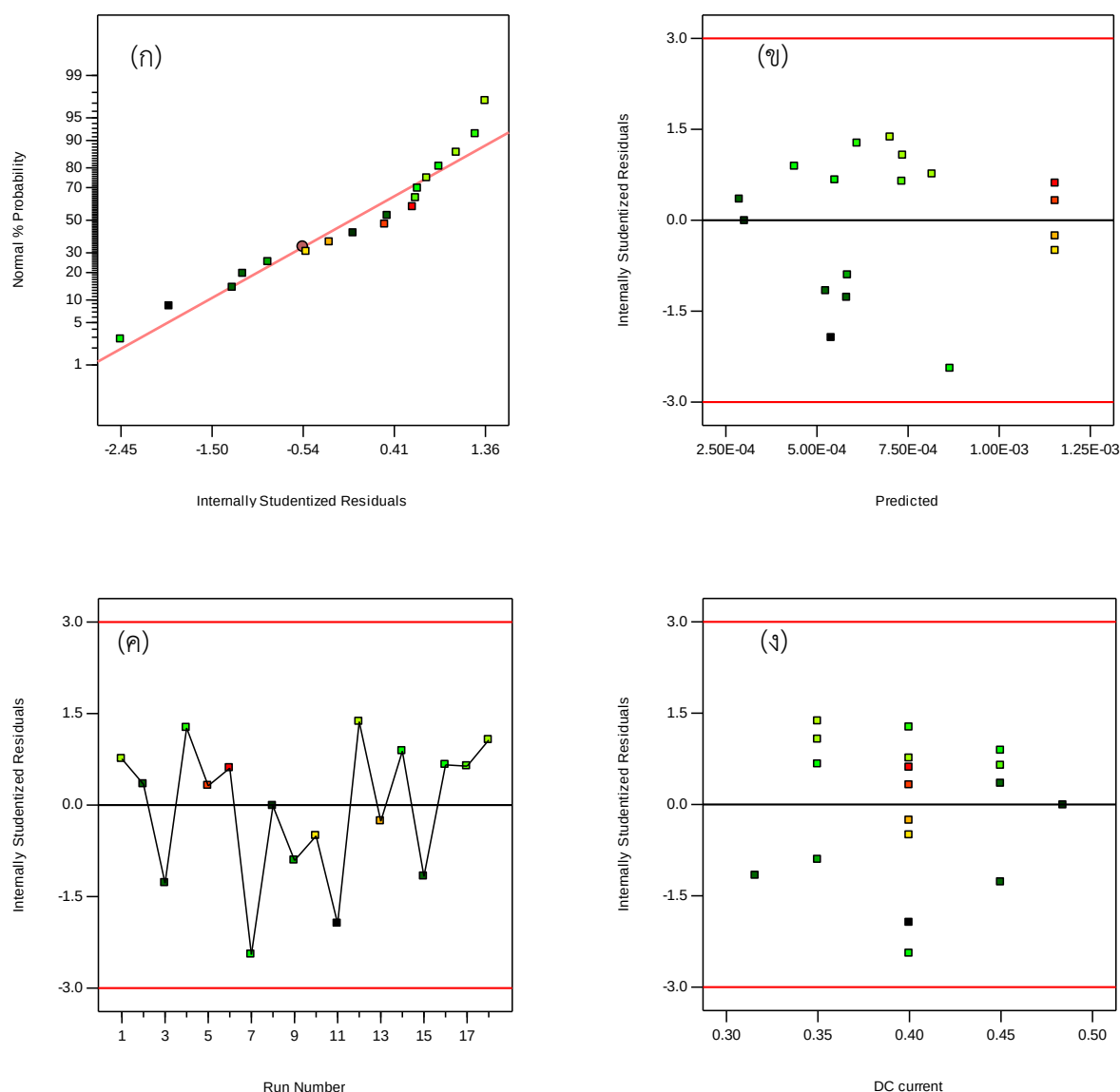


รูปที่ 4.12 พล็อตความน่าจะเป็น (probability plot) ของข้อมูล (ก) ค่าความแข็ง (ข) ค่าน้ำหนักที่หายไป

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พอเหมาะกับข้อมูลค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปควรกระทำก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลการวิเคราะห์ความเพียงพอของข้อมูลค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13(ก) และรูปที่ 4.14(ก) จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ จากรูปที่ 4.13(ข) และรูปที่ 4.14(ข) จะเห็นว่ากราฟไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าสังเกตในแต่ละระดับ จากรูปที่ 4.13(ค) และรูปที่ 4.14(ค) จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณใดบ่งบอกให้เห็นถึงความผิดปกติของข้อมูลในเรื่องความเป็นอิสระต่อกัน จากรูปที่ 4.13(ง) และรูปที่ 4.14(ง) จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนสุ่มมีการกระจายตัวอยู่ภายใน $\pm 3\sigma$ ในแต่ละระดับของปัจจัยไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น จากการวิเคราะห์ความเพียงพอของตัวแบบสรุปได้ว่า ค่าสังเกตที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป โดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องแปลงข้อมูล ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พอเหมาะ กับข้อมูลค่าความแข็งของตะขอบน (ก) กราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่พอเหมาะ กับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอบน (ก) กราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของค่าสังเกต (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและปัจจัยไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับข้อมูลจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบสมการถดถอยที่มีพจน์กำลังสองมีความเหมาะสมสำหรับข้อมูล ค่าความแข็ง จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าพจน์ A^2 , B^2 และ C^2 มีความเหมาะสมที่จะอยู่ในรูปแบบสมการถดถอย โดยที่มีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าไฟฟ้ากระแสตรง ความดันและ Ar/N_2 มีอิทธิพลต่อทั้งค่าความแข็งโดยเฉลี่ยในแนวเส้นโค้ง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$H = 27.73 - 0.5A + 0.98B + 1.66C + 1.13AB + 2.24AC - 2.83BC - 3.21A^2 - 3.01B^2 - 1.73C^2 + 3.48ABC \quad (4.5)$$

โดยที่ H คือค่าความแข็งแรงสามารถทำนายได้ สมการนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination) R^2 เท่ากับ 0.913 และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้ว (adjusted coefficient of determination) $Adj. R^2$ เท่ากับ 0.7886 ซึ่งมีค่าสูง แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 4.9 สามารถอธิบายความผันแปรของค่าความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$L = 0.001155 - 0.0000662A + 0.00008228B - 0.00007582C - 0.0002621A^2 - 0.0001684B^2 - 0.0001472C^2 \quad (4.6)$$

โดยที่ L คือค่าน้ำหนักที่หายไปที่สามารถทำนายได้ สมการนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.6901 และค่า $Adj. R^2$ เท่ากับ 0.5211 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 4.10 สามารถอธิบายความผันแปรของค่าน้ำหนักที่หายไปได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าความแข็งแรงตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	474.08	10	47.41	7.34	0.0074
A-DC current	3.46	1	3.46	0.54	0.4880
B-Pressure	13.19	1	13.19	2.04	0.1960
C- Ar/N ₂	37.80	1	37.80	5.85	0.0461
AB	10.28	1	10.28	1.59	0.2475
AC	40.12	1	40.12	6.21	0.0414
BC	63.87	1	63.87	9.89	0.0163
A ²	130.38	1	130.38	20.19	0.0028
B ²	114.55	1	114.55	17.74	0.0040
C ²	38.07	1	38.07	5.90	0.0456
ABC	96.82	1	96.82	14.99	0.0061
Error	45.20	7	6.46		
Lack of fit	43.44	4	10.86	18.53	0.0187
Pure error	1.76	3	0.59		
Total	519.28	17			

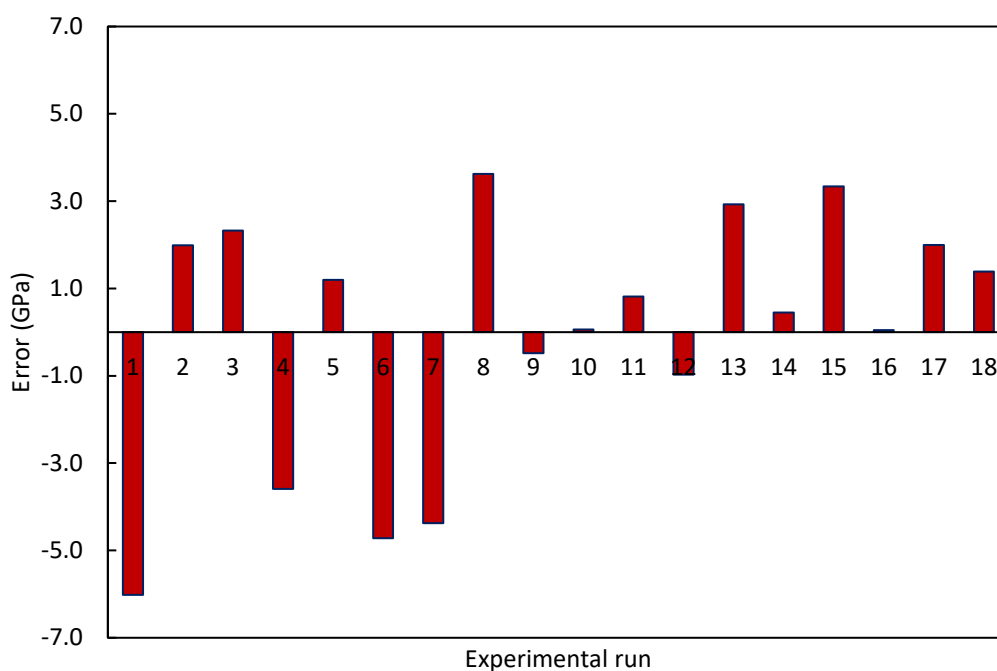
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอบนตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	1.342×10^{-6}	6	2.236×10^{-7}	4.08	0.0212
A-DC current	5.985×10^{-8}	1	5.985×10^{-8}	1.09	0.3183
B-Pressure	9.245×10^{-8}	1	9.245×10^{-8}	1.69	0.2205
C- Ar/N ₂	7.851×10^{-8}	1	7.851×10^{-8}	1.43	0.2564
A ²	8.687×10^{-7}	1	8.687×10^{-7}	15.86	0.0022
B ²	3.586×10^{-7}	1	3.586×10^{-7}	6.55	0.0266
C ²	2.739×10^{-7}	1	2.739×10^{-7}	5.00	0.0470
Error	6.026×10^{-7}	11	5.478×10^{-8}		
Lack of fit	5.689×10^{-7}	8	7.111×10^{-8}	6.34	0.0783
Pure error	3.368×10^{-8}	3	1.123×10^{-8}		
Total	1.944×10^{-6}	17			

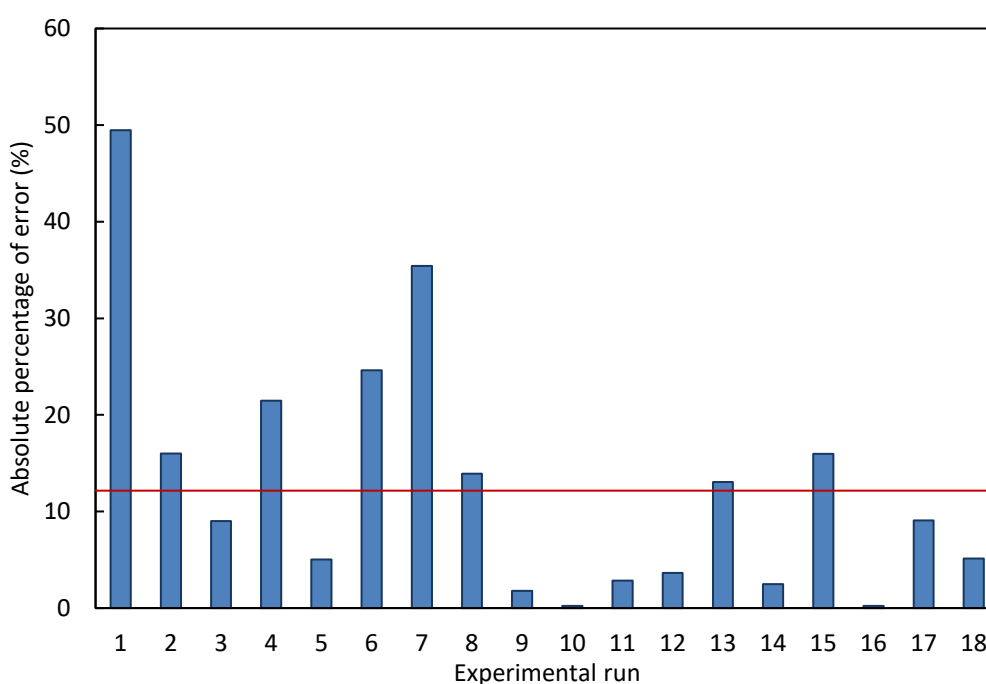
ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการรวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสองค่า

No.	DC current (Amp), A	Pressure (Pa), B	Ar/N ₂ , C	Hardness (GPa)	Predicted hardness (GPa)	Error (GPa)	Absolute % of error (%)
1	0.35	50	0.5	12.16	18.17482	-6.01	49.46
2	0.45	50	0.5	12.4078	10.42225	1.99	16.00
3	0.35	100	0.5	25.8514	23.52468	2.33	9.00
4	0.45	100	0.5	16.718	20.30641	-3.59	21.46
5	0.35	50	1.5	23.8738	22.67487	1.20	5.02
6	0.45	50	1.5	19.1636	23.8798	-4.72	24.61
7	0.35	100	1.5	12.3472	16.72224	-4.38	35.43
8	0.45	100	1.5	26.0868	22.46147	3.63	13.90
9	0.40	75	1.0	27.244	27.72535	-0.48	1.77
10	0.40	75	1.0	27.7866	27.72535	0.06	0.22
11	0.40	75	1.0	28.5384	27.72535	0.81	2.85
12	0.40	75	1.0	26.7526	27.72535	-0.97	3.64
13	0.32	75	1.0	22.4208	19.49129	2.93	13.07
14	0.48	75	1.0	18.248	17.79827	0.45	2.46
15	0.40	33	1.0	20.896	17.56077	3.34	15.96
16	0.40	117	1.0	20.9108	20.86678	0.04	0.21
17	0.40	75	0.16	22.0146	20.02055	1.99	9.06
18	0.40	75	1.84	27.002	25.61681	1.39	5.13
					Mean	0.00	12.74

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการที่ (4.5) รวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสองค่า จากตารางที่ 4.11 สามารถนำไปสร้างกราฟค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายดังแสดงในรูปที่ 4.15 และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายแสดงในรูปที่ 4.16 จากตารางและรูป จะเห็นว่าค่า MAPE มีค่า 12.74% ซึ่งแสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่แสดงในสมการที่ (4.5) มีความแม่นยำอย่างดี (Makridakis et al., 1983) ในการประมาณค่าความแข็งของ TiN



รูปที่ 4.15 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการ

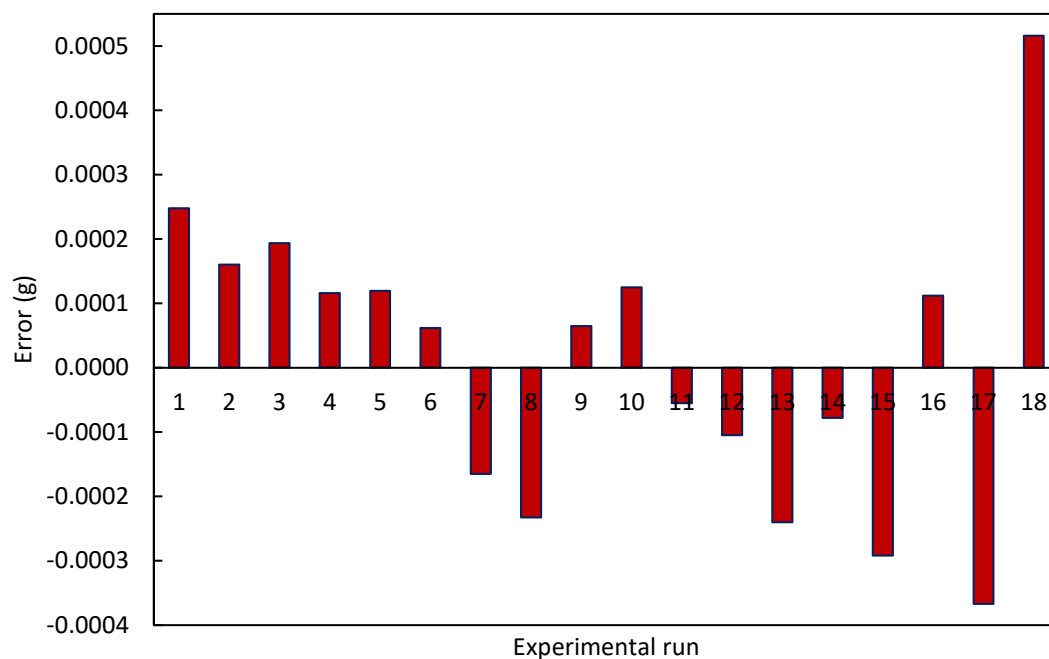


รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการ

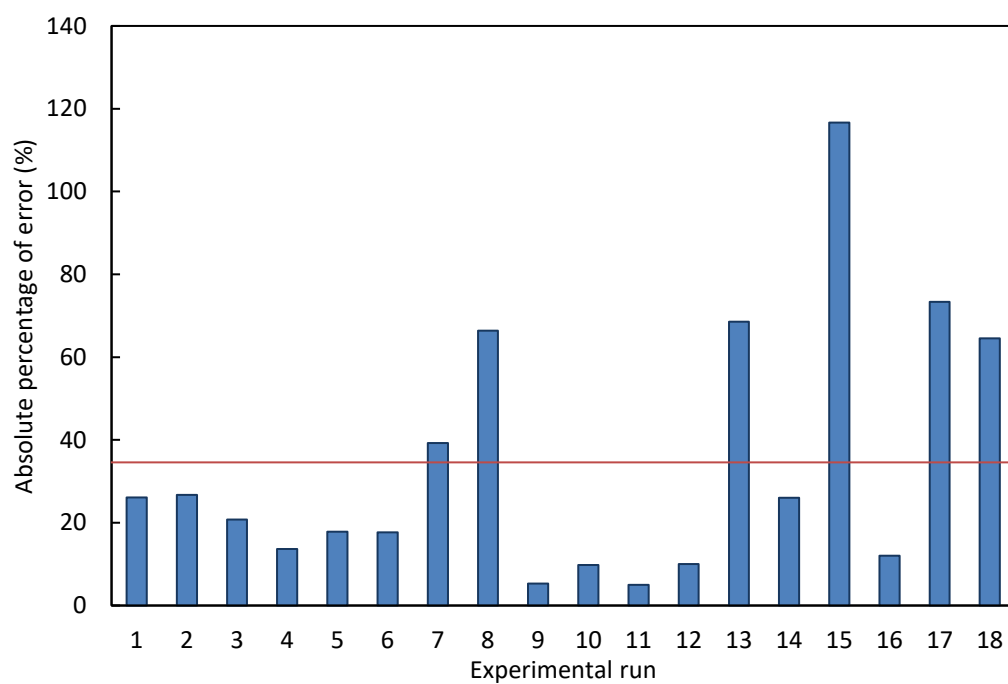
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าน้ำหนักที่หายไปได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการที่ (4.6) รวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสองค่า จากตารางที่ 4.12 สามารถนำไปสร้างกราฟค่าความคลาดเคลื่อนของค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายดังแสดงในรูปที่ 4.17 และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ของค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายแสดงในรูปที่ 4.18 จากตารางและรูป จะเห็นว่าค่า MAPE มีค่า 34.43% ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 50% แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยต่างๆ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่แสดงในสมการที่ (4.6) มีความแม่นยำในระดับที่สามารถยอมรับได้ (Makridakis et al., 1983) ในการประมาณค่าน้ำหนักที่หายไปในการทดสอบความลึกหรือของ TiN

ตารางที่ 4.12 คำนวณหักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการรวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสองค่า

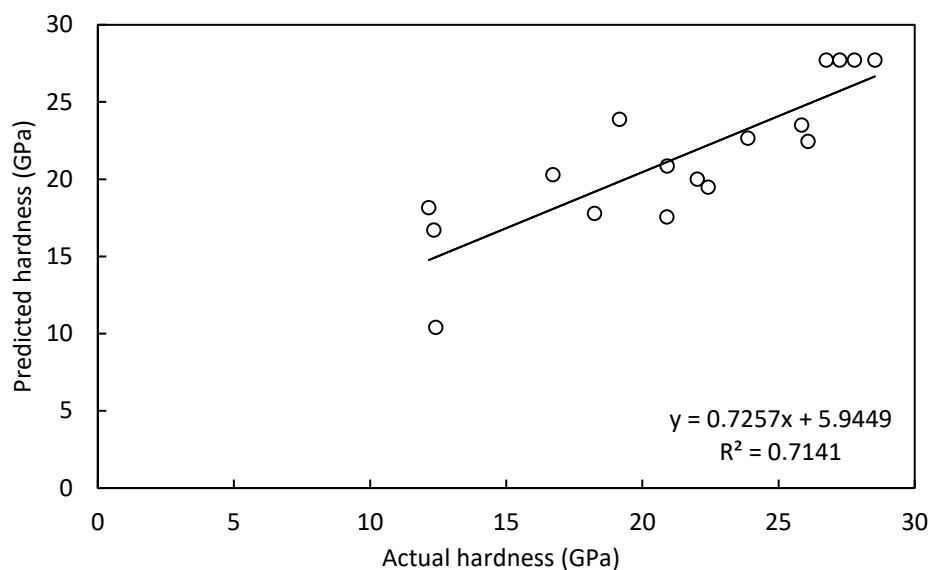
No	DC current (Amp), <i>A</i>	Pressure (Pa), <i>B</i>	Ar/N ₂ , <i>C</i>	Weight loss (g)	Predicted weight loss (g)	Error (g)	Absolute % of error (%)
1	0.35	50	0.5	0.00095	0.000702	0.000248	26.09
2	0.45	50	0.5	0.00060	0.000440	0.000160	26.71
3	0.35	100	0.5	0.00093	0.000737	0.000193	20.80
4	0.45	100	0.5	0.00085	0.000734	0.000116	13.63
5	0.35	50	1.5	0.00067	0.000550	0.000120	17.84
6	0.45	50	1.5	0.00035	0.000288	0.000062	17.69
7	0.35	100	1.5	0.00042	0.000585	-0.000165	39.26
8	0.45	100	1.5	0.00035	0.000582	-0.000232	66.42
9	0.40	75	1.0	0.00122	0.001155	0.000065	5.33
10	0.40	75	1.0	0.00128	0.001155	0.000125	9.77
11	0.40	75	1.0	0.00110	0.001155	-0.000055	5.00
12	0.40	75	1.0	0.00105	0.001155	-0.000105	10.00
13	0.32	75	1.0	0.00035	0.000590	-0.000240	68.56
14	0.48	75	1.0	0.00030	0.000378	-0.000078	26.03
15	0.40	33	1.0	0.00025	0.000542	-0.000292	116.64
16	0.40	117	1.0	0.00093	0.000818	0.000112	12.06
17	0.40	75	0.16	0.00050	0.000867	-0.000367	73.38
18	0.45	75	1.84	0.00080	0.000284	0.000516	64.52
Mean						0.000183	34.43



รูปที่ 4.17 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการ

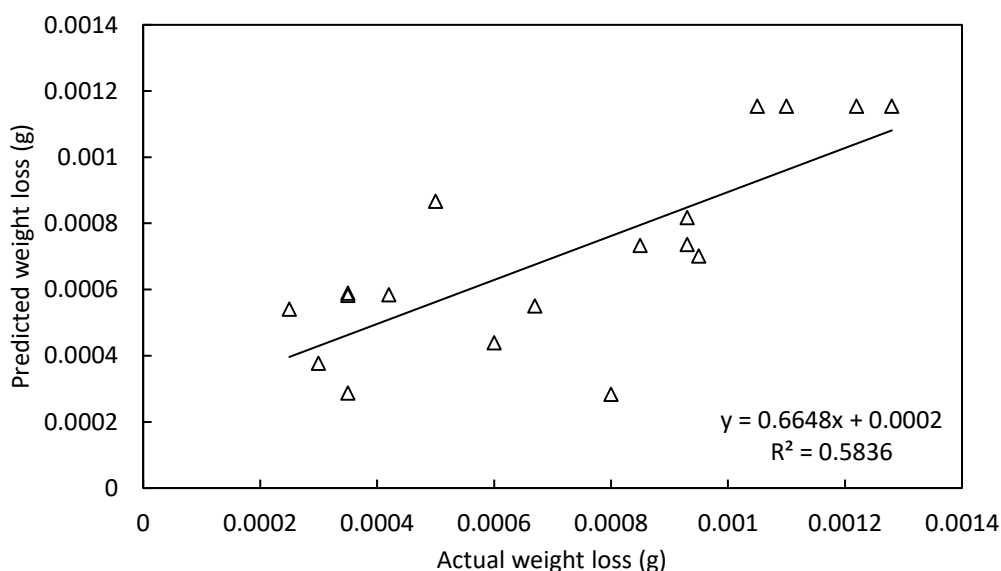


รูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการ

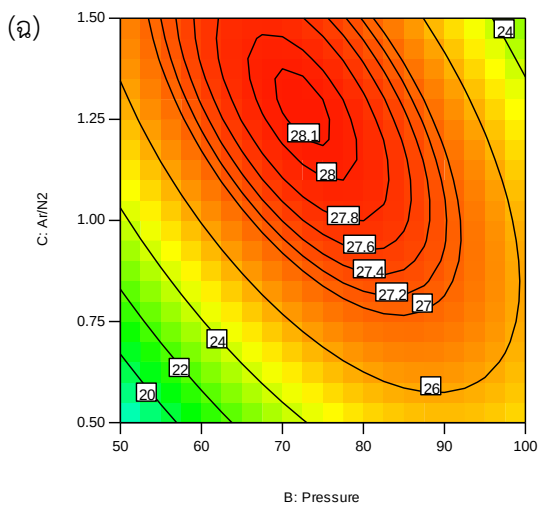
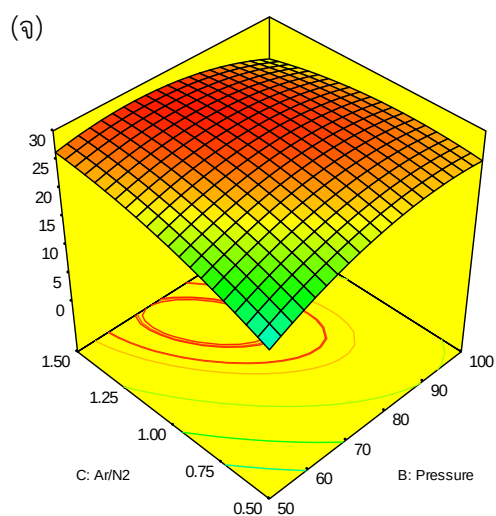
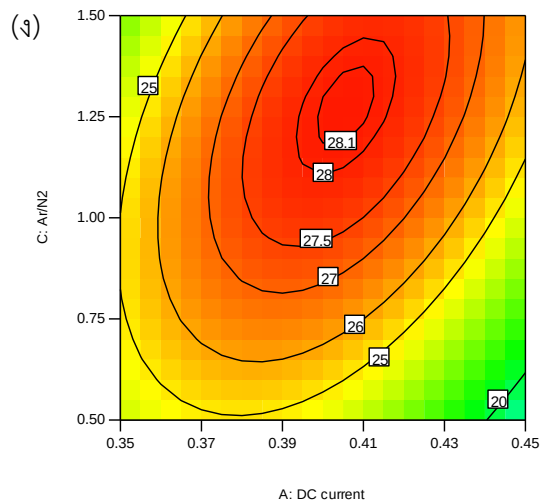
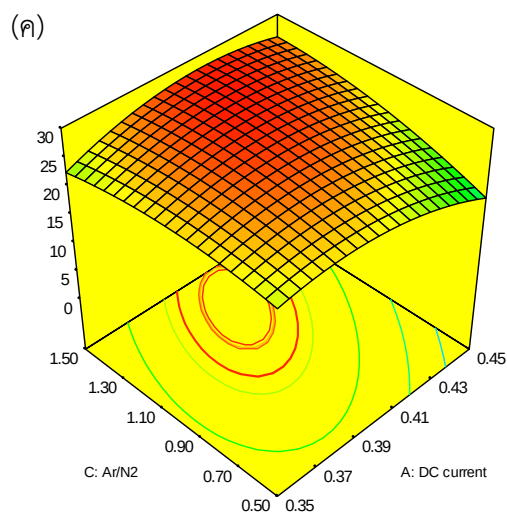
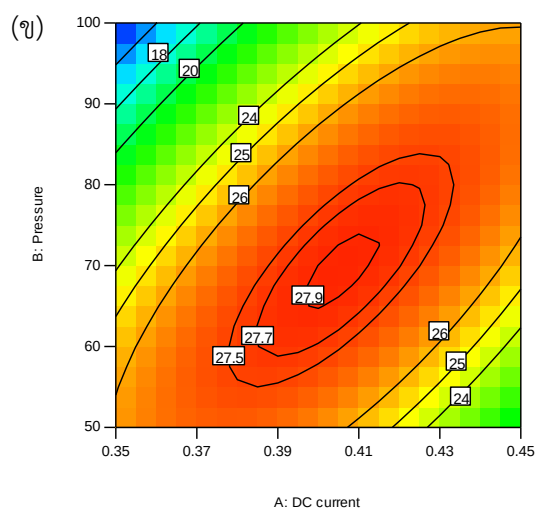
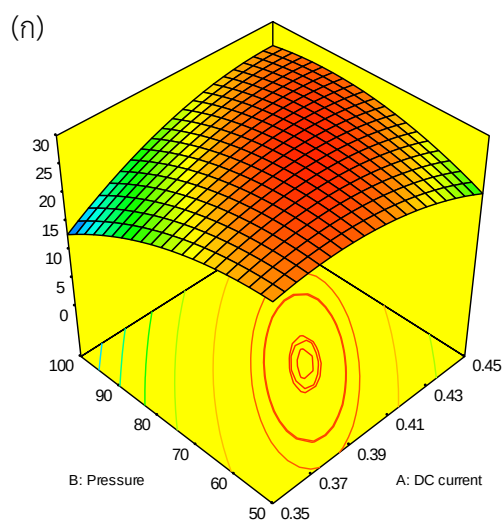


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการประมาณ

ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการที่ (4.5) ที่สภาวะต่างๆ ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.19 จากกราฟ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองและการประมาณมีความสัมพันธ์ที่ดีมากโดยมีค่า $R^2 = 0.7141$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ (4.5) มีความเหมาะสมกับข้อมูลค่าความแข็งของ TiN ได้ระดับดีและสามารถทำนายค่าความแข็งได้อย่างแม่นยำระดับหนึ่ง ในขณะที่ คำนวณน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากสมการที่ (4.6) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.20 จากกราฟ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการประมาณมีความสัมพันธ์ที่สามารถยอมรับได้โดยมีค่า $R^2 = 0.5836$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ (4.6) มีความเหมาะสมกับข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปในการทดสอบการสึกหรอของ TiN ได้ในระดับที่สามารถยอมรับได้และสามารถทำนายค่าน้ำหนักที่หายไปได้ในระดับหนึ่ง

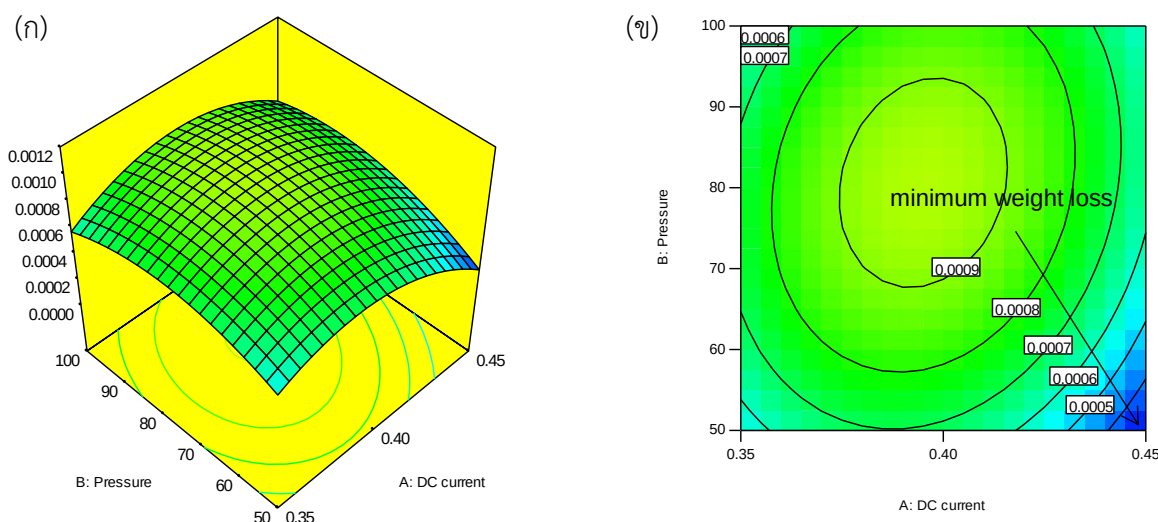


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปที่ได้จากการทดลองและการประมาณ



รูปที่ 4.21 (ก) (ค) (จ) พื้นผิวผลตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าความแข็งของ TiN เคลือบบนตะขอบนและ (ข) (ง) (ฉ) เส้นโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าความแข็ง

สมการที่ (4.5) สามารถนำไปสร้างพื้นผิวผลตอบแทนและเส้นโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าความแข็ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.21 จากรูป จะเห็นว่าค่าความแข็งมีค่าสูงในพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.40 A ในขณะที่มีความดันประมาณ 70 Pa และ Ar/N₂ ประมาณ 1.25 ในขณะที่สมการที่ (4.6) นำไปสร้างพื้นผิวผลตอบแทนและเส้นโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ และค่าน้ำหนักที่หายไป ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.22 จากรูป จะเห็นว่าค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่าต่ำในพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.35 A และ 0.45 A ในขณะที่มีความดันประมาณ 50 Pa และ 100 Pa เนื่องจากจุดประสงค์ของการศึกษานี้ต้องการให้ค่าความแข็งของ TiN ที่เคลือบบนตะขอบนมีค่าสูงและให้ค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่าต่ำ แต่จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 ที่แสดงค่าปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN บ่งชี้ว่าค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปไม่ได้อยู่ในสถานะของปัจจัยต่างๆ เดียวกัน เพื่อให้ตรงตามจุดประสงค์ของการศึกษานี้ การหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ได้ตามจุดประสงค์สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) (Deringer and Suich, 1980) นอกจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจแล้ว การใช้แนวทางการหาค่าเหมาะสมด้วย constrained optimization problem หรือ nonlinear programming methods ก็สามารถใช้แก้ปัญหาได้เช่นกัน



รูปที่ 4.22 (ก) พื้นผิวผลตอบแทนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าน้ำหนักที่หายไปของ TiN ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอและ (ข) เส้นโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าน้ำหนักที่หายไป

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยทั้งสาม

$$H = 27.73 - 0.5A + 0.98B + 1.66C + 1.13AB + 2.24AC - 2.83BC - 3.21A^2 - 3.01B^2 - 1.73C^2 + 3.48ABC \quad (4.7)$$

และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยทั้งสาม

$$L = 0.001155 - 0.0000662A + 0.00008228B - 0.00007582C - 0.0002621A^2 - 0.0001684B^2 - 0.0001472C^2 \quad (4.8)$$

ภายใต้ข้อจำกัดของผลตอบแทนทั้งสอง

- ค่าความแข็งของตะขอบนควรมีค่าสูงสุด และควรมีค่าอย่างต่ำ 20 GPa แต่ถ้าเป็นไปได้ ควรมีค่าถึง 27 GPa

- คำนวณน้ำหนักที่หายไปควรมีค่าต่ำสุด และควรมีค่าอย่างมาก 0.0006 กรัม แต่ถ้าเป็นไปได้ ควรมีค่าเป็น 0 จุดที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจสูงสุดคือ ค่าไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.35 A ในขณะที่มีความดันประมาณ 50 Pa และ Ar/N₂ คือ 1.5 โดยจุดนี้จะให้ค่าความแข็งเท่ากับ 26.1537 GPa และ คำนวณน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.000485 กรัม การคำนวณฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่จุดนี้สำหรับค่าความแข็งจะได้

$$d_1 = \left(\frac{26.1537 - 20}{27 - 20} \right) = 0.879 \quad (4.9)$$

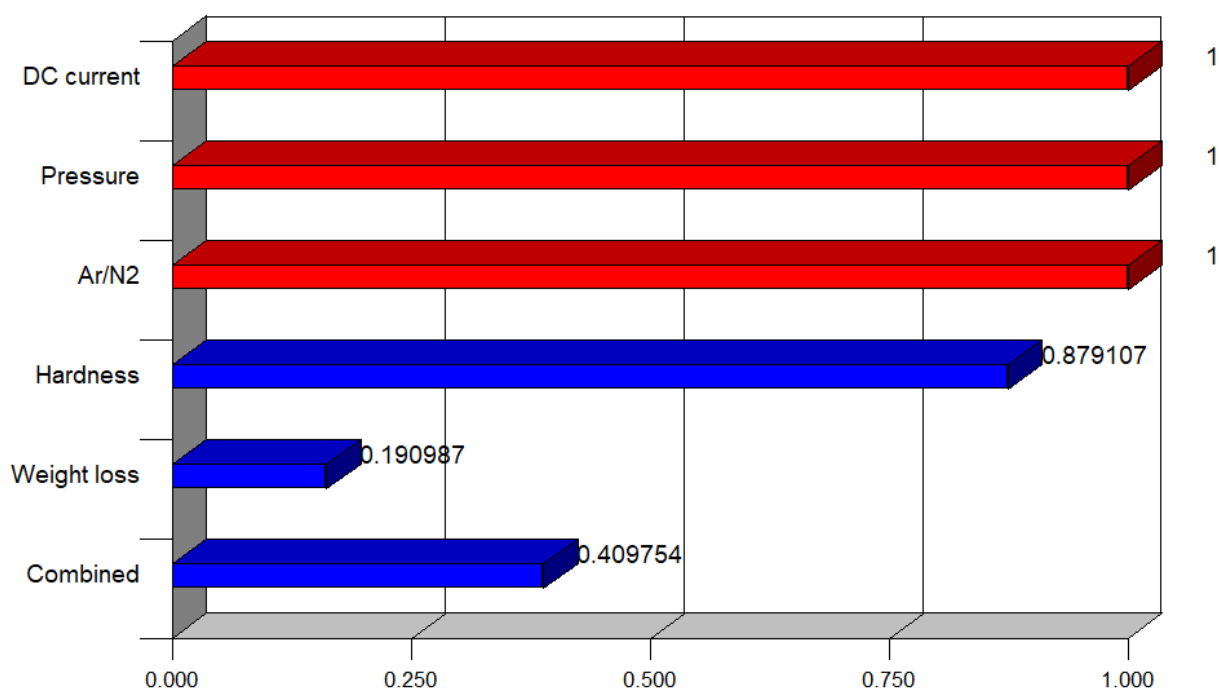
การคำนวณฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่จุดนี้สำหรับค่าน้ำหนักที่หายไปแสดงได้ดังนี้

$$d_2 = \left(\frac{0.0006 - 0.000485}{0.0006 - 0} \right) = 0.191 \quad (4.10)$$

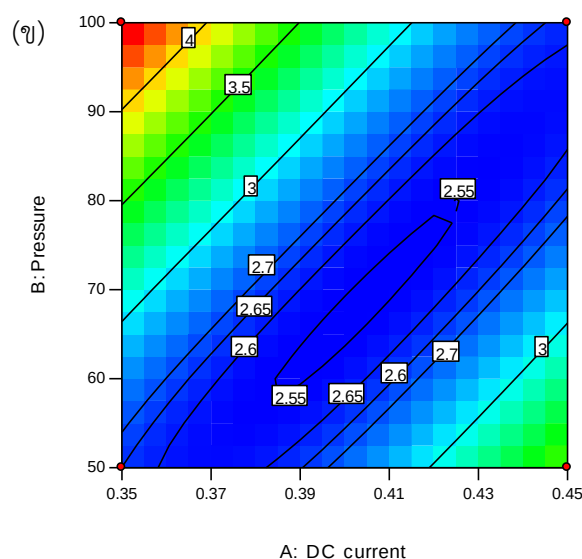
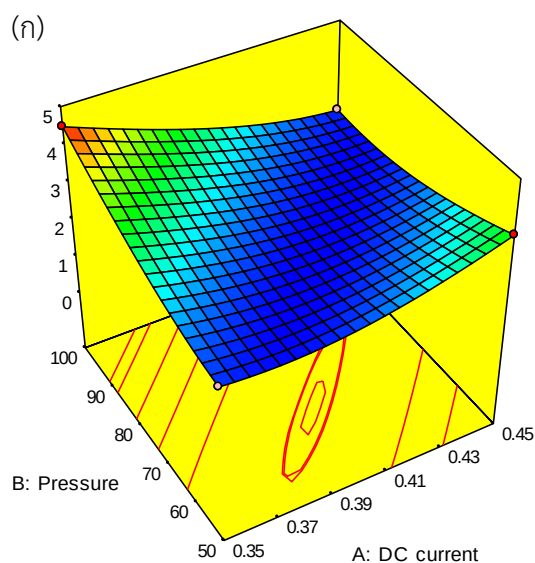
หลังจากแปลงค่าผลตอบแทนเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแล้ว ฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแต่ละผลตอบแทนจะถูกแปลงเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจรวม (overall desirability function, D) ดังสมการที่ (4.11) แล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของ D ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$D = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_n^{w_n})^{1/\sum w_i} = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{1/\sum w_i} = (0.879 \times 0.191)^{1/2} = 0.409 \quad (4.11)$$

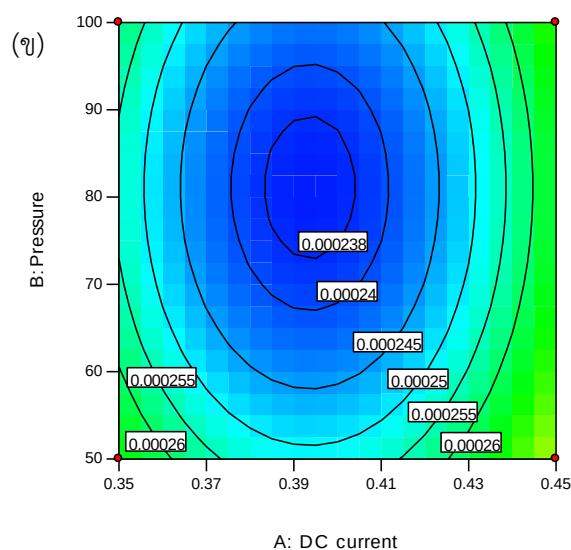
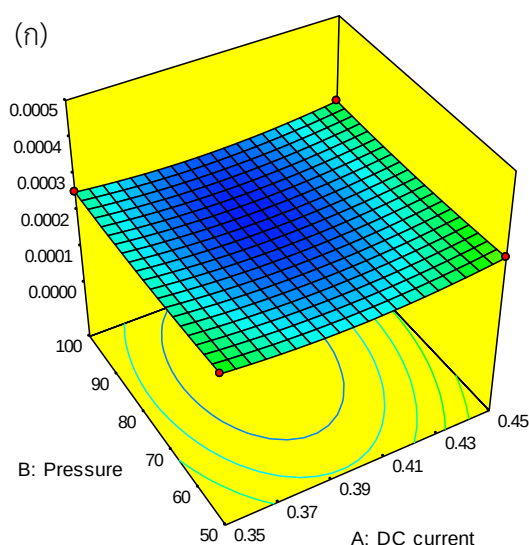
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวทั้งสองค่าและค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวมสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Design Expert®



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าฟังก์ชันความพึงพอใจในการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้ากระแสตรงและความดันในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าความแข็งของ TiN ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ RSM และ POE (ก) พื้นผิวผลตอบสนองและ (ข) เส้นโครงร่าง



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้ากระแสตรงและความดันในกระบวนการเคลือบ TiN และค่าน้ำหนักที่หายไปของ TiN ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ RSM และ POE (ก) พื้นผิวผลตอบสนองและ (ข) เส้นโครงร่าง

การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมของระดับของปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองทุกตัวอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ โดยใช้การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนต้องใช้สมการถดถอยที่แสดงในรูปตัวแปรจริง (Anderson and Whitcomb, 2005) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยทั้งสามที่แสดงในรูปตัวแปรจริง (natural variable) คือ

$$Hd = -334.9207 + 1277.1578DC + 2.8513Pa + 165.3155Ar - 4.6593(DC \times Pa) - 327.89(DC \times Ar) - 2.4525(Pa \times Ar) - 1284.1863DC^2 - 0.004815Pa^2 - 6.9391Ar^2 + 5.5662(DC \times Pa \times Ar) \quad (4.12)$$

โดยที่ Hd คือค่าความแข็ง DC คือค่าไฟฟ้ากระแสตรง Pa คือความดันและ Ar คือค่าอัตราการไหลของ Ar และ N_2 ในขณะที่สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปและปัจจัยทั้งสามที่แสดงในรูปตัวแปรจริงคือ

$$Wl = -0.0173 + 0.0825DC + 0.000044Pa + 0.001026Ar - 0.1048DC^2 - 0.00000027 Pa^2 - 0.0005886Ar^2 \quad (4.13)$$

โดยที่ Wl คือค่าน้ำหนักที่หายไป

เพื่อให้เข้าใจการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความแข็ง พิจารณาค่าความแปรปรวนของปัจจัย σ_{DC}^2 , σ_{Pa}^2 , σ_{Ar}^2 แสดงได้ดังเมตริกซ์

$$\begin{aligned} \Sigma &= \begin{pmatrix} \sigma_{DC}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Pa}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Ar}^2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0025 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนของปัจจัยทั้งสามเท่ากับ $\sigma_{DC}^2 = 0.0001$, $\sigma_{Pa}^2 = 25$, $\sigma_{Ar}^2 = 0.0025$ และ

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial DC} \\ \frac{\partial y}{\partial Pa} \\ \frac{\partial y}{\partial Ar} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1277.1578 - 4.6593Pa - 327.89Ar - 2568.373DC + 5.5662(Pa \times Ar) \\ 2.8513 - 4.6593DC - 2.4525Ar - 0.00963Pa + 5.5662(DC \times Ar) \\ 165.3155 - 327.89DC - 2.4525Pa - 13.8782Ar + 5.5662(DC \times Pa) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

โดยที่มี $\sigma_e^2 = 6.46$ (ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าความแข็ง) ดังนั้น

$$\begin{aligned} Var(y) &= \left(\frac{\partial y}{\partial DC} \right)^2 \sigma_{DC}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Pa} \right)^2 \sigma_{Pa}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Ar} \right)^2 \sigma_{Ar}^2 + \sigma_e^2 \\ &= (1277.1578 - 4.6593Pa - 327.89Ar - 2568.373DC + 5.5662(Pa \times Ar))^2 (0.0001) \\ &\quad + (2.8513 - 4.6593DC - 2.4525Ar - 0.00963Pa + 5.5662(DC \times Ar))^2 (25) \\ &\quad + (165.3155 - 327.89DC - 2.4525Pa - 13.8782Ar + 5.5662(DC \times Pa))^2 (0.0025) + 6.46 \end{aligned} \quad (4.16)$$

เมื่อแทนค่า $DC = 0.35$ A, $Pa = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$ ลงในสมการ (4.16) จะได้

$$\begin{aligned} Var(y) &= (1277.1578 - 4.6593(50) - 327.89(1.5) - 2568.373(0.35) + 5.5662(50 \times 1.5))^2 (0.0001) \\ &\quad + (2.8513 - 4.6593(0.35) - 2.4525(1.5) - 0.00963(50) + 5.5662(0.35 \times 1.5))^2 (25) \\ &\quad + (165.3155 - 327.89(0.35) - 2.4525(50) - 13.8782(1.5) + 5.5662(0.35 \times 50))^2 (0.0025) + 6.46 \\ &= 7.0213 \end{aligned} \quad (4.17)$$

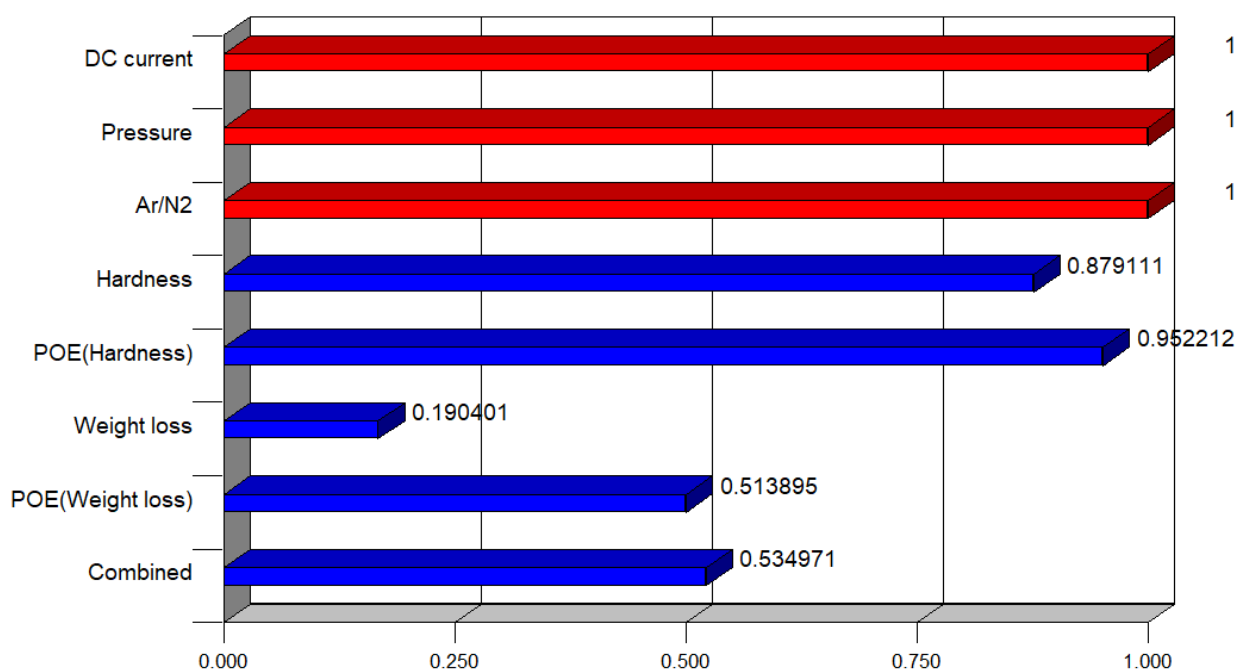
ดังนั้น จะได้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนที่จุด $DC = 0.35$ A, $Pr = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$

$$POE = \sqrt{\text{Var}(y)}$$

$$= \sqrt{7.0213} = 2.649$$
(4.18)

ซึ่งตรงกับค่าที่ได้ในรูปที่ 4.24(ข) ที่จุด $DC = 0.35$ A, $Pr = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$

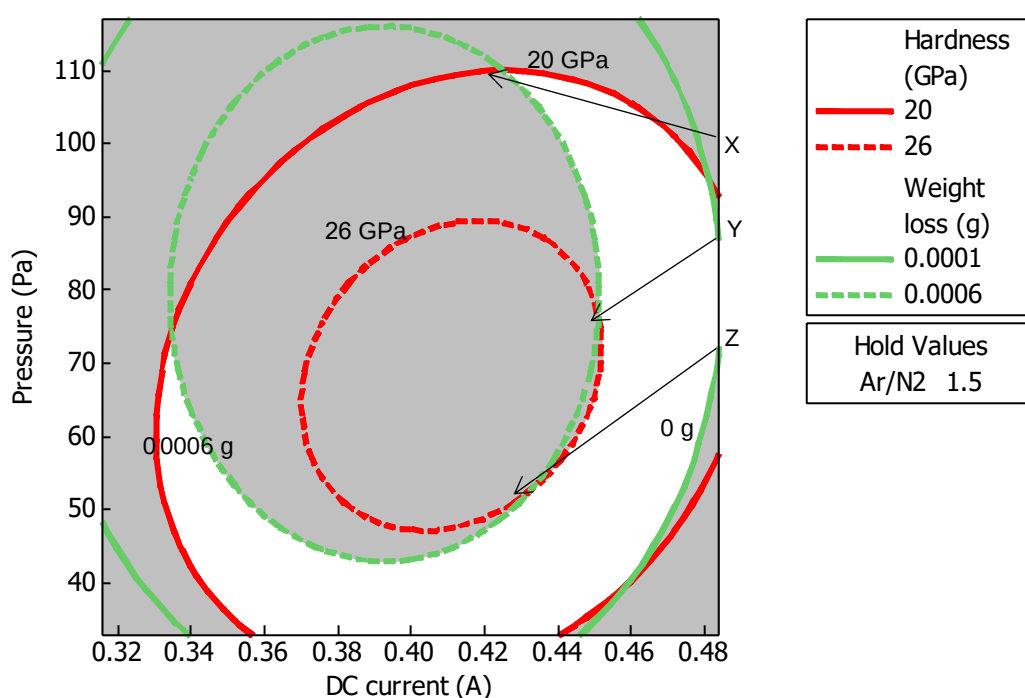
การคำนวณค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดียวทั้งสองค่าที่วิเคราะห์ด้วยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน รวมทั้งค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวมสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการคำนวณค่าเหล่านี้โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดียวทั้งสองค่าและฟังก์ชันความพึงพอใจเดียวทั้งสองค่าที่วิเคราะห์ด้วยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนรวมทั้งค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวมสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Design Expert®



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ยังใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlaid contour plot) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ได้ การเปลี่ยนระดับของค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปตามระดับต่างๆ ของปัจจัยสามารถใช้หาสภาวะที่เหมาะสมได้จากการใช้เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน รูปที่ 4.27 แสดงเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวถูกนำมาวางซ้อนทับกันโดยเปลี่ยนแปลงระดับของค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปโดยที่ค่าความแข็งคงที่ที่ระดับ 20 และ 26 GPa โดยที่ค่าน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ระดับ 0 และ 0.0006 g จากรูป สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสามสภาวะที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่แข็งแรงมากพอและค่าน้ำหนักที่หายไปนี้น้อยพอควรนำมาพิจารณา ส่วนตารางที่ 4.13 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสามสภาวะที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่แข็งแรงมากพอและค่าน้ำหนักที่หายไปนี้น้อยพอ รวมทั้งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและ

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ที่สภาวะนี้ ($DC = 0.35$ A, $Pr = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$) อยู่ภายในพื้นที่ที่ไม่ได้แรงหรือเป็นพื้นที่ที่เป็นไปได้ (feasible region) ที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่แข็งแกร่งพอและค่าน้ำหนักที่หายไปที่น้อยพอ ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปตำแหน่งของสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสามสภาวะที่น่าเสนอและสภาวะที่ได้จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน จากตารางจะเห็นว่า ค่าความแข็งที่สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสามสภาวะและที่สภาวะจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ค่าน้ำหนักที่หายไปจากสภาวะที่ได้จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนมีค่าความแตกต่างกันเกือบสองเท่า



รูปที่ 4.27 เส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวถูกนำมาวางซ้อนทับกันโดยเปลี่ยนแปลงระดับของค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไป (ก) ค่าความแข็งคงที่ที่ระดับ 20 และ 26 GPa โดยที่ค่าน้ำหนักที่หายไปอยู่ระดับ 0 และ 0.0006 g

ตารางที่ 4.13 สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสามสภาวะที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่แข็งแกร่งพอและค่าน้ำหนักที่หายไปที่น้อยพอ

ตำแหน่งของสภาวะที่เหมาะสมที่น่าเสนอ	ปัจจัย	
	กระแส (A)	ความดัน (Pa)
X	0.44	110
Y	0.45	75
Z	0.43	50
POE	0.35	50

จากสภาวะที่เหมาะสมนำไปเปรียบเทียบค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปที่สภาวะจุดกึ่งกลางของปัจจัยทั้งสาม ($DC = 0.4$ A, $Pr = 75$ Pa และ $Ar = 1$) และที่สภาวะจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (POE) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งที่สภาวะทั้งสองให้ค่าแตกต่างกันประมาณ 5% ในขณะที่ค่าน้ำหนักที่หายไปที่สภาวะทั้งสองให้ค่าแตกต่างกันเกือบ 60% ซึ่งเป็นการยืนยันว่าที่สภาวะจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ($DC = 0.35$ A, $Pr = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$) เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการนำตะขอบนที่เคลือบแข็งด้วย TiN ไปใช้โดยที่สามารถทนต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างดี อีกทั้งที่สภาวะนี้ยังทำให้ค่าความผันแปรของค่าน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอมีค่าน้อยที่สุดถึงแม้ว่าจะมีการปรับค่าปัจจัยทั้งสามให้แตกต่างไปจากสภาวะ $DC = 0.35$ A, $Pr = 50$ Pa และ $Ar = 1.5$ ไปบ้างก็ตาม

ตารางที่ 4.14 ค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปที่สภาวะจุดกึ่งกลางของปัจจัยทั้งสามและที่สภาวะ POE

ตำแหน่งของสภาวะที่เหมาะสมที่น่าเสนอ	ผลตอบแทน	
	ความแข็ง (GPa)	น้ำหนักที่หายไป (g)
X	25.5004	0.000895
Y	26.2335	0.000832
Z	24.3159	0.000809
POE	26.1683	0.000491

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความแข็งและค่าน้ำหนักที่หายไปที่สภาวะจุดกึ่งกลางของปัจจัยทั้งสามและที่สภาวะ POE

ปัจจัย	จุดกึ่งกลาง	สภาวะที่เหมาะสม (POE)	ความแข็ง (GPa)		น้ำหนักที่หายไป (g)	
			ผลที่ได้จากจุดกึ่งกลาง	ผลที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม (POE)	ผลที่ได้จากจุดกึ่งกลาง	ผลที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม (POE)
กระแส (A)	0.4	0.35	27.5804	26.1683	0.00115	0.000491
ความดัน (Pa)	75	50				
Ar/N ₂	1	1.5				
ความแตกต่าง			-1.4121		0.00066	
% การปรับปรุง			-5.1199		57.3043	

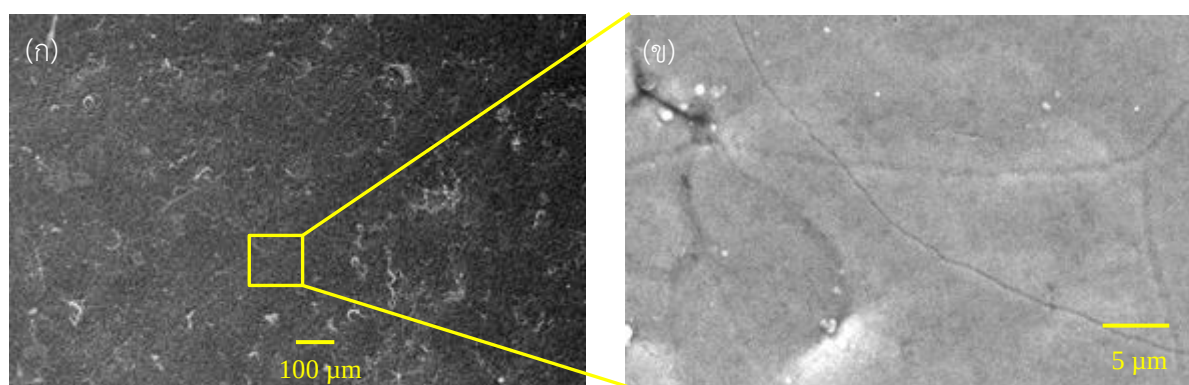
การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอทำให้ทราบกลไกการสึกหรอ เพราะการสึกหรอแต่ละรูปแบบทำให้ผิวของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ต่างกัน รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบก่อนการทดสอบการสึกหรอและรูปที่ 4.29 แสดงลักษณะของผิวเคลือบหลังการทดสอบการสึกหรอ จากรูปที่ 4.28 พบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะคล้ายผิวของชิ้นงานที่ผ่านการชุบฮาร์ด

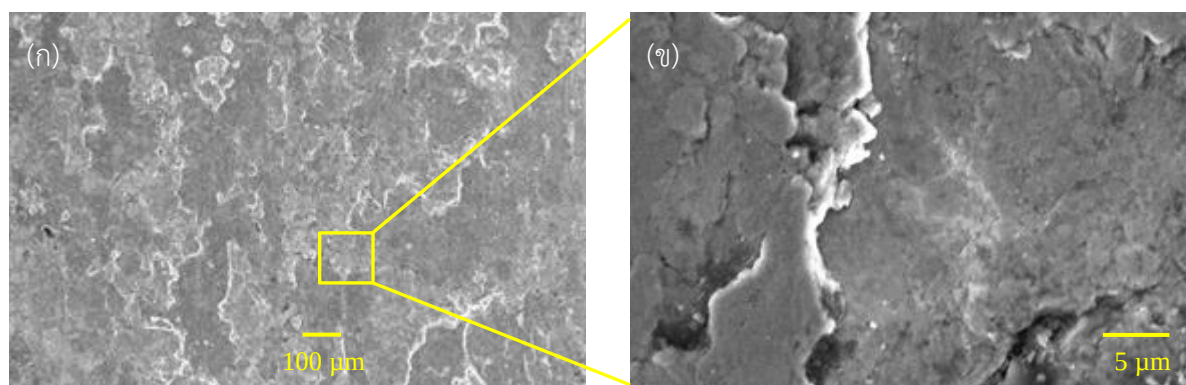
โครม โดยปรากฏรอยแตกที่เกิดจากกระบวนการชุบฮาร์ดโครมกระจายอยู่ทั่วไป ทั้งนี้เกิดจากการเคลือบที่มีความหนาของชั้น TiN ประมาณ $3\ \mu\text{m}$ ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ความหนาหรือร่องรอยของผิวเดิมได้ เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ผิวมีลักษณะเหมือนผิวเดิม ในขณะที่ส่วนที่เป็นร่องลึกที่เกิดจากกระบวนการชุบฮาร์ดโครมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยความลึกของร่องจะลดน้อยลง บางส่วนของรอยแตกก็จะเลือนหายไปซึ่งไม่ชัดเจนเหมือนกับผิวก่อนการเคลือบ

จากรูปที่ 4.29 แรงกดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอทำให้ส่วนที่นิ่มหรือส่วนที่เป็นสัณคลื่นแบนราบลงไป เนื้อโลหะส่วนที่ถูกกดทับกระจายออกไปทุกทิศทุกทาง ทำให้บริเวณขอบของส่วนที่ถูกกดมีลักษณะไม่เรียบและไม่มีความเรียบเนียน บริเวณที่เป็นสัณคลื่นเดิมที่ถูกกดทับมีลักษณะเรียบ ทั้งนี้เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างผิวเคลือบกับลูกบอลเหล็กที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติด โดยแรงกดจากลูกบอลเหล็กกระทำต่อผิวของชิ้นงานและทำให้อะตอมของผิวชิ้นงานยึดติดกับอะตอมของลูกบอล เมื่อลูกบอลเหล็กกลิ้งไป ผิวของชิ้นงานส่วนหนึ่งจะติดออกไปกับลูกบอล บางส่วนอาจหลุดออกจากบริเวณทดสอบ บางส่วนอาจหลุดออกตกอยู่ในบริเวณที่เป็นแอ่ง บางส่วนก็ตกลงไปในร่อง และถูกกดทับจนเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้หลังการทดสอบพบว่า ผิวของชิ้นงานไม่มีรอยแตกที่บริเวณผิว การกดอัดอนุภาคเล็กๆ ลงไปในรอยแตกนี้เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของการสึกหรอ เพราะเมื่ออนุภาคตกลงไปในรอยแตกจำนวนมากๆ และมีแรงมากกดทับอีกจะทำให้อนุภาคแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ TiN และชั้นของฮาร์ดโครม เมื่อปริมาณของอนุภาคมีมากพอและได้รับแรงกดดันจากลูกบอลก็จะทำให้ชั้นผิวเคลือบแยกตัวออกจากชั้นของฮาร์ดโครม และบริเวณที่เกิดการแยกตัวก็จะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (crack propagation) เมื่อได้รับแรงกดซ้ำไปซ้ำมาอีกหลายๆ ครั้ง ผิวเคลือบก็จะแตกและหลุดออกไป

ลักษณะของการสึกหรอของผิวเคลือบของตะขอบนมีกลไกการสึกหรอที่เกิดจากการยึดติด และการแตกหัก โดยไม่ปรากฏร่องรอยที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบขัดสี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคผิวเคลือบที่เป็น TiN มีความแข็งกว่าพื้นผิวที่เป็นฮาร์ดโครม เมื่ออนุภาคของ TiN หลุดออกมาและถูกกดทับด้วยลูกบอลเหล็ก อนุภาคเหล่านั้นก็จะฝังตัวลงไปใ้ผิวที่เป็นฮาร์ดโครม ซึ่งทำให้ไม่มีอนุภาคที่จะเป็นวัสดุขัดสี อย่างไรก็ตามเนื่องจากผิวเคลือบของตะขอบนแต่ละตัวมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน อัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นจึงแตกต่างกันซึ่งทำให้น้ำหนักที่หายไปของตะขอบนแต่ละตัวแตกต่างกันด้วย



รูปที่ 4.28 SEM ของตะขอบนที่เคลือบด้วย TiN โดย (ก) ขยาย 100 เท่าและ (ข) ขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.29 SEM ของตะขอบนที่เคลือบด้วย TiN หลังการทดสอบการสึกหรอโดย (ก) ขยาย 100 เท่าและ (ข) ขยาย 3000 เท่า

4.2.2 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง TiAlSiN และ TiCrAlSiN

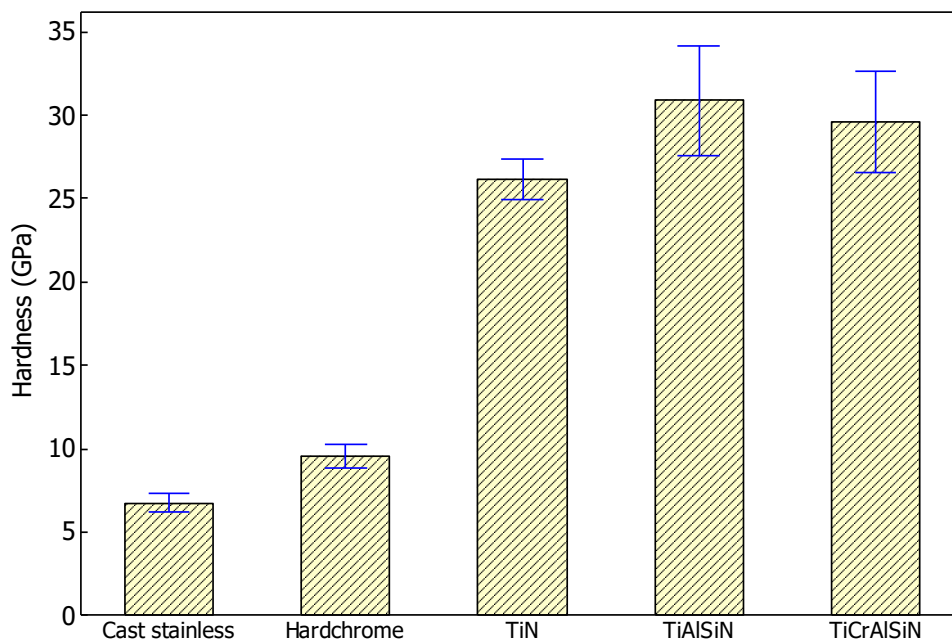
การเคลือบผิวตะขอบนด้วยวัสดุอื่นๆ เป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ศึกษานอกเหนือจากตะขอบนที่เคลือบด้วย TiN วัสดุที่ใช้เคลือบคือ TiAlSiN และ TiCrAlSiN เนื่องจากตะขอบนที่ใช้อยู่ในโรงงานปัจจุบันผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครม การเปรียบเทียบความสามารถในความคงทนต่อการสึกหรอของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการฮาร์ดโครมควรใช้เป็นชิ้นงานเปรียบเทียบความสามารถในความคงทนต่อการสึกหรอของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครมและเคลือบด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN การทดสอบความแข็ง การทดสอบความหยาบผิวของตะขอบนและการทดสอบการสึกหรอของตะขอบนจะได้กล่าวถึงต่อไป

การทดสอบค่าความแข็ง (hardness test)

การทดสอบค่าความแข็งของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครมที่เคลือบด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยในแต่ละวัสดุทำการทดสอบความแข็งอย่างละ 5 ซ้ำแสดงได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าความแข็งของตะขอบนตามชนิดของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ค่าความแข็ง (GPa)				
	1	2	3	4	5
เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ	7.2252	6.8172	6.5590	6.9325	6.0605
ฮาร์ดโครม	9.9163	8.5848	9.4410	10.0222	9.5603
TiN	26.6319	26.2660	25.3605	27.4584	24.9536
TiAlSiN	27.9537	29.8326	31.2013	35.0433	30.1234
TiCrAlSiN	27.8358	30.5644	32.4601	30.7266	26.2905



รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งของตะขอบนตามชนิดของวัสดุโดยที่มีค่าความผันแปร (error bar)
(Khanchaiyaphum et al., 2017)

ค่าความแข็งถูกทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็ง โดยใช้น้ำหนักกด 50 mN ค่าเฉลี่ยของความแข็งของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมีน้อยสุดเท่ากับ 6.7189 GPa รองลงมาคือตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ 9.5049 GPa ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวแข็งด้วย TiN เท่ากับ 26.1341 GPa, TiCrAlSiN เท่ากับ 29.5755 GPa และ TiAlSiN เท่ากับ 30.8308 GPa ตามลำดับ รูปที่ 4.30 แสดงค่าความแข็งของตะขอบนตามชนิดของวัสดุโดยที่เป็นกราฟแท่งที่มีค่าความผันแปร (error bar) ค่าความแข็งของตะขอบนทุกแบบมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Martinho et al. (2009), Chen et al. (2014), Wu et al. (2015), He et al. (2016) เป็นต้น

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งของผิวตะขอบนรูปแบบต่างๆ สามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA) การทดสอบสมมติฐานแสดงได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_5$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j, \text{ for at least one pair } (i, j)$$

หรือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_5 = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0, \text{ for at least one } i$$

โดยที่ $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของผิวตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวหลายชั้นด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN ตามลำดับ ส่วน $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$ คือผลกระทบเนื่องจากความแตกต่างของผิวตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวหลายชั้นด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบผลกระทบของสารเคลือบต่อความแข็งแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบผลกระทบของวัสดุและสารเคลือบต่อความแข็ง

Source of variation	df	Sum of squares	Mean square	F-value	p-value
Type of coating	4	2658.155	664.539	228.48	< 0.0001
Error	20	58.170	2.909		
Total	24	2716.326			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นว่า วัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผิวตะขอบนโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าความแข็งระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทต่างๆ นั้น จำเป็นต้องนำไปเปรียบเทียบกับเพื่อพิจารณาว่าวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทใดมีความแข็งแตกต่างกันอย่างไร

การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด (Least significant difference method, LSD) ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของความแข็งของผิวตะขอบนที่ทำจากวัสดุและสารเคลือบแข็งอย่างน้อย 1 คู่ การคำนวณค่า LSD แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 LSD &= (t_{\alpha/2, an-a}) \sqrt{MS_{Error} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \\
 &= (t_{0.05/2, (5)(5)-5}) \sqrt{2.909 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)} \\
 &= 2.086 \times 1.0787 = 2.2502
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

ถ้าค่าความแตกต่างของความแข็งโดยเฉลี่ยระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทต่างๆ มีค่ามากกว่าค่า LSD จะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่าค่าความแตกต่างของความแข็งโดยเฉลี่ยระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งคู่นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งในแต่ละระดับเป็นคู่โดยใช้วิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งของค่าสังเกตในแต่ละระดับเป็นคู่ โดยใช้วิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด

คู่เปรียบเทียบ	ผลสรุปค่าความแตกต่าง
TiAlSiN และ stainless	$ 30.8308 - 6.7189 = 24.1119^*$
TiAlSiN และ hard chrome	$ 30.8308 - 9.5049 = 21.3259^*$
TiAlSiN และ TiN	$ 30.8308 - 26.1341 = 4.6967^*$
TiAlSiN และ TiCrAlSiN	$30.8308 - 29.5755 = 1.2553$
TiCrAlSiN และ stainless	$ 29.5755 - 6.7189 = 22.8566^*$
TiCrAlSiN และ hard chrome	$ 29.5755 - 9.5049 = 20.0706^*$
TiCrAlSiN และ TiN	$ 29.5755 - 26.1341 = 3.4414^*$
TiN และ stainless	$ 26.1341 - 6.7189 = 19.4152^*$
TiN และ hard chrome	$ 26.1341 - 9.5049 = 16.6292^*$
HC และ stainless	$ 9.5049 - 6.7189 = 2.7860^*$

หมายเหตุ * หมายถึงค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การแสดงผลการทดสอบสามารถทำได้โดยการเรียงลำดับค่าเฉลี่ยความแข็งในแต่ละระดับตามลำดับจากน้อยไปมาก ถ้าคู่ใดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจะขีดเส้นใต้ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$\bar{y}_{1\cdot}$	$\bar{y}_{2\cdot}$	$\bar{y}_{3\cdot}$	$\bar{y}_{4\cdot}$	$\bar{y}_{5\cdot}$
6.7189	9.5049	26.1341	<u>29.5755</u>	<u>30.8308</u>

โดยที่

- $\bar{y}_{1\cdot}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของ stainless
- $\bar{y}_{2\cdot}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของ hard chrome
- $\bar{y}_{3\cdot}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของ TiN
- $\bar{y}_{4\cdot}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของ TiCrAlSiN
- $\bar{y}_{5\cdot}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแข็งของ TiAlSiN

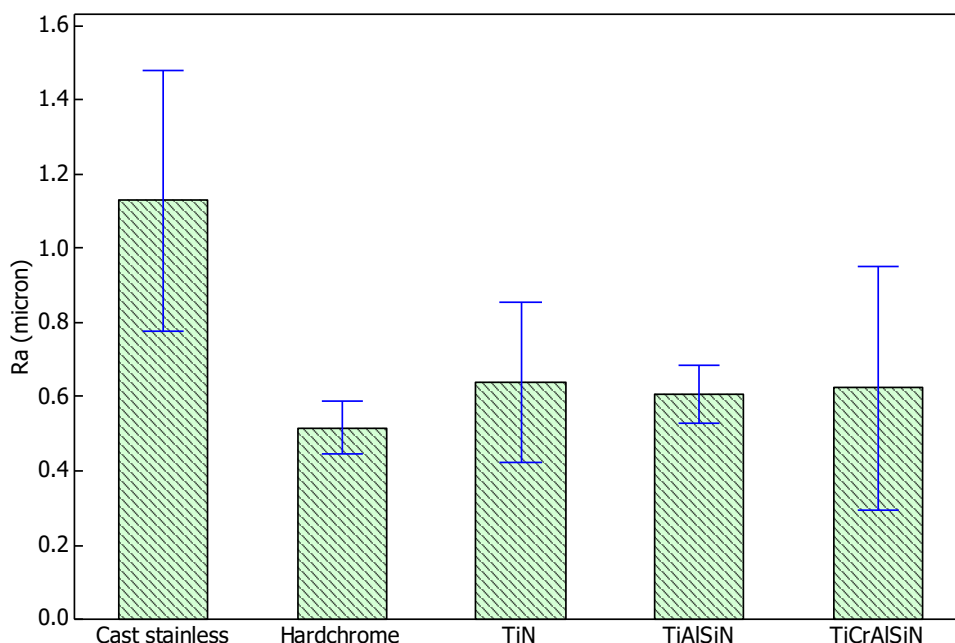
จากการทดสอบการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็ง จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยความแข็งระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีค่าความแข็งสูงสุดโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน

การทดสอบค่าความหยาบผิว (surface roughness test)

การทดสอบความหยาบผิวของตะขอบนที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านกระบวนการฮาร์ดโครมที่เคลือบด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยในแต่ละวัสดุทำการทดสอบความหยาบผิวอย่างละ 5 ซ้ำแสดงได้ดังตารางที่ 4.19 และแสดงเป็นกราฟแท่งที่มีค่าความผันแปร (error bar) ดังรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.19 ความหยาบผิวของตะขอบนตามชนิดของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ค่าความหยาบผิว (μm)				
	1	2	3	4	5
เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ	1.1060	0.8092	1.4616	1.3604	0.9012
ฮาร์ดโครม	0.5398	0.5878	0.5128	0.4310	0.5092
TiN	0.6580	0.4640	0.4920	0.8992	0.6804
TiAlSiN	0.5470	0.6050	0.6358	0.5488	0.6974
TiCrAlSiN	0.4218	1.0708	0.4506	0.6428	0.5336



รูปที่ 4.31 ค่าความหยาบผิวของตะขอบนตามชนิดของวัสดุโดยแสดงค่าความผันแปร (error bar)
(Khanchaiyaphum et al., 2017)

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวตะขอบนรูปแบบต่างๆ สามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA) การทดสอบสมมติฐานแสดงได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_5$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j, \text{ for at least one pair } (i, j)$$

หรือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_5 = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0, \text{ for at least one } i$$

โดยที่ $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ คือค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN ตามลำดับ และ $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$ คือผลกระทบเนื่องจากความแตกต่างของวัสดุต่างๆ ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบผลกระทบของสารเคลือบต่อความหยาบผิวแสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบผลกระทบของของวัสดุและสารเคลือบต่อความหยาบผิว

Source of variation	df	Sum of squares	Mean square	F-value	p-value
Type of Coating	4	1.175	0.294	7.841	< 0.0001
Error	20	0.749	0.037		
Total	24	1.924			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นว่า วัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวตะขอบนโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าความหยาบผิวระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทต่างๆ นั้น จำเป็นต้องนำไปเปรียบเทียบกับเพื่อพิจารณาว่าวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทใดมีความหยาบผิวแตกต่างกันอย่างไร

การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด (Least significant difference method, *LSD*) ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของความหยาบผิวตะขอบนที่ทำจากวัสดุและสารเคลือบแข็งอย่างน้อย 1 คู่ การคำนวณค่า *LSD* แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} LSD &= (t_{\alpha/2, an-a}) \sqrt{MS_{Error} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \\ &= (t_{0.05/2, (5)(5)-5}) \sqrt{0.037 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)} \\ &= 2.086 \times 0.1217 = 0.2538 \end{aligned} \quad (4.20)$$

ถ้าค่าความแตกต่างของความหยาบผิวโดยเฉลี่ยระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งที่ใช้ทำตะขอบนประเภทต่างๆ มีค่ามากกว่าค่า *LSD* จะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่าค่าความแตกต่างของความหยาบผิวโดยเฉลี่ยระหว่างวัสดุและสารเคลือบแข็งคู่นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิวในแต่ละระดับเป็นคู่โดยใช้วิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของค่าสังเกตในแต่ละระดับเป็นคู่ โดยใช้วิธีความแตกต่างระดับนัยสำคัญน้อยที่สุด

คู่เปรียบเทียบ	ผลสรุปค่าความแตกต่าง
TiAlSiN และ stainless	$ 1.1277 - 0.6068 = 0.5209^*$
TiAlSiN และ hard chrome	$ 0.6068 - 0.5161 = 0.0907$
TiAlSiN และ TiN	$ 0.6387 - 0.6068 = 0.0319$
TiAlSiN และ TiCrAlSiN	$ 0.6239 - 0.6068 = 0.0171$
TiCrAlSiN และ stainless	$ 1.1277 - 0.6239 = 0.5038^*$
TiCrAlSiN และ hard chrome	$ 0.6239 - 0.5161 = 0.1078$
TiCrAlSiN และ TiN	$ 0.6387 - 0.6239 = 0.0148$
TiN และ stainless	$ 1.1277 - 0.6387 = 0.4890^*$
TiN และ hard chrome	$ 0.6387 - 0.5161 = 0.1226$
HC และ stainless	$ 1.1277 - 0.5161 = 0.6116^*$

หมายเหตุ * หมายถึงค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การแสดงผลการทดสอบสามารถทำได้โดยการเรียงลำดับค่าเฉลี่ยความหยาบผิวในแต่ละระดับตามลำดับจากน้อยไปมาก ถ้าคูใดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจะขีดเส้นใต้ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$\bar{y}_{1\cdot}$	$\bar{y}_{2\cdot}$	$\bar{y}_{3\cdot}$	$\bar{y}_{4\cdot}$	$\bar{y}_{5\cdot}$
0.5161	0.6068	0.6239	0.6387	1.1277

โดยที่

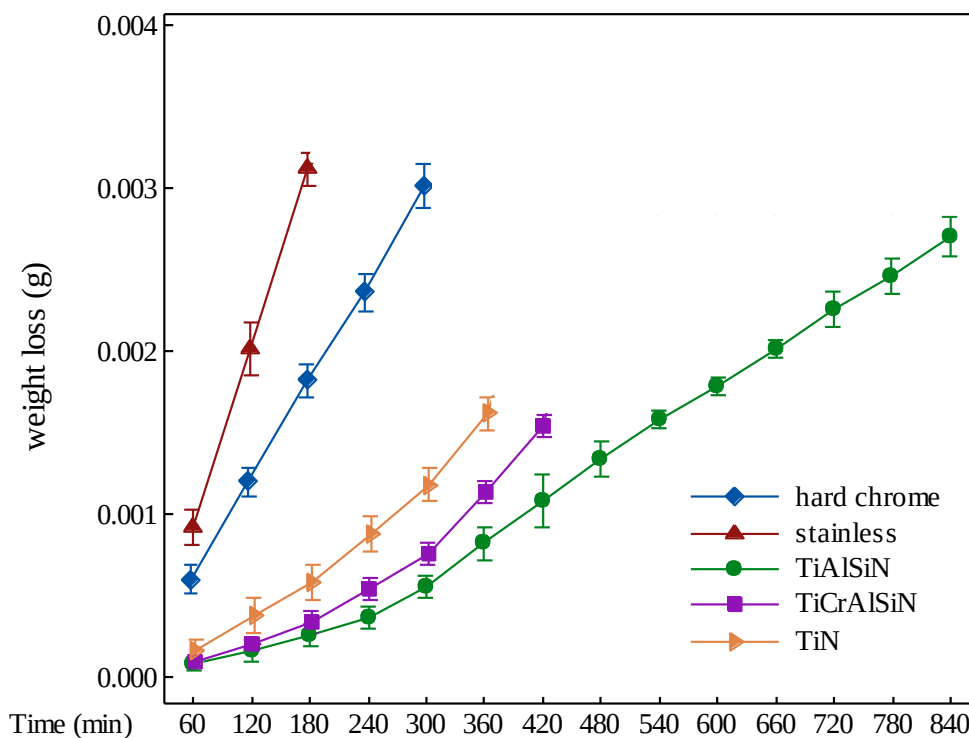
- $\bar{y}_1$. คือ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของ hard chrome
- $\bar{y}_2$. คือ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของ TiAlSiN
- $\bar{y}_3$. คือ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของ TiCrAlSiN
- $\bar{y}_4$. คือ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของ TiN
- $\bar{y}_5$. คือ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของ stainless

จากการทดสอบการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิว จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยความหยาบผิวระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและวัสดุต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมีความหยาบผิวมากที่สุด ซึ่งเกิดจากการผ่านการหล่อโดยที่ยังไม่ได้ผ่านการชุบ ฮาร์ดโครมและสารเคลือบแข็งอื่นๆ

การทดสอบการสึกหรอ (wear test)

รูปที่ 4.32 แสดงน้ำหนักที่หายไปเฉลี่ยของตะขอบนหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมีอายุการใช้งานต่ำที่สุด โดยหมดอายุการใช้งานเมื่อผ่านการทดสอบการสึกหรอที่เวลา 180 นาที ในขณะที่ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมหมดอายุการใช้งานที่เวลา 300 นาที ส่วนตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN หมดอายุการใช้งานที่เวลา 840 นาที ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีการสึกหรอต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่โรงงานใช้งานอยู่ในปัจจุบันคิดเป็นปริมาณ 2.8 เท่า ผลการศึกษานี้สร้างความกระจ่างเกี่ยวกับอายุการใช้งานของตะขอที่เคลือบด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยการศึกษาของ Zhang et al. (2015) ระบุว่าอายุการใช้งานของมิตดัดที่เคลือบด้วย AlTiSiN และ AlCrTiSiN ยังไม่ปรากฏความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบการสึกหรอของตะขอบนพบว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตะขอบนรูปแบบอื่นๆ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความแข็งสูงกว่าตะขอบนรูปแบบอื่นๆ ด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งมีผลต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอบน เมื่อค่าความแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอของตะขอสูงมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาค่าความหยาบผิวพบว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN นั้นมีค่าความหยาบผิวอยู่ในระดับกลางเมื่อเปรียบเทียบกับตะขอบนรูปแบบอื่นๆ จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความหยาบผิวอาจจะมีผลต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอบน

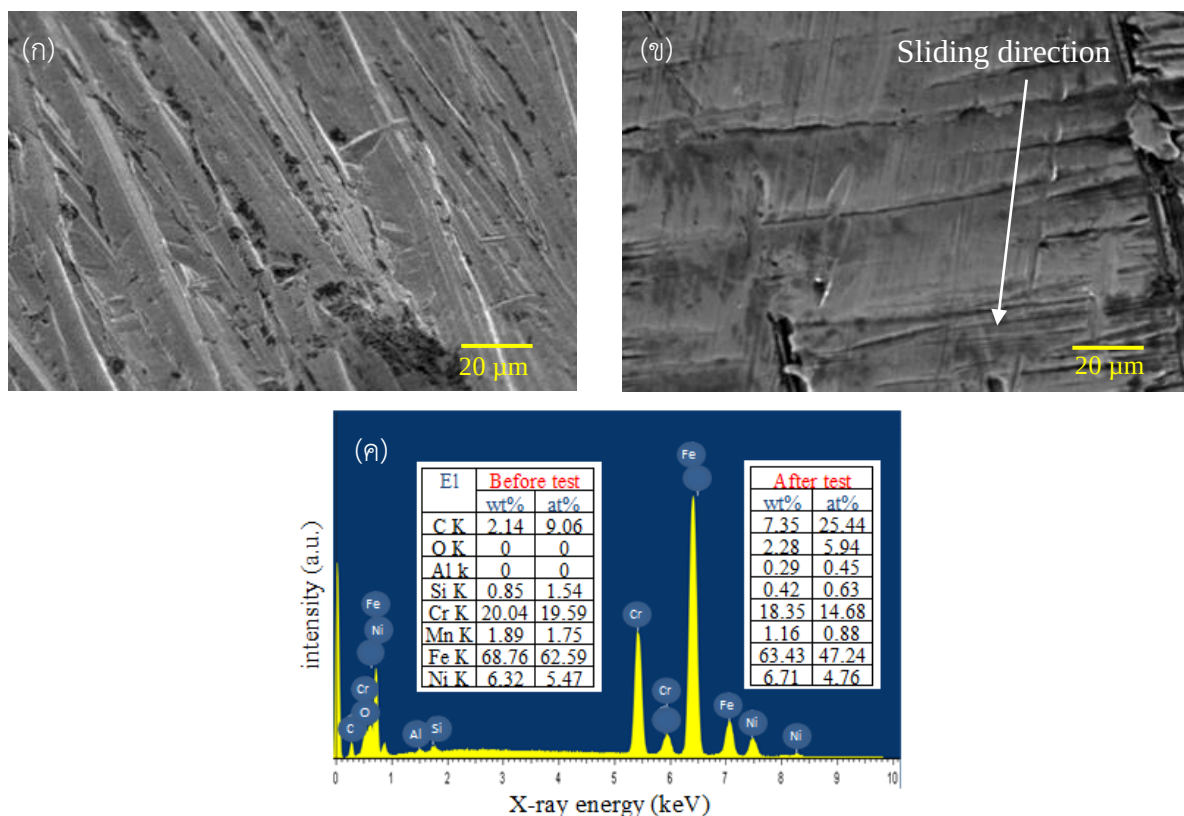


รูปที่ 4.32 น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ยของตะขอบนหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure analysis)

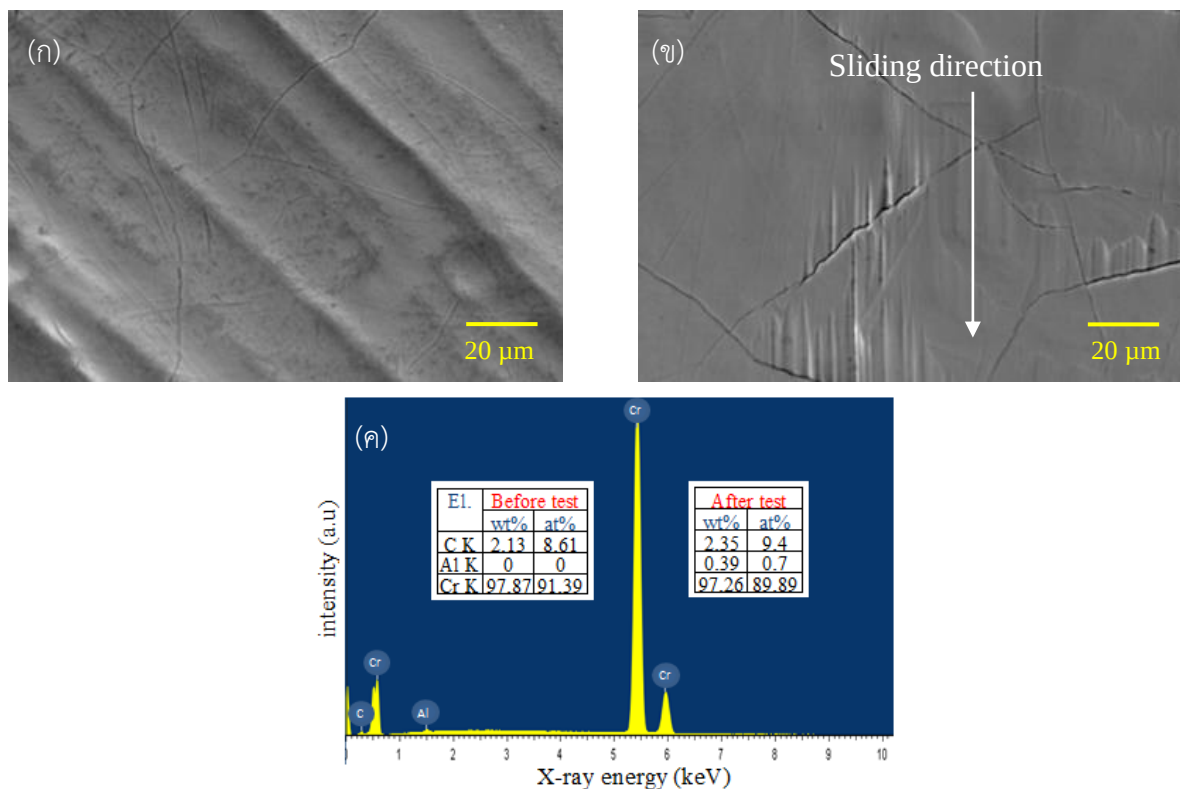
ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและปริมาณธาตุของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาร์บิก โดยใช้ SEM/EDX ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอแบบเส้นไถในสภาวะแห้ง ในส่วนหลังการทดสอบการสึกหรอนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและปริมาณธาตุด้วย SEM/EDX ทำหลังจากที่ชิ้นงานนั้นๆ ไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป

ลักษณะของผิวของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อแสดงดังรูปที่ 4.33(ก) ก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่าผิวของตะขอเป็นร่องในแนวนานกันและมีหลุมเล็กๆ กระจายอยู่ตามแนวร่อง ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการขัดผิวชิ้นงาน รูปที่ 4.33(ข) แสดงลักษณะผิวของตะขอบนหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นเวลา 180 นาที ซึ่งพบว่าผิวของตะขอมีความละเอียดมากขึ้น ส่วนที่เป็นร่องในแนวนานกันที่พบก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอถูกขัดสีและความลึกของแนวร่องลดลงเป็นผลทำให้ผิวมีความเรียบมากขึ้น รูปที่ 4.33(ค) แสดงผลการวิเคราะห์หาส่วนผสมของผิวตะขอทั้งก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอซึ่งพบว่าก่อนการทดสอบผิวตะขอไม่มี O และ Al เป็นองค์ประกอบ แต่หลังการทดสอบปรากฏ O และ Al เพิ่มขึ้นและสัดส่วนของธาตุอื่นๆ อยู่ในระดับปกติ สาเหตุที่มี O และ Al เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะ O เป็นองค์ประกอบหนึ่งของเส้นใยไถล่อนที่เกิดการหลุดออกจากเส้นใยและไปยึดติดกับผิวตะขอทำให้หลังการทดสอบพบว่ามี O เป็นองค์ประกอบ ในส่วนของ Al เกิดจากเส้นใยเช่นเดียวกัน แม้ว่า Al จะไม่ใช่องค์ประกอบของเส้นใย แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิต เส้นใยจะสัมผัสกับชิ้นส่วนที่เป็น Al ทำให้มี Al เกาะติดอยู่กับเส้นใยและเมื่อนำเส้นใยที่มี Al เกาะติดอยู่มาทดสอบ Al บางส่วนจึงไปยึดติดอยู่กับผิวตะขอทำให้หลังการทดสอบพบว่ามี Al เพิ่มขึ้น



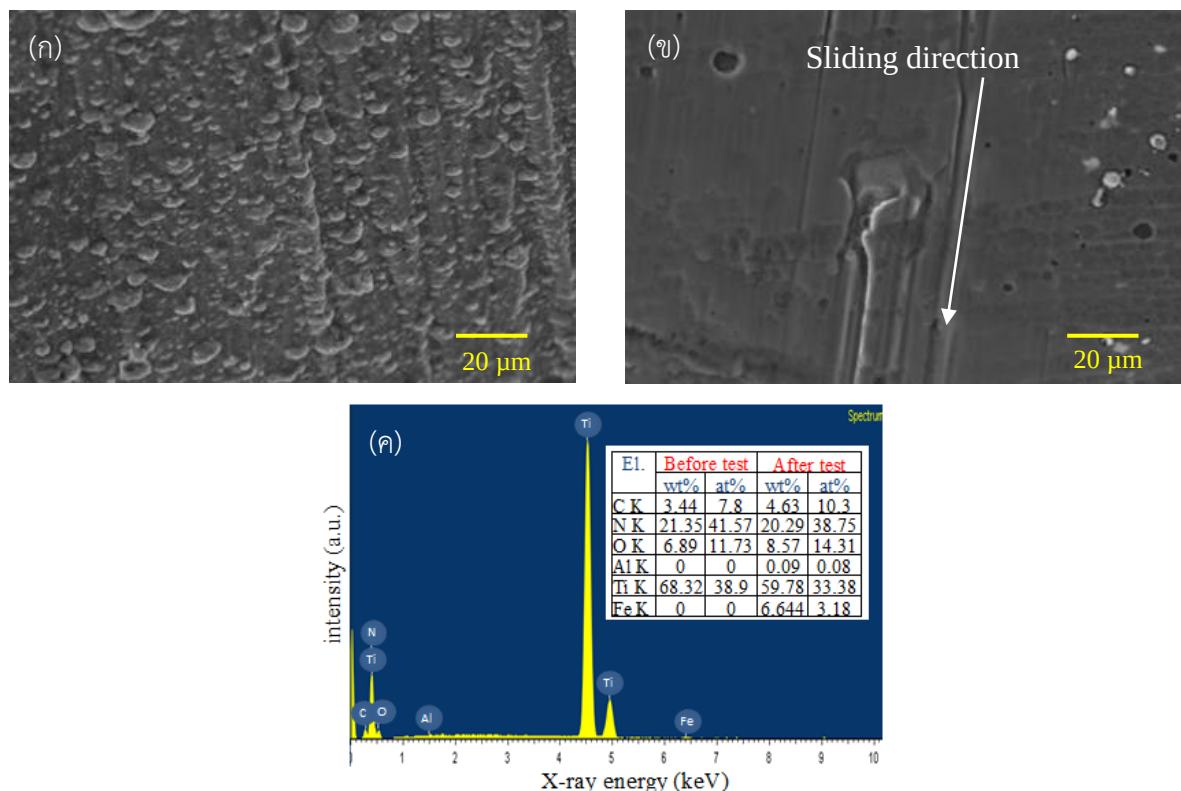
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ (ก) ก่อน (ข) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีและ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

รูปที่ 4.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผิวตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม โดยลักษณะของผิวตะขอหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอมีความเรียบมากกว่าก่อนการทดสอบ แต่ก็พบว่ามีรอยแตกกระจายอยู่ทั่วไป รูปที่ 4.34(ก) แสดงรอยแตกที่อาจเกิดจากความเค้นที่ค้างอยู่ในผิวของตะขอที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมมาก่อนการทดสอบ รูปที่ 4.34(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของผิวตะขอหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นเวลา 300 นาที ซึ่งพบว่าผิวของตะขอเกิดการสึกหรอเป็นร่องตามแนวการเคลื่อนที่ของเส้นใย รอยแยกที่อยู่รอบๆ ร่องสึกหรอนี้ขยายตัวออกไปยังบริเวณโดยรอบเกิดเป็นรอยแยกที่มีขนาดใหญ่ และมีความลึกของร่องมากกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการสึกหรอแบบแตกหัก (Costa et al., 2010) รูปที่ 4.34(ค) แสดงการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ซึ่งพบว่าให้เห็นว่าหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอนั้นบริเวณผิวตะขอมี C เพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนการทดสอบเล็กน้อยและ Al เพิ่มขึ้นเช่นกัน สาเหตุที่ C เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะ C เป็นองค์ประกอบหนึ่งของเส้นใยไนลอน เมื่อเส้นใยไนลอนเกิดการขัดสีและมีบางส่วนของเส้นใยยึดติดกับผิวตะขอทำให้หลังการทดสอบพบว่ามี C รวมอยู่ ในส่วน Al เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากในกระบวนการผลิตและจัดเก็บเส้นใยนั้นมีชิ้นส่วนที่เป็น Al อยู่ เมื่อเส้นใยเคลื่อนที่ผ่านชิ้นส่วนนั้นทำให้มี Al ติดมากับเส้นใย และเมื่อนำเส้นใยที่มี Al เกาะติดอยู่มาทดสอบ Al บางส่วนจึงไปยึดติดอยู่กับผิวตะขอทำให้หลังการทดสอบพบว่ามี Al เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม (ก) ก่อน (ข) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอผ่านไปแล้ว 300 นาที่และ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

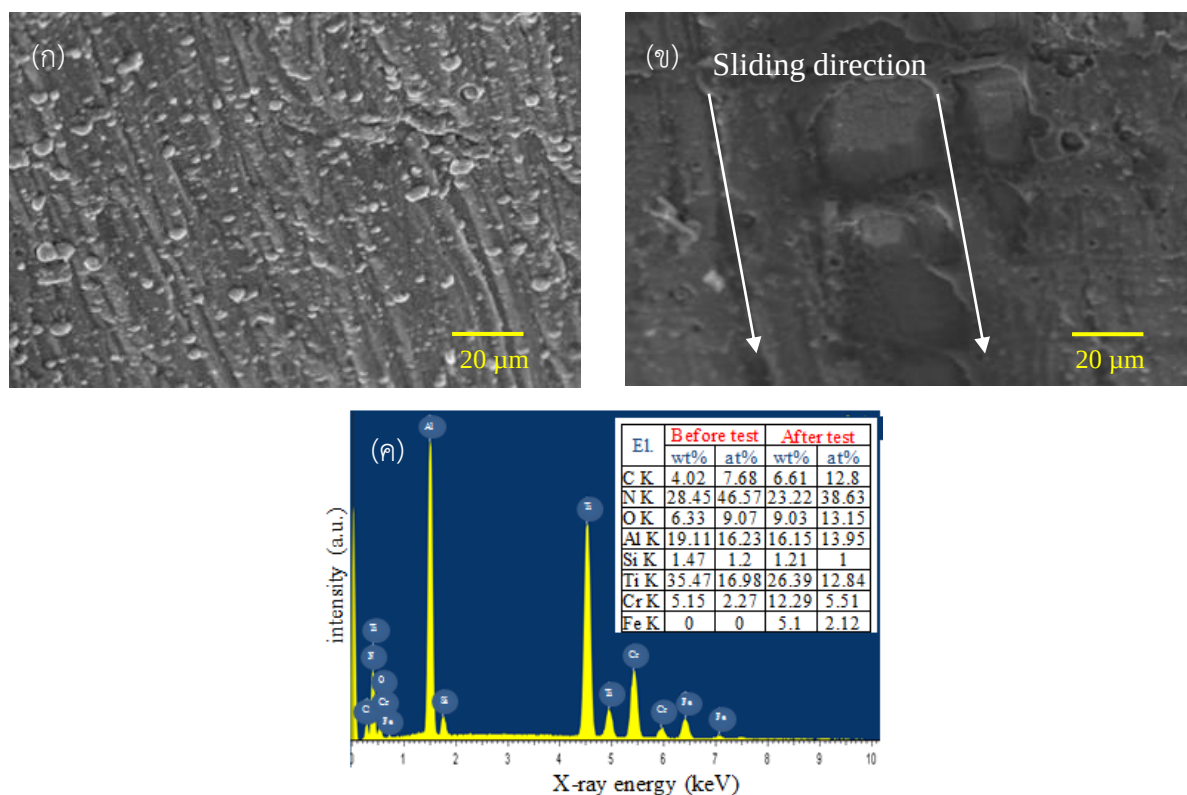
สำหรับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกมีพฤติกรรมการสึกหรอดังนี้ รูปที่ 4.35(ก) แสดงตะขอบนที่เคลือบผิวด้วย TiN ก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่าผิวตะขอมีลักษณะพื้นผิวคล้ายหยดน้ำ (droplet) ขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วบริเวณ หลังจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นเวลา 360 นาที่พบว่าลักษณะพื้นผิวคล้ายหยดน้ำของ TiN หลุดออกไป (ดังแสดงในรูปที่ 4.35(ข)) เกิดรอยสึกหรอเป็นแนวขนานตามแนวของการเคลื่อนที่ของเส้นใย โดยเฉพาะตรงบริเวณกึ่งกลางของแนวการเคลื่อนที่ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN กับรอยสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีของเส้นใยกับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมพบว่า รอยสึกของผิวตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN มีน้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN สามารถป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากการลื่นไถลแบบแห้งได้ดี รูปที่ 4.35(ค) แสดงการวิเคราะห์ด้วย EDX ก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่าปริมาณอะตอมของ Ti ร้อยละ 38.9 และ N ร้อยละ 41.57 คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนปกติของ TiN นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นปนอยู่ด้วยคือ O ร้อยละ 11.73 โดย O ที่พบนี้เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากการวิเคราะห์ไม่พบว่ามี Fe เป็นองค์ประกอบ นั้นหมายความว่าผิวเคลือบมีความหนาเพียงพอที่ให้อิเลคตรอนจาก EDX ไม่สามารถทะลุลงไปถึงชั้นที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อได้ อย่างไรก็ตาม หลังจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่า Ti และ N ลดลง และพบว่ามีส่วนผสมของ Fe C, O และ Al เพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า TiN ได้หลุดออกไปบางส่วนจนถึงชั้นที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและมีธาตุที่เกิดจากเส้นใยในล่อนมายึดติดอยู่กับผิวตะขอด้วย



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวหลายชั้นด้วย TiN (ก) ก่อน (ข) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอผ่านไปแล้ว 360 นาทีและ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

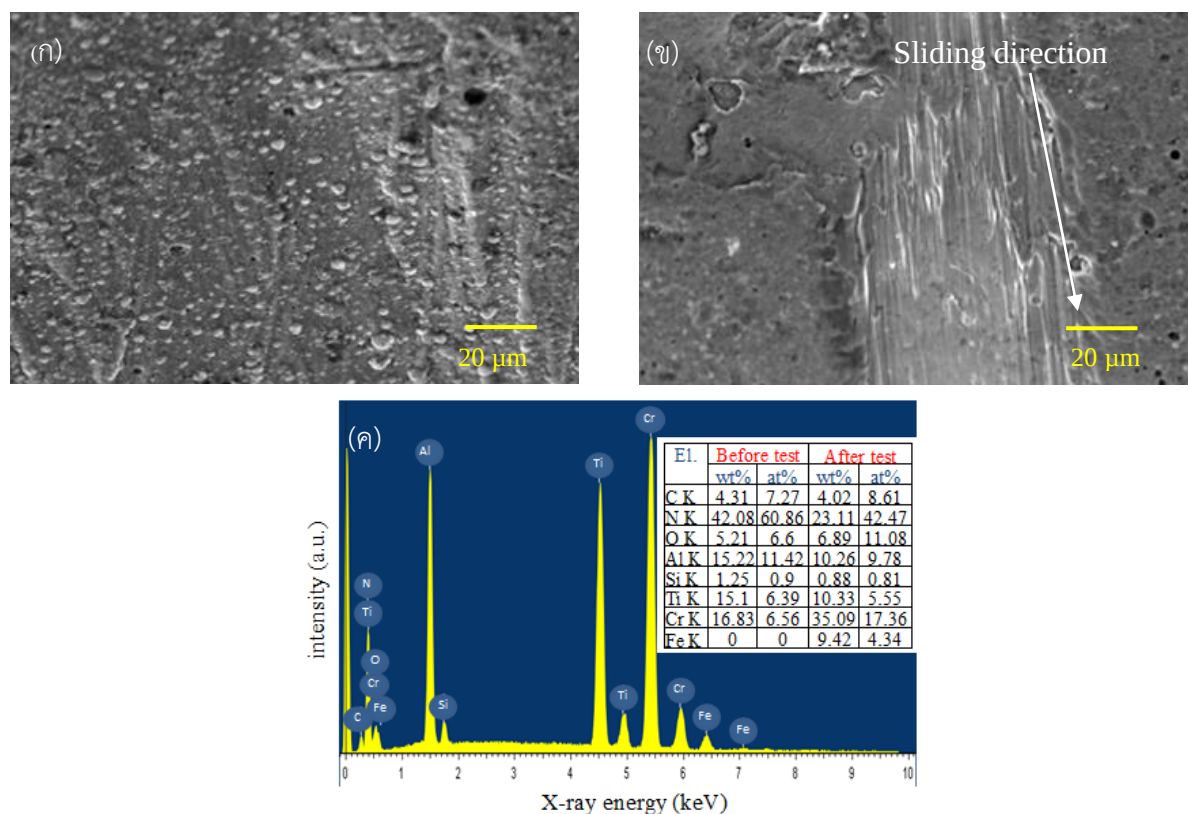
กรณีของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN พบว่าผิวตะขอก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ รูปที่ 4.36(ก) แสดงให้เห็นลักษณะที่คล้ายหยดน้ำของ TiAlSiN ขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วบริเวณ หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นเวลา 840 นาทีพบว่าลักษณะของพื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น รูปที่ 4.36(ข) แสดงให้เห็นรอยสึกหรอที่เกิดจากการสั่นไถลที่เกิดขึ้นตามแนวการเคลื่อนที่ของเส้นใย เมื่อพิจารณาลักษณะของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นพบว่ารอยสึกมีความเรียบสม่ำเสมอไปตามแนวของการเคลื่อนที่ของเส้นใยและมีรอยกดไม่ลึกมาก ลักษณะการสึกหรอดังกล่าวเรียกได้ว่าเป็นการสึกหรอระดับเล็กน้อย (mild wear) (Hirst & Lancaster, 1960) เมื่อพิจารณาข้อมูลค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปพบว่าค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีค่าต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN อยู่มาก รูปที่ 4.36(ค) แสดงองค์ประกอบของผิวด้วย EDX ซึ่งพบว่าผิวเคลือบประกอบด้วย Ti, Al, Si, N ในอัตราส่วน 16.98, 16.23, 1.2 และ 46.57 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่า ก่อนการทดสอบ Ti มีสัดส่วนเท่ากับ Al และ Si มีปริมาณค่อนข้างน้อย ในขณะที่ปริมาณของ O ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าร้อยละ 9.07 และมี C อยู่ในระดับต่ำ (ร้อยละ 7.68) นอกจากนี้ยังมี Cr เป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 2.27) และไม่พบว่ามีองค์ประกอบที่เป็น Fe นั้นหมายความว่าผิวเคลือบมีความหนาเพียงพอที่จะทำให้ไอเลคตรอนจาก EDX ไม่สามารถที่จะทะลุลงไปได้ ส่วนหลังการทดสอบพบว่าสัดส่วนของ Ti, Al, Si และ Ni ลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10-20 แต่พบ Cr และ Fe มากขึ้น เนื่องจากเมื่อผิวเคลือบบางลงทำให้ไอเลคตรอนจาก EDX สามารถที่จะทะลุลงไปถึงชั้นที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อได้ ดังนั้นจึงพบ Fe และ Cr อยู่ในปริมาณที่สูง จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแสดงให้เห็น

เห็นว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความแข็งที่ดีและมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีด้วย



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN (ก) ก่อน (ข) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเมื่อเวลาผ่านไป 840 นาทีและ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

ในกรณีของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiCrAlSiN รูปที่ 4.37 (ก) แสดงลักษณะของผิวก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอซึ่งมีลักษณะคล้ายกับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN และ TiAlSiN หลังจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นเวลา 420 นาที พบว่าพื้นผิวหลุดออกไปตามแนวการเคลื่อนที่ของเส้นใย ซึ่งคล้ายกับการสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN แต่ปริมาณของการหลุดออกไปของผิวมีมากกว่า เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปพบว่าค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.37 (ข) รูปที่ 4.37(ค) แสดงองค์ประกอบของผิวซึ่งพบว่า ก่อนการทดสอบสัดส่วนของ Ti, Cr, Al, Si และ N มีค่าเท่ากับ 6.39, 6.56, 11.42, 0.9 และ 60.86 ตามลำดับ จากสัดส่วนดังกล่าวพบว่า Al มีปริมาณเกือบ 2 เท่าของ Ti และ Cr ในขณะที่ Si มีสัดส่วนที่ต่ำมาก นอกจากนี้ยังมี O และ C เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 6.6 และ 7.27 ตามลำดับ และไม่พบว่ามี Fe เป็นองค์ประกอบแต่อย่างใดแสดงว่าผิวเคลือบมีความหนาเพียงพอ ส่วนหลังการทดสอบพบว่าปริมาณของ Ti, Al, Si และ N มีปริมาณลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 15-25 ในขณะที่ Cr, C, O และ Fe มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบมีการหลุดออกเนื่องจากการกลืนไถของเส้นใยในล่อนเมื่อผิวเคลือบหลุดออกทำให้พบ Cr ที่เป็นองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมากขึ้น



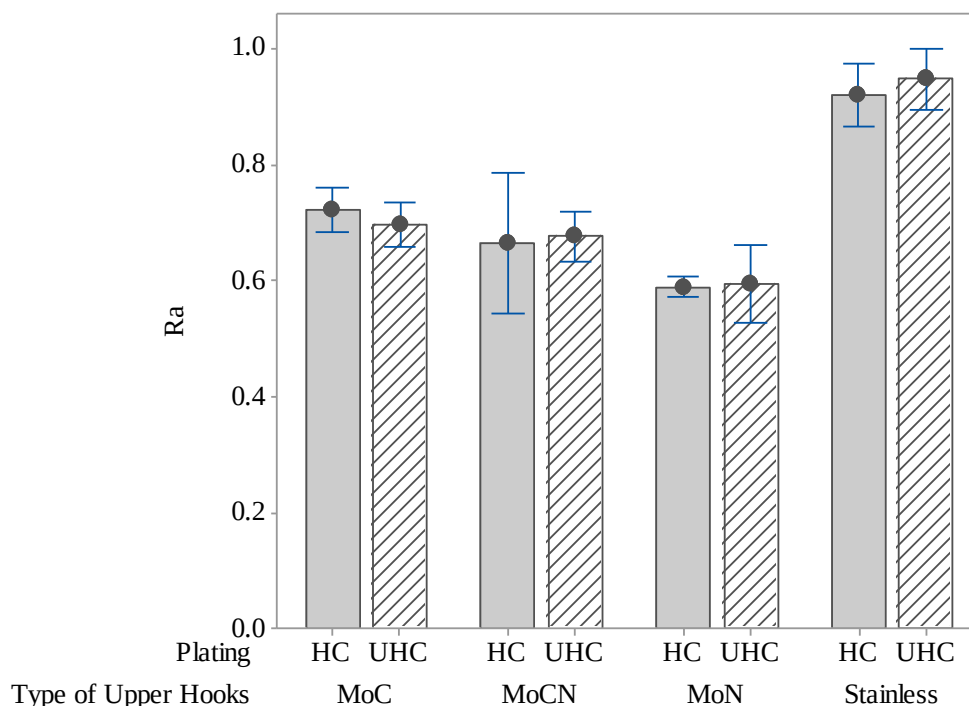
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiCrAlSiN (ก) ก่อน (ข) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอและ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Khanchaiyaphum et al., 2017)

ข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปต่ำที่สุดและสามารถใช้งานได้ยาวนานที่สุด ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จาก SEM/EDX เป็นสิ่งยืนยันได้ว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด โดยลักษณะของการสึกหรอเป็นไปอย่างช้าๆ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมด้วย จากการพิจารณาองค์ประกอบของผิวและลักษณะกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นของตะขอบนที่ผ่านการเคลือบผิวได้แก่ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครม ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN เปรียบเทียบกับตะขอที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวได้แก่ ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อพบว่า กลไกการสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN มีลักษณะการสึกหรอแบบขัดสี (Gwidon & Andrew, 2014) และมีความรุนแรงอยู่ในระดับต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ ในขณะที่ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมมีกลไกการสึกหรอแบบแตกหักร่วมด้วย

4.2.3 การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN

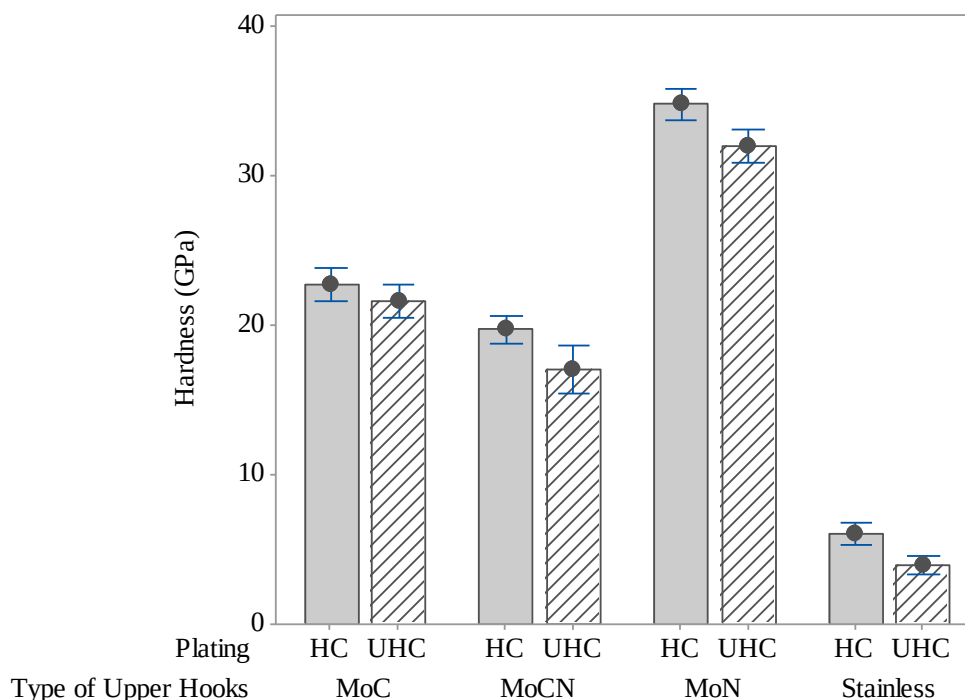
การปรับปรุงตะขอบนด้วยการเคลือบแข็ง MoN, MoC และ MoCN เริ่มต้นด้วยการศึกษาความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ของตะขอ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.38 ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) มีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยมากกว่า

กลุ่มตะขอที่มีผ่านการเคลือบแข็งอย่างชัดเจน กลุ่มตะขอที่เคลือบผิวด้วย MoN มีค่าความเรียบผิวดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตะขอรูปแบบอื่นๆ โดยมีการเรียงอันดับรองลงมาเป็นกลุ่มตะขอเคลือบผิว MoCN, กลุ่มตะขอเคลือบผิว MoC



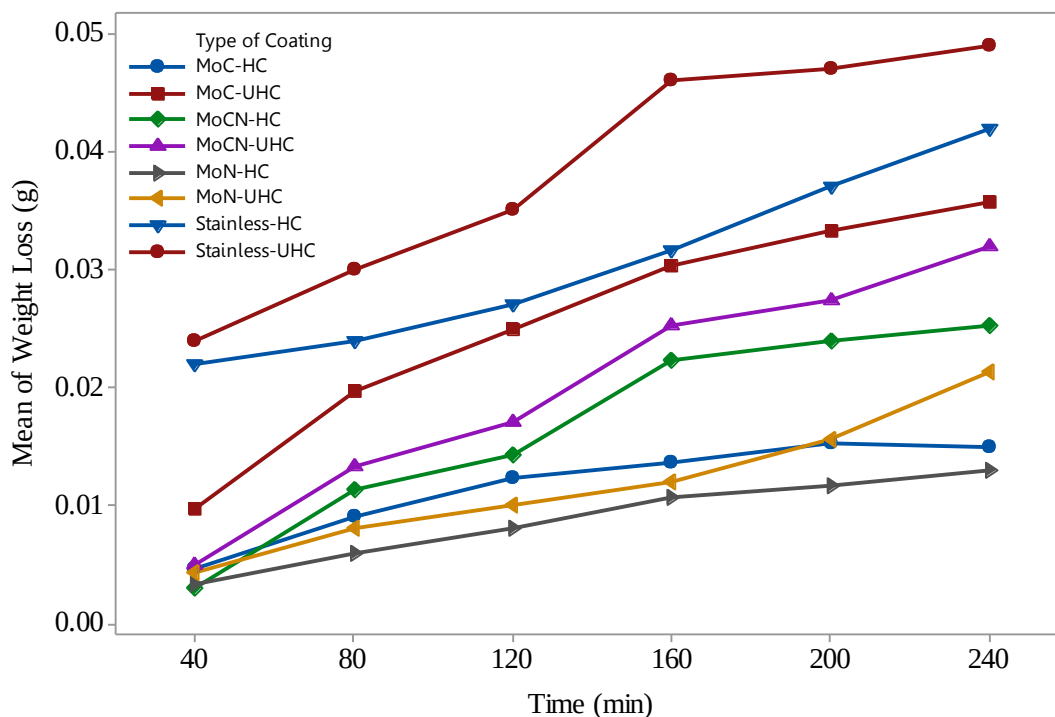
รูปที่ 4.38 ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของตะขอที่ผ่านการเคลือบด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทั้งตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (Srisattayakul et al., 2017)

รูปที่ 4.39 แสดงความแข็งของตะขอที่ผ่านการเคลือบด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทั้งตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม จากรูปพบว่า ค่าความแข็งของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยน้อยกว่ากลุ่มตะขอที่มีผ่านการเคลือบแข็งอย่างชัดเจน ในขณะที่ ค่าความแข็งของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) อีกทั้งผ่านการเคลือบด้วย MoN มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มตะขออื่นๆ อย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Danroc et al. (1987) ที่กล่าวว่าวัสดุที่เคลือบด้วย MoC และ MoN มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 30000 MPa และ 35000 MPa ตามลำดับและมีความสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุที่ชุบฮาร์ดโครม

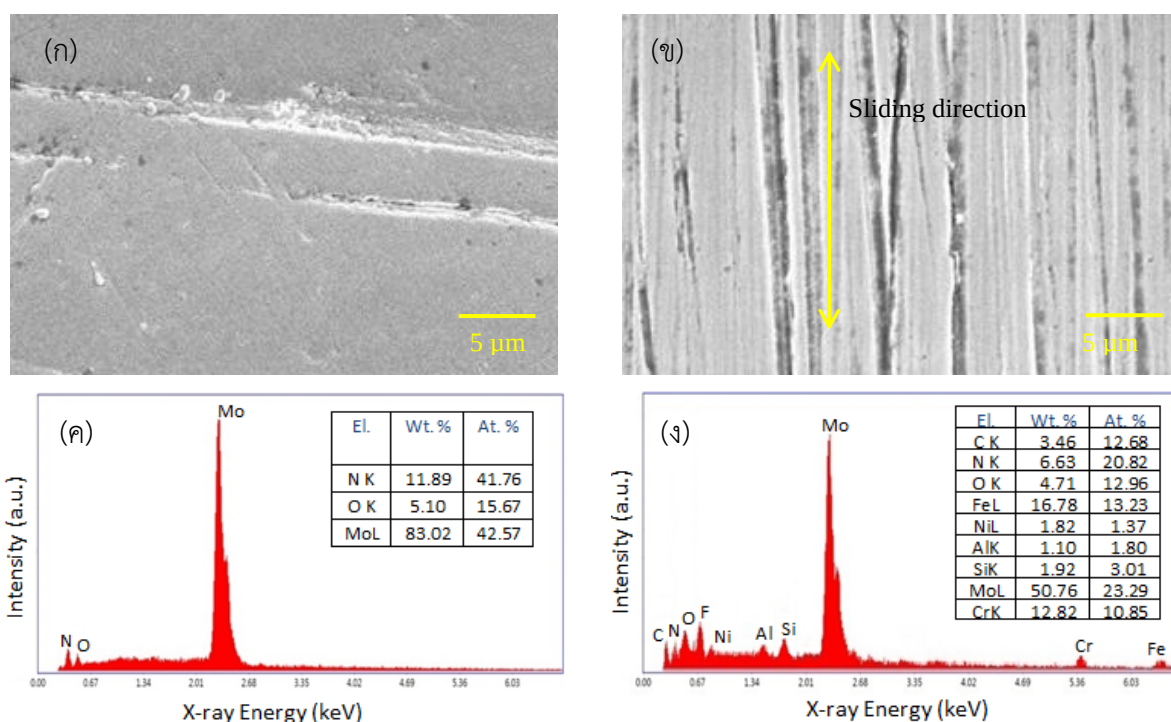


รูปที่ 4.39 ความแข็งของตะขอที่ผ่านการเคลือบด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทับตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (Srisattayakul et al., 2017)

รูปที่ 4.40 แสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอที่ผ่านการเคลือบด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทับตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมซึ่งผ่านการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะเวลา 240 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบความสึกหรอจะเห็นว่า ค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอทุกประเภทมีแนวโน้มสูงขึ้นในทิศทางเดียวกัน ตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) มีค่าน้ำหนักที่หายไปสูงมากอย่างชัดเจน ในขณะที่ตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และผ่านการเคลือบด้วย MoN มีค่าน้ำหนักที่หายไปน้อยมากอย่างชัดเจน โดยที่ค่าน้ำหนักที่หายไปของตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) มีค่าลดลงประมาณ 83%, 74% และ 75% เมื่อเปรียบเทียบกับตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และผ่านการเคลือบด้วย MoN โดยที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ 80, 160 และ 240 นาที ตามลำดับ ผลการศึกษาค่าน้ำหนักที่หายไปยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Qian et al. (2005) ที่กล่าวว่า ค่าน้ำหนักที่หายไปจากการเกิดการสึกหรอแบบขัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการทดสอบการสึกหรอผ่านไป

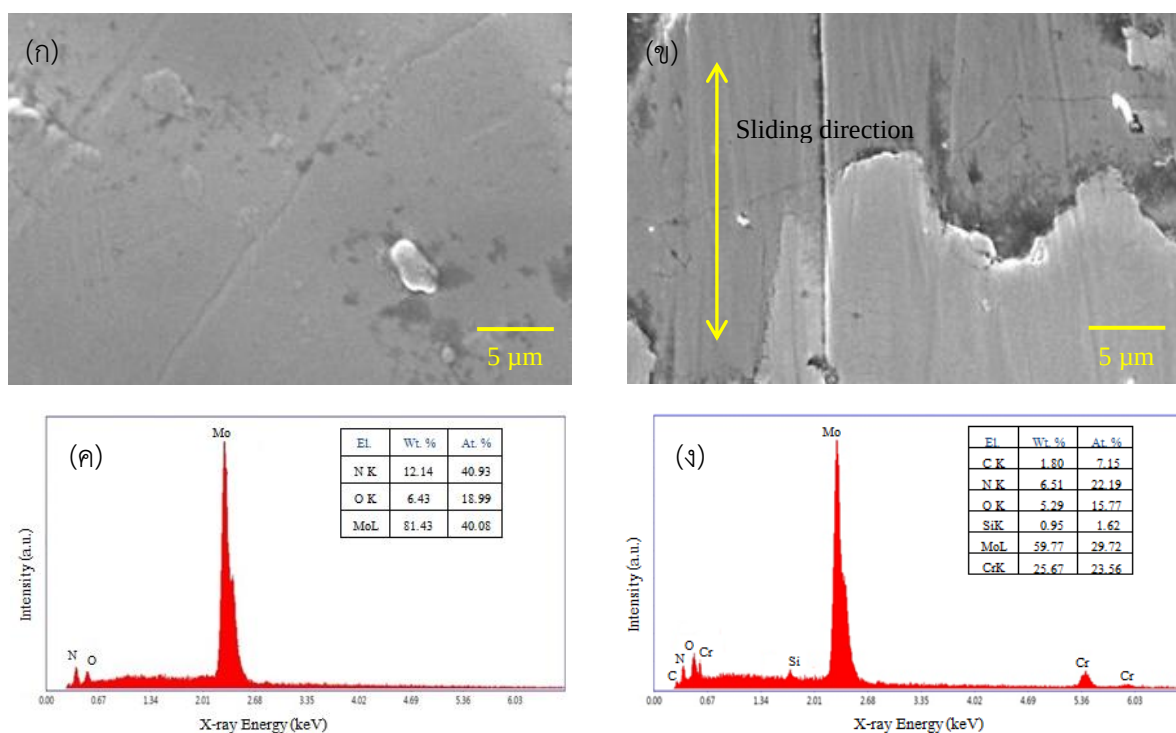


รูปที่ 4.40 คำนวณน้ำหนักที่หายไปของตะขอที่ผ่านการเคลือบด้วย MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทั้งตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (Srisattayakul et al., 2017)



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM (ก) ก่อนการทดสอบการสึกหรอ (ข) หลังการทดสอบการสึกหรอ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและ (ง) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของตะขอที่ไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) และผ่านการเคลือบด้วย MoN (Srisattayakul et al., 2017)

รูปที่ 4.41 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอของตะขอที่ไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) แต่ผ่านการเคลือบด้วย MoN จากรูป จะเห็นได้ว่าตะขอมีผิวค่อนข้างเรียบ ไม่มีหลุมขนาดใหญ่ มีเพียงรอยเว้าตื้นๆ บางส่วนเท่านั้น เมื่อนำมาผ่านการทดสอบการสึกหรอในสภาวะแบบแห้ง ณ ช่วงเวลา 240 นาทีแล้ว ผิวบางส่วนเกิดการสึกหรอเป็นรอยขีดข่วนตามทิศทางการเลื่อนไถลซึ่งเป็นการยืนยันว่าตะขอนี้เกิดการสึกหรอแบบขัดสีต่ำที่สุด Hazar (2010) กล่าวว่า โครงสร้างผิวเคลือบ MoN ช่วยสร้างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ ซึ่งลักษณะนี้สอดคล้องกันกับค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นรวมถึงค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยที่ต่ำ การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนการทดสอบการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบเป็นโครงสร้าง MoN เนื่องจากมีปริมาณโมลิบดีนัม (Mo) กับไนโตรเจน (N) ค่อนข้างสูงและมีออกซิเจน (O) เพียงเล็กน้อย ภายหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอแล้วพบว่าปริมาณ Mo กับ N ลดลงประมาณ 50% ในขณะที่ธาตุที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมและ SiC ของหัวกด ได้แก่ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) ซิลิกอน (Si) และคาร์บอน (C) ปรากฏขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผิวเคลือบ MoN บางส่วนหลุดออกจากผิวเคลือบและมีธาตุเป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมและ SiC ของหัวกดเข้ามาเกาะติดที่ผิวแทน



รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM (ก) ก่อนการทดสอบการสึกหรอ (ข) หลังการทดสอบการสึกหรอ (ค) การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและ (ง) หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของตะขอที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) และผ่านการเคลือบด้วย MoN (Srisattayakul et al., 2017)

รูปที่ 4.42 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอของตะขอที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (UHC) และผ่านการเคลือบด้วย MoN จากรูป จะเห็นได้ว่าตะขอมีผิวเรียบมากกว่าตะขอไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) แต่ผ่านการเคลือบด้วย MoN นอกจากนี้ยังพบว่ามีหลุมและรอยตำหนิอื่นๆ น้อยกว่าด้วย ภายหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอแล้วจะเห็นว่า ผิวเกิดการสึกหรอเป็นรอยขีดข่วนตามทิศทางการเลื่อนไถลเพียงเล็กน้อย แต่มีผิวบางพื้นที่เกิดรอยแตกร้าว สิ่งนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่า ผิวเคลือบ MoN บนชิ้นผิวชุบฮาร์ดโครมจะมีกลไกการสึกหรอแบบกระจายตัว (fragmentation)

wear) อย่างไรก็ตาม ปริมาณการสึกหรอเป็นรอยขีดและรอยแตกที่เพิ่มขึ้นก็น้อยกว่าตะขอไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม (HC) แต่ผ่านการเคลือบด้วย MoN สิ่งนี้ยังสามารถอธิบายได้ว่าผลจากการรวมผิวเคลือบ MoN กับการชุบฮาร์ดโครมถือว่าการปรับปรุงสมบัติด้านความสามารถในความต้านทานการสึกหรอได้ การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ก่อนการทดสอบการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของส่วนผสม Mo, N และ O โดยปราศจากธาตุที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ผลิตตะขอ ซึ่งช่วยยืนยันอีกว่าชั้นผิวเคลือบ MoN มีความหนามาก ภายหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอดังแสดงพบว่า ปริมาณ Mo กับ N ลดลงประมาณ 25% ในขณะที่ธาตุ Cr, Si และ C ปรากฏขึ้นมา ซึ่งเป็นธาตุโดยพื้นฐานของผิวชุบฮาร์ดโครมอยู่แล้ว โดยปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า ผิวเคลือบ MoN บางส่วนหลุดออกจากผิวเคลือบเพียงเล็กน้อย และมีธาตุที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมและ SiC ของหัวกดเข้ามาเกาะติดที่ผิวแทน ดังนั้น ตะขอที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบด้วย MoN จึงถือว่าดีที่สุดในด้านความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ นอกจากนี้แล้วยังมีผลต่อสมบัติด้านค่าความแข็งสูงที่สุดและมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยที่สุด

4.2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการปรับปรุงตะขอบน

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับตะขอบนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN

- การวิเคราะห์เกี่ยวกับต้นทุน

ตะขอบนที่ใช้สำหรับเครื่องทอวนในกระบวนการผลิตอวนชนิดโมโนฟิลาเมนต์มีอายุการใช้งานโดยเฉลี่ย 2 ปี เครื่องทอวนมีตะขอบนโดยเฉลี่ย 600 ชิ้น จำนวนตะขอขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องและขนาดของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย 0.12 มิลลิเมตร จำนวนเครื่องทอวนมีทั้งหมด 1,000 เครื่อง ความเร็วรอบในการทำงานของเครื่องทอวนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที เวลาทำงานของแต่ละเครื่องเท่ากับ 20 ชั่วโมงต่อวัน

โรงงานมีต้นทุนในการผลิตตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ 80 บาทต่อชิ้น ดังนั้น ต้นทุนของตะขอบนเท่ากับ 80 บาทต่อชิ้น $\times$ 600 ชิ้นต่อเครื่อง $\times$ 1000 เครื่อง = 48,000,000 บาทต่อ 2 ปี หรือ 24,000,000 บาทต่อปี

บริษัทที่เคลือบแข็งมีต้นทุนการเคลือบผิวตะขอบนด้วย TiAlSiN เท่ากับ 60 บาทต่อชิ้น และต้นทุนตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อเท่ากับ 60 บาทต่อชิ้น ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาร์บอนมีค่าเท่ากับ 120 บาทต่อชิ้นและมีอายุการใช้งาน 5.6 ปี ดังนั้น ต้นทุนของตะขอบนเท่ากับ 120 บาทต่อชิ้น $\times$ 600 ชิ้นต่อเครื่อง $\times$ 1,000 เครื่อง = 72,000,000 บาทต่อ 5.6 ปี หรือ 12,857,143 บาทต่อปี

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตตะขอบนระหว่างตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN กับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่บริษัทกรณีศึกษาใช้งานอยู่ในปัจจุบันพบว่า ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมคิดเป็น 11,142,857 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 46%

- การวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลาในการเปลี่ยนตะขอบน

การเปลี่ยนตะขอใหม่ทั้งหมดสำหรับเครื่องทอวน 1 เครื่องใช้เวลาในการเปลี่ยนโดยเฉลี่ยประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้น เวลาในการเปลี่ยนตะขอทั้งหมดเท่ากับ 2 ชั่วโมง $\times$ 1000 เครื่อง = 2000 ชั่วโมง หรือ 250 วัน (1

วัน ทำงาน 8 ชั่วโมง) ในการเปลี่ยนตะขอใช้พนักงานจำนวน 3 คน ค่าแรงงานในการเปลี่ยนตะขอเท่ากับ 3 คน $\times$ 300 บาทต่อวัน $\times$ 250 วัน = 225,000 บาท

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลาในการเปลี่ยนตะขอระหว่างตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN กับตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่บริษัท ภูมิศึกษาใช้งานอยู่ในปัจจุบันพบว่า เวลาในการเปลี่ยนตะขอสำหรับเครื่องทอวน 1000 เครื่องใช้เวลา 250 วัน และมีค่าแรงงานในการเปลี่ยนตะขอ 225,000 บาท โรงงานมีค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลาในการเปลี่ยนตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมในทุกๆ 2 ปี ส่วนตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลาในการเปลี่ยนตะขอนี้ในทุกๆ 5.6 ปี

- การวิเคราะห์เกี่ยวกับปริมาณการสูญเสีย

ปริมาณการผลิตอวนชนิดโมโนฟิลาเมนต์เท่ากับ 60 ผืนต่อเครื่องต่อวัน ปริมาณการผลิตทั้งหมดเท่ากับ 60 ผืนต่อเครื่องต่อวันภายในเวลาทำงาน 20 ชั่วโมงต่อวัน นั่นคือ ปริมาณการผลิตเท่ากับ 3 ผืนต่อเครื่องต่อชั่วโมง ปริมาณการสูญเสียในการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนตะขอเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเท่ากับ 6 ผืนต่อเครื่อง

ราคาขายอวนเท่ากับ 100 บาทต่อผืน ปริมาณการสูญเสียในการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ 100 บาทต่อผืน $\times$ 6 ผืนต่อเครื่อง $\times$ 1000 เครื่อง = 600,000 บาทต่อ 2 ปี หรือคิดเป็นปริมาณการสูญเสีย 300,000 บาทต่อปี ในส่วนตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีปริมาณการสูญเสีย 600,000 บาทต่อ 5.6 ปี หรือคิดเป็น 107,143 บาทต่อปี นั่นคือ ตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีปริมาณการสูญเสียน้อยกว่า ตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ $300,000 - 107,143 = 192,857$ บาทต่อปี หรือคิดเป็น 180%

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับตะขอบนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN

- การวิเคราะห์เกี่ยวกับต้นทุน

ถ้าพิจารณาอายุการใช้งานในอดีตที่ผ่านมาพบว่า ตะขอมีน้ำหนักที่หายไปโดยเฉลี่ย 0.05 กรัม เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทอวนใยสังเคราะห์ยี่ห้อ TANIMURA ในการทอผลิตภัณฑ์อวนโมโนฟิลาเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย 0.15 มิลลิเมตร กับสภาพการทำงานจริงในปัจจุบันเป็นระยะเวลา 2 เดือน จะเห็นได้ว่า ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมมีน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.0034 กรัม/2 เดือนหรือประมาณ 0.0408 กรัม/24 เดือน และตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาร์บอนมีน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.0016 g/2 เดือนหรือประมาณ 0.0192 กรัม/24 เดือน ดังนั้น ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาร์บอนมีอายุการใช้งานมากกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมอยู่ 0.0408 กรัม / 0.0192 กรัม เท่ากับ 2.125 เท่า หรือ 47.06% โดยประมาณ

เป็นที่ทราบว่าโรงงานมีต้นทุนในการผลิตตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเท่ากับ 80 บาทต่อชิ้น นั่นคือ ต้นทุนของตะขอบนที่ใช้ในโรงงานปัจจุบันเท่ากับ 80 บาทต่อชิ้น $\times$ 600 ชิ้นต่อเครื่อง $\times$ 1000 เครื่อง = 48,000,000 บาทต่อ 2 ปี หรือ 24,000,000 บาทต่อปี

บริษัทที่เคลือบแข็งมีต้นทุนการเคลือบผิวตะขอบนด้วย MoN เท่ากับ 120 บาทต่อชิ้น และต้นทุนตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อเท่ากับ 60 บาทต่อชิ้น ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN โดยกระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาโรติกมีค่าเท่ากับ 180 บาทต่อชิ้น และมีอายุการใช้งานเท่ากับ $2.125 \times 2 = 4.25$ ปี ดังนั้น ต้นทุนของตะขอบนเท่ากับ 180 บาทต่อชิ้น $\times$ 600 ชิ้นต่อเครื่อง $\times$ 1,000 เครื่อง = 108,000,000 บาทต่อ 4.25 ปี หรือ 25,411,765 บาทต่อปี

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตตะขอบนระหว่างตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN กับตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมที่บริษัทกรณีศึกษาใช้งานอยู่ในปัจจุบันพบว่า ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมคิดเป็น 1,411,764 บาทต่อปี

บทที่ 5 บทสรุป

โรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาผิวตะขงของเครื่องทอวนที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตะขงและ เป็นผลให้เกิดของเสียจากการผลิตทอวนที่เกิดจากรอยชุบบนเส้นใยทอวนที่มีสาเหตุจากการสึกหรอของตะขง โดยการสึกหรอเกิดจากการสัมผัสระหว่างเส้นใยทอวนและผิวของตะขง งานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุง คุณภาพของตะขงทอวนทั้งสองแบบคือ ตะขงบนและตะขงล่าง โดยที่ตะขงล่างทำจากลวดเหล็กสปริงและผ่าน กระบวนการชุบฮาร์ดโครมในขณะที่ตะขงบนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านกระบวนการชุบฮาร์ดโครมด้วยเช่นกัน การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองใช้เป็นแนวทางการ หาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการเตรียมชิ้นงานก่อนชุบฮาร์ดโครมและในการชุบฮาร์ดโครมที่มีผลกระทบต่อ ค่าความแข็งและการสึกหรอของตะขงล่างโดยทดสอบการสึกหรอบนเครื่องทอวนจริง ปัจจัยที่เกี่ยวกับการ เตรียมชิ้นงานก่อนชุบฮาร์ดโครมและในการชุบฮาร์ดโครมคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป การขัดผิวตะขงและเวลาใน การชุบฮาร์ดโครม ผลการศึกษาพบว่า

- ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติยืนยันว่าความแข็งของตะขงล่างสูงขึ้นเมื่อขึ้นงานผ่านการขัดผิวที่ดีขึ้นด้วย
- สถานะของระดับปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขงล่างดีขึ้น คือทำการ ขึ้นรูปตะขงล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C โดยทำการขัดผิวตะขงล่างด้วยใยขัดและขัดมันและทำการชุบ ฮาร์ดโครมในเวลา 40 นาที
- ถ้าพิจารณาในแง่เศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมแล้ว การขึ้นรูปตะขงล่างที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C กระทำได้ ง่าย และเวลาที่ใช้ชุบฮาร์ดโครมก็เป็นระยะเวลาที่ไม่ยาวนานซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพของคนงานด้วย
- อายุการใช้งานตะขงล่างเพิ่มขึ้น 83.89% เมื่อใช้ตะขงที่ปรับปรุงกระบวนการผลิตตามผลการวิจัยนี้
- บริษัทกรณีศึกษาสามารถประหยัดเงินลงทุนผลิตตะขงล่างได้ 2,664,918 บาทต่อปี เมื่อใช้ตะขงที่ ปรับปรุงกระบวนการผลิตตามผลการวิจัยนี้ โดยที่มีระยะเวลาในการคืนทุนไม่ถึง 4 วัน ถ้าบริษัทตัดสินใจ ซื้อเครื่องขัดตะขงก่อนทำการชุบฮาร์ดโครม

การปรับปรุงคุณภาพของตะขงบนด้วยการเคลือบ TiN โดยใช้วิธีดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบฐานรองชิ้นงาน ลาดเอียงโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองที่ใช้เป็นแนว ทางการหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของตะขงบนด้วยการเคลือบ TiN คือ กระแสไฟฟ้า ความดัน และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน โดยที่มีผลตอบสนองคือ ค่า ความแข็ง ค่าน้ำหนักที่หายไปหลังจากทำการทดสอบการสึกหรอแล้ว ผลการศึกษาพบว่า

- ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติยืนยันว่าที่สถานะจุดกึ่งกลางของปัจจัยกระแสไฟฟ้า (0.35 A) ความดัน (70 Pa) และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน (1.0) ให้ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่ที่ สถานะจุดกึ่งกลางของปัจจัยกระแสไฟฟ้า ความดัน และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน ไม่ได้ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอโดยเฉลี่ยสูงสุด
- ที่สถานะของปัจจัยกระแสไฟฟ้า 0.35 A ความดัน 50 Pa และอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและ ไนโตรเจน 1.5 ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอในระดับที่พึงพอใจตามผลการวิเคราะห์ ความแปรปรวน ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยค่าความพึงพอใจ ผลการ วิเคราะห์ด้วยเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน และผลการวิเคราะห์การ แพร่กระจายความคลาดเคลื่อน โดยที่ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า 5% และ 57% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทั้งสองที่สถานะจุดกึ่งกลางของปัจจัย

- ลักษณะของการสึกหรอของผิวเคลือบมีกลไกการสึกหรอที่เกิดจากการยึดติด และการแตกหัก โดยไม่ปรากฏร่องรอยที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบขัดสี ซึ่งอาจเนื่องมาจากอนุภาคผิวเคลือบที่เป็น TiN มีความแข็งแรงกว่าพื้นผิวที่เป็นฮาร์ดโครม

การปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนด้วยการเคลือบ TiAlSiN และ TiCrAlSiN โดยใช้กระบวนการอาร์คในระบบสุญญากาศแบบฟิลเตอร์คาร์บิก การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของตะขอบนที่เคลือบด้วย TiAlSiN และ TiCrAlSiN ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM ที่มุ่งเน้นให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงของเครื่องทอวนซึ่งผ่านการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะเวลา 840 นาที่ งานวิจัยนี้ประยุกต์การวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณโดยใช้วิธี least significant difference ของข้อมูลค่าความแข็ง ค่าความหยาบผิวและค่าน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบการสึกหรอของตะขอบน ผลการศึกษาพบว่า

- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีความแข็งแรงสูงกว่าตะขอบนรูปแบบอื่นๆ ด้วยซึ่งชี้ให้เห็นว่า ค่าความแข็งมีผลต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอบน
- เมื่อค่าความแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอของตะขอสุงมากขึ้นตามไปด้วย
- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีค่าความหยาบผิวอยู่ในระดับกลางเมื่อเปรียบเทียบกับตะขอบนรูปแบบอื่นๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวมีผลต่อความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอบน
- ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN ดีกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN อยู่มาก
- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตะขอบนรูปแบบอื่นๆ
- กลไกการสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN, TiAlSiN และ TiCrAlSiN มีลักษณะการสึกหรอแบบขัดสีและมีความรุนแรงอยู่ในระดับต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ ในขณะที่ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมมีกลไกการสึกหรอแบบแตกหักร่วมด้วย
- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมคิดเป็น 46% เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตะขอบนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN เป็นระยะเวลา 5.6 ปี ในขณะที่อายุการใช้งานของตะขอบนที่โรงงานกรณีศึกษาใช้อยู่คือ 2 ปี

การปรับปรุงคุณภาพของตะขอบนด้วยการเคลือบ MoC, MoCN, MoN โดยเคลือบทั้งตะขอที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม โดยใช้วิธีการ ดี.ซี.แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง การทดสอบการสึกหรอใช้เครื่องทดสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM G133-05 ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ไป-กลับของตะขอและมีหัวกดวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ขนาดความหยาบ 1000 grit โดยออกแรงกด 5 นิวตัน ในแนวตั้งลงบนตะขอที่วางอยู่ในแนวแกนนอน ซึ่งผ่านการทดสอบการสึกหรอเป็นระยะเวลา 240 นาที่ ผลการศึกษาพบว่า

- ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มตะขอที่มีผ่านการเคลือบแข็งอย่างชัดเจน
- กลุ่มตะขอที่เคลือบผิวด้วย MoN มีค่าความเรียบผิวดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตะขอรูปแบบอื่นๆ

- ค่าความแข็งของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครมและไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยน้อยกว่ากลุ่มตะขอที่มีผ่านการเคลือบ MoC, MoCN, MoN อย่างชัดเจน
- ค่าความแข็งของกลุ่มตะขอที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วผ่านการชุบฮาร์ดโครม และไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมอีกทั้งผ่านการเคลือบด้วย MoN มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มตะขออื่นๆ อย่างชัดเจน
- ตะขอที่ชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบด้วย MoN มีอายุการใช้งานและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า
- ตะขอที่ชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบด้วย MoN มีลักษณะการสึกหรอเป็นรอยขีดข่วนและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นน้อยกว่าตะขอไม่ผ่านการชุบฮาร์ดโครมแต่ผ่านการเคลือบด้วย MoN
- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN มีอายุการใช้งานมากกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครม 47% โดยประมาณ
- ตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อผ่านการชุบฮาร์ดโครมเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย MoN เป็นระยะเวลา 4.25 ปีในขณะที่อายุการใช้งานของตะขอบนที่โรงงานกรณีศึกษาใช้อยู่คือ 2 ปี

การปรับปรุงคุณภาพของผิวตะขอล่างและตะขอบนเป็นแนวทางหนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมผลิตแหวน

5.1 ข้อจำกัดในงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพผิวตะขอทอวนทั้งสองแบบ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอที่ต้องใช้เวลานานและเกิดความขัดข้องบ่อยครั้งในขณะทำการทดสอบ การขัดข้องของเครื่องทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอเกิดขึ้นบ่อยครั้งมากอีกทั้งยังต้องใช้เวลาปรับเปลี่ยนและซ่อมบำรุงเป็นเวลานาน และการทดสอบใช้เวลานานมาก ผู้วิจัยปรารถนาให้ผลการศึกษาศักยภาพความสามารถในความต้านทานการสึกหรอเป็นไปด้วยความเรียบร้อย มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการศึกษาไปอ้างอิงให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมทอวนหรือใกล้เคียง อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบอาจนำมาเปรียบเทียบกับได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ในการศึกษาเพิ่มเติมอาจจะทำได้ดังนี้

- ต้องเตรียมตะขอทอวนที่ผ่านกระบวนการเคลือบในระบบเดียวกันเพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากความแตกต่างของตะขอที่มาจากแหล่งการเคลือบที่ต่างกัน
- ต้องทดสอบตะขอทอวนในเครื่องทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอที่ผ่านการรับรองมาตรฐานและต้องทดสอบบนเครื่องเดียวกันเท่านั้น
- ระยะเวลาในการทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอควรใช้ระยะเวลาเดียวกันเพื่อให้เกิดความง่ายในการเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรมและเชิงเศรษฐศาสตร์
- ผู้ที่ทำการทดสอบควรเป็นคนเดียวกันตลอดการทดสอบ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- ทดสอบความสามารถในความต้านทานการสึกหรอของตะขอบนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและผ่านการเคลือบผิวด้วย TiAlSiN และตะขอบนที่ชุบฮาร์ดโครมและผ่านการเคลือบด้วย MoN โดยทำการ

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ได้มาตรฐานหรือจะทดสอบบนเครื่องจริงก็ได้โดยใช้ระยะทดสอบตามความเหมาะสม โดยมีตะขอนที่โรงงานกรณีศึกษาใช้เป็นตัวควบคุม

- พยายามออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมความตึงเส้นใยในล่อนให้อยู่ในระดับที่คงที่หรือมีความผันแปรความตึงของเส้นใยในล่อนน้อยที่สุด
- เลือกใช้วัสดุเคลือบอื่นๆ เพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกัน

เอกสารอ้างอิง

1. ชาญณรงค์ สายแก้ว (2557). *สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม*. ขอนแก่น : หน่วยงานวิจัย งานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
2. ปณิตดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ. (2547). *การลึกรอในงานอุตสาหกรรม : ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน* กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
3. Aggarwal A., Singh H., Kumar P., and Singh M. (2008). Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function, *Journal of Materials Processing Technology* 205, 42-50.
4. Anderson M.J. and Whitcomb P.J. (2005). *RSM Simplified: Optimizing Process Using Response Surface Methods for Design of Experiments*, Productivity Press, New York, pp. 197-258.
5. Bahri A., Guermazi N., Elleuch K., and Urgan M. (2015). Tribological performance of TiN coatings deposited on 304L stainless steel used for olive-oil extraction, *Wear* 342-343, 77-84.
6. Bayramoglu M., Onat B., and Geren N. (2008). Statistical optimization of process parameters to obtain maximum thickness and brightness in chromium plating, *Journal of Materials Processing Technology* 203(1), 277-286.
7. Box G.E.P. and Wilson K.B. (1951). On the experimental attainment of optimal conditions, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 13, 1-45.
8. Çalışkan H, Kurbanoglu C, Panian P, Cekada M., and Kramar D. (2013). Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling, *Tribology International* 62, 215-222.
9. Cetinkaya C. (2006). An investigation of the wear behaviours of white cast irons under different compositions, *Materials and Design* 27, 437-445.
10. Chatterjee S., Chandrashekar S., and Sudarshan T.S. (1992). Deposition processes and metal cutting applications of TiN coatings, *Journal of Materials Science* 27, 3409-3423.
11. Chen T., Xie Z.W., Gong F., Luo Z.Z., and Yang Z. (2014). Correlation between microstructure evolution and high temperature properties of TiAlSiN hard coatings with different Si and Al content, *Applied Surface Science* 314, 735-745.
12. Chi-Lung C., Jyh-Wei L., and Ming-Don T. (2009). Microstructure corrosion and tribological behaviors of TiAlSiN coatings deposited by cathodic arc plasma deposition, *Thin Solid Films* 517, 5231-5236.
13. Costa M.Y.P., Cioffi M.O.H., Voorwald H.J.C., and Guimaraes V.A. (2010). An Investigation on sliding wear behavior of PVD coatings, *Tribology International* 43, 2196-2202.
14. Danroc J., Aubert A., and Gillet R. (1987). Hard molybdenum coatings prepared by cathodic magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 153, 281-286.
15. Deng B., Tao Y., Wang Y., and Liu P. (2013). Study of the microstructure and tribological properties of Mo + C-implanted TiN coatings on cemented carbide substrates, *Surface and Coatings Technology* 228, 597-600.

- 16.Deringer G. and Suich R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology* 12, 214-219.
- 17.Faga M.G., Gautier G., Calzavarini R., Perucca M., Boot E.A., Cartasegna F., and Settineri L. (2007). AlSiTiN nanocomposite coatings developed via arc cathodic PVD: evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations, *Wear* 263, 1306-131.
- 18.Ferrer C., Pascual M., Busquets D., and Rayon E. (2010). Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique, *Wear* 268, 784-789
- 19.Gerth J. and Wiklund U. (2008). The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel, *Wear* 264(9-10), 885-892.
- 20.Guicciardi S., Melandri C., Lucchini F., and Portu G.D. (2002). On data dispersion in pin-on-disk wear tests, *Wear* 252, 1001–1006.
- 21.Gwidon S. and Andrew B. (2014). *Engineering Tribology*, Fourth ed., Butterworth-Heinemann, Waltham, U.S.A.
- 22.Hazar H. (2010). Characterization of MoN coatings for pistons in a diesel engine, *Materials and Design* 31, 624-627.
- 23.Hanafi I., Khamlichi A., Cabrera F.M., Almansa E., and Jabbouri A. (2012). Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools, *Journal of Cleaner Production* 33, 1-9.
- 24.He N., Li H., Ji L., Liu H., Zhou J., and Chen J. (2016). Hightemperature tribological properties of TiAlSiN coatings produced by hybrid PVD technology, *Tribology International* 98, 133–143.
- 25.Hirst W. and Lancaster J.K. (1960). Proceedings of the royal society of London Series A, *Mathematical and Physical Sciences* 259, 1297, 228 – 241.
- 26.Intanon N. and Saikaew C. (2016). Effect of surface treatments on wear resistance of spring steel wire as a work-piece material of a fishing net-weaving machine component, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 23, 79-87.
- 27.Kalin M., Jahanmir S., and Ives L.K. (2002). Effect of counterface roughness on abrasive wear of hydroxyapatite, *Wear* 252, 679-685.
- 28.Kellermann K., Ehrhardt S., Fandrey J., Rosiwal S.M., and Singer R.F. (2010). Influence of surface roughness on the tribological properties of HF-CVD diamond coated heat- treatable steel, *Wear* 269, 811–815.
- 29.Khanchaiyaphum S., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Surinphong S. (2017). Wear behaviours of filtered cathodic arc deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings on AISI 316 stainless steel fishing net-weaving machine components under dry soft-sliding against nylon fibres, *Wear* 390-391, 146-154.
- 30.Krajnik P., Kopac J., and Sluka A. (2005). Design of grinding factors based on response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163, 629-636.
- 31.Lee J.W. (2005). Microstructures and mechanical properties evaluation of hard chromized austenitic Fe–Mn–Al alloys, *Applied Surface Science* 244 248-251.

32. Lin N., Xie F., Yang H., Tien W., and Wang H. (2012). Assessments on friction and wear behaviors of P110 steel and chromizing coating sliding against two counterparts under dry and wet conditions, *Applied Surface Science* 258, 4960-4970.
33. Liu Q., Liu T., Fang Q.F., Liang F.J., and Wang J.X. (2006). Preparation and characterization of nanocrystalline composites Mo–C–N hard films, *Thin Solid Films* 503, 79-84.
34. Makridakis S., Wheelwright S.C., and McGee V.E. (1983). *Forecasting: Methods and Applications*, 2nd ed. John Wiley, New York.
35. Martin P.J., Bendavid A., Netterfield R.P., Kinder T.J., Jahan F., and Smith G. (1999). Plasma deposition of tribological and optical thin film materials with a filtered cathodic arc source, *Surface and Coatings Technology* 112, 257-260.
36. Martinho R.P., Andrade M.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R.J.D., and Baptist A.P.M. (2009). Micro-abrasion wear behaviour of TiCrAlSiN nanostructured coatings, *Wear* 267, 1160–1165.
37. Mondal D.P., Das S., and Rajput V. (2005). Effect of zinc concentration and experimental parameters on high stress abrasive wear behaviour of Al–Zn alloys: A factorial design approach, *Materials Science and Engineering A* 406, 24-33.
38. Montgomery D.C. (1999). Experimental design for product and process design and development, *Journal of the Royal Statistical Society D* 48, Part2, 159-177.
39. Montgomery D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*, 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.
40. Myers R.H. and Montgomery D.C. (2002). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
41. Nelder J.A. and Mead R. (1965). A simplex method for function minimisation, *Computational Journal* 7, 308-313.
42. Novak P., Musil J., Cerstvy R., and Jager A. (2010). Coefficient of friction and wear of sputtered a-C thin coatings containing Mo, *Surface and Coatings Technology* 205, 1486-1490.
43. Paldey S., and Deevi S.C. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review, *Materials Science and Engineering A* 342, 58-79.
44. Pena J., Gil F.J., and Guilemany J.M. (2006). Load and sliding velocity effect in dry sliding wear behavior of CuZnAl shape memory alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A* 37, 1175-1181.
45. Perry A.J., Baouchi A.W., Petersen J.H., and Pozder S.D. (1992). Crystal structure of molybdenum nitride films made by reactive cathodic arc evaporation, *Surface and Coatings Technology* 54-55 Part 1, 261-265.
46. Polok-Rubinić M., Dobrzański L.A., and Adamiak M. (2007). Comparison of the adhesion and wear resistance of the PVD coatings, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 20(1-2), 279-282.
47. Qian L., Li M., Zhou Z., Yang H., and Shi X. (2005). Comparison of nano-indentation hardness to microhardness, *Surface and Coatings Technology* 195, 264-271.

48. Rabinowicz E. (1995). *Friction and Wear of Materials*. New York: John Wiley and Sons.
49. Rajmohan T. and Palanikumar K. (2013). Application of the central composite design in optimization of machining parameters in drilling hybrid metal matrix composites, *Measurement* 46, 1470-1481.
50. Rathod K.B. and Lalwani D.I. (2017). Experimental investigation of flank wear and surface roughness during hard turning of AISI H11 steel with CBN tools, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 24, 171-181.
51. Rodríguez-Baracaldo R., Benito J.A., Puchi-Cabrera E.S., and Staiad M.H. (2007). High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments, *Wear* 262, 380-389.
52. Saikaew C. (2019). Process factors affecting deposition rate of TiN coating on a machine component, *Materials and Technology* 53(3), 409-415.
53. Santecchia E., Hamouda A.M.S., Musharavati F., Zalnezhad E., Cabibbo M., and Spigarelli S. 2015. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings, *Ceramic International* 41, 10349-10379.
54. Saravanan I., Perumal A.E., Issac R.F., Vettivel S.C., and Devaraju A. (2016). Optimization of wear parameters and their relative effects on TiN coated surface against Ti6Al4V alloy, *Materials and Design* 92, 23-35.
55. Shah A., Izman S., Abdul-Kadir M.R., and Mas-Ayu H. (2017). Influence of Substrate Temperature on Adhesion Strength of Coating of Biomedical Ti-13Zr-13Nb Alloy, *Arabian Journal for Science and Engineering* 42(11), 4737-4742.
56. Spendley W., Hert G.R., and Himsforth F.R. (1962). Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation, *Technometrics* 4(4), 441-461.
57. Srisattayakul P., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Intanon N. (2014). Effects of Sputtering Coating Factors on Elastic Modulus of MoN Coatings, *Advanced Materials Research* 896, 249-252.
58. Srisattayakul P., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Intanon N. (2016). Influence of MoN Sputtering Coating on Wear Resistance of a Fishing Net-Weaving Machine Component, *Advanced Materials Research* 1016, 80-84.
59. Srisattayakul P., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Phokharatkul D. (2017). Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel, *Wear* 378-379, 96-105.
60. Stachowiak G.W. and Batchelor A.W. (2006). *Engineering Tribology* 3rded.: Elsevier.
61. Stallard J., Poulat S., and Teer D.G. (2006). The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester, *Tribology International* 39(2), 159-166.
62. Sun K.K. and Vinh V.L. (2010). Cathodic arc plasma deposited TiAlSiN thin films using an Al-15 at.% Si cathode, *Thin Solid Films* 518, 7483-7486.
63. Suszko T., Gulbinski W., and Jagielski J. (2005). The role of surface oxidation in friction processes on molybdenum nitride, *Surface and Coatings Technology* 194, 319-324.

64. Sun K.K., Pham V.V., and Jae W.L. (2003). Deposition of superhard nanolayered TiCrAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition, *Journal of Crystal Growth* 252, 257-264.
65. Uddin G.M., Jawad M., Ghufraan M., Saleem M.W., Raza M.A., Rehman Z.U., Arafat S.M., Irfan M., and Wazeem B. (2019). Experimental investigation of tribo-mechanical and chemical properties of TiN PVD coating on titanium substrate for biomedical implants manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102, 1391-1404.
66. Ürgen M., Eryilmaz O.L., Çakir A.F., Kayali E.S., Nilüfer B., and Işık Y. (1997). Characterization of molybdenum nitride coatings produced by arc-PVD technique, *Surface and Coatings Technology* 94-95, 501-506.
67. Vasquez H., Lozano K., Soto V., and Rocha A. (2008). Design of a wear tester for nano-reinforced polymer composites, *Measurement* 41, 870-877.
68. Veprek S., Männling H.D., Jilek M., and Holubar P. (2004). Avoiding the high-temperature decomposition and softening of (Al_{1-x}Ti_x)N coatings by the formation of stable superhard nc-(Al_{1-x}Ti_x)N/a-Si₃N₄ nanocomposite, *Materials Science and Engineering: A* 366, 202-205.
69. Vera E.E., Vite M., Vite J., and Hilerio I. (2008). Comparative analysis of the experimental results of wear by rolling contact fatigue (RCF) of steel AISI 4140 base and with superficial covering of nitriding, hard chromium and TiN, *Nordtrib-Finland* ,116-31.
70. Wolfe D.E. and Singh J. (1999). Microstructural evolution of titanium nitride (TiN) coatings produced by reactive ion beam-assisted, electron beam physical vapor deposition (RIBA, EB-PVD), *Journal of Materials Science* 34, 2997-3006.
71. Wu Z.L., Li Y.G., Wua B., and Lei M.K. (2015). Effect of microstructure on mechanical and tribological properties of TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 503, 197–205.
72. Yang Z.X., Kuang X.Y., Wang Z.H., Zhong M.M., and Huang X.F. (2014). The mechanical properties of MoN under high pressure and effect of metallic bonding on its hardness, *Solid State Sciences* 28, 20-25.
73. Yousif B.F. (2013). Design of newly fabricated tribological machine for wear and frictional experiments under dry/wet condition, *Materials and Design* 48, 2-13.
74. Yu D.H., Wang C.Y., Cheng X.L., and Zhang F.L. (2009). Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology, *Thin Solid Films* 517, 4950-4955.
75. Zhang G., Fan T., Wang T., and Chen H. (2013). Microstructure, mechanical and tribological behavior of MoN_x/SiN_x multilayer coatings prepared by magnetron sputtering, *Applied Surface Science* 274, 231-236.
76. Zhang S., Wu W., Chen W., and Yang S. (2015). Structural optimisation and synthesis of multilayers and nanocomposite AlCrTiSiN coatings for excellent machinability, *Surface and Coatings Technology*, 277, 23-29.

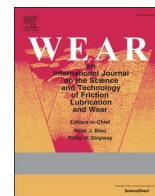
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. นักศึกษาปริญญาเอกสำเร็จการศึกษา 3 คน
2. บทความวิจัยระดับนานาชาติในฐานข้อมูล ISI จำนวน 6 ฉบับ

บทความ	Impact factor	Quartile
2.1 Intanon N. and Saikaew C. (2016). Effect of surface treatments on wear resistance of spring steel wire as a work piece material of a fishing net-weaving machine component, <i>Indian Journal of Engineering and Materials Sciences</i> 23, 79-81.	0.456 (2015)	4
2.2 Srisattayakul P., Saikaew C., Wisitsoraat A., and Phokharatkul D. (2017). Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel. <i>Wear</i> 378-379, 96-105.	2.531 (2016)	1
2.3 Khanchaiyaphom S., Saikaew C., Wisitsoraat A., and SurinPhong S. (2017). Wear behaviours of filtered cathodic arc deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings on AISI 316 stainless steel fishing net-weaving machine components under dry soft-sliding against nylon fibres. <i>Wear</i> 390-391, 146-154.	2.531 (2016)	1
2.4 Srisattayakul P., Saikaew C., and Wisitsoraat A. (2017). Effects of hard chrome and MoN-coated stainless steel on wear behaviour and tool life model under two-body abrasion wear testing. <i>Metalurgija</i> 56(3-4), 371-374.	0.959 (2014)	2
2.5 Saikaew C. (2019). Process factors affecting deposition rate of tin coating on a machine component. <i>Materiali in Technologije</i> 53(3), 409-415.	0.714 (2018)	4
2.6 Khanchaiyaphom S., Saikaew C., and SurinPhong S. Experimental Analysis and Comparative Performance of Ti-Based Coatings on Hard-Chrome Plated Stainless Steel (to be appeared in <i>Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette</i> in 2020).	0.644 (2018)	4

3. บทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (indexed in SCOPUS) จำนวน 2 ฉบับ
 - 3.1 Saikaew C. (2019). Influences of sputtering process factors on wear resistance of TiN coated on a machine component. 503 (1), article number 012023, 12th *International Scientific Conference on Functional Materials and Nanotechnologies*, FM and NT 2018, Riga; Latvia; 2 October 2018-5 October 2018.
 - 3.2 Saikaew C. (2019). Factors Influencing Hardness of a Coating Material for Coating a Machine Component, *The 9th International Conference on Key Engineering Materials*, Oxford, United Kingdom; 29 March-1 April 2019.

ภาคผนวก



Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel

Parinya Srisattayakul^a, Charnnarong Saikaew^{a,*}, Anurat Wisitsoraat^b, Ditsayut Phokharatkul^b

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

^b National Electronics and Computer Technology Center, Pathumthani 12120, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 September 2016

Accepted 2 January 2017

Available online 15 February 2017

Keywords:

Molybdenum-based coating

Hard chrome

Duplex coating

Reciprocating wear resistance

Analysis of variance

ABSTRACT

The aim of this work was to study the influence of a hard chrome (HC) intermediate layer on the reciprocating abrasive wear behaviour of Mo-based coatings deposited by DC magnetron sputtering on AISI 316 stainless steel. The two-body abrasive wear characteristics of sputtered MoN, MoC and MoCN coatings on AISI 316 stainless steel with an electroplated HC layer were systematically evaluated using test a reciprocating pin-on-flat whose geometry is similar to that of ASTM G133-05 standard, but in this case, the pin was covered with SiC abrasive paper. Data showed that MoN coating had a lower wear rate than either MoC or MoCN coatings. The presence of plated HC on the stainless steel substrate considerably improved the wear resistance of all Mo-based coatings, presumably because of enhanced composite hardness and improved surface quality. One-way analysis of variance and multiple comparisons confirmed that MoN-HC and MoC-HC exhibited statistically insignificant differences in the wear rate, which were considerably lower than those of the other coating combinations. In addition, microstructural analyses suggested that the wear mechanisms for Mo-based coating in the absence of HC involved mainly plowing, cutting and oxidative abrasive wear processes while the wear processes of Mo-coatings on HC were mostly governed by cutting, fragmentation and fatigue wear processes.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Transition metal carbides and nitrides are widely studied for wear resistant coatings owing to numerous technologically important properties including high hardness, low compressibility, high melting points, and good thermal/chemical stability [1]. Molybdenum (Mo) is an important transition metal that is widely used as alloying element to improve wear resistance of stainless steel due to its high strength, high melting point and good stability at high temperatures. Moreover, its nitrides, carbides and carbonitrides (MoN_x, MoC_x and MoN_xC_y) are superior materials for high wear-resistant applications because of its high hardness, high corrosion resistance, low friction coefficient, and good solid-lubrication properties [2–11]. For instance, a tribological study demonstrated that the implantation of Mo+C atoms into H13 steel provided more significant improvement in the wear and corrosion

resistance than the implantation of Mo atoms alone [12]. Similarly, the micro-hardness, friction coefficient and wear resistance of TiN layers coated on cemented carbide tools were found to improve substantially after ion implantation and the improvement due to the dual Mo + C ion implantation was much higher than that due to the single Mo ion implantation [13].

The tribological performances of MoN, MoC and MoCN coating depend generally on deposition method, chemical composition, supporting materials and wear-test method. Mo-based coatings can be deposited by various methods including nitridation/carbonization of molybdenum films [2], filtered cathodic arc (FCA) [3,7,9], magnetron sputtering [4–6,10] and ion beam assisted deposition [14]. Among these, sputtering and FCA are among the most widely used processes for hard coating due to high film quality, high surface uniformity, good adhesion and high reproducibility. Among Mo-based coatings, MoN usually exhibits better abrasive wear behaviors than MoC due to higher hardness while MoC tends to display better sliding wear performances because of relatively low friction coefficient [9]. The addition of carbon into the MoN system can increase the hardness values of resultant molybdenum carbonitride (MoCN) of up to 28 GPa [10].

* Corresponding author.

E-mail addresses: parinya.sr@rmutk.ac.th (P. Srisattayakul), charn_sa@kku.ac.th (C. Saikaew), anurat.wisitsoraat@nectec.or.th (A. Wisitsoraat), ditsayut.phokharatkul@nectec.or.th (D. Phokharatkul).

Moreover, the incorporation of silver into MoCN will reduce the friction coefficient at high temperatures ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) [11].

Supporting material can substantially influence surface micro-structure, effective hardness and friction coefficient and hence wear characteristics of Mo-based coatings. The wear behaviors of MoN, MoC and MoCN have been reported on various supporting bulk materials including Ag-Ni alloy [2], high speed steel [3,11,15], stainless steel [4,5,10] and aluminum silicon alloys [7], tungsten carbide [11]. In addition, they may be supported by some intermediate layers made of various materials such as silicon nitride [6] and titanium nitride (TiN) [9]. They can improve surface adhesion, effective hardness and wear resistance of Mo-based coatings but still have some particular shortcomings including limited coating thickness and relatively high deposition cost. Thus, alternative intermediate coating materials should be further explored. Hard chrome is a low cost and effective material that can improve structural strength, hardness, surface smoothness and wear resistance of conventional metal-based machine components. It can be deposited by electroplating with large thickness up to a few millimeters at low cost [16]. However, its wear performances are still not satisfactory for advanced wear-resistant applications. Nevertheless, it may be a good intermediate coating layer for Mo-based hard coating. It is thus persuasive to apply hard chrome as an intermediate support for Mo-based hard coating. To date, there has still been very few report of wear study of Mo-based hard-coating layer deposited on electroplated hard chrome.

Wear characteristics of materials are also highly dependent on the wear test method since they are correlated to the mechanical action of two opposite surfaces [17]. Pin-on-disc and pin-on-flat are the two most common wear test methods, which could yield basic tribological performances and the wear behaviors of Mo-based hard-coatings have been mostly evaluated by the pin-on-disc method [6–11,15]. These results may not be applicable to some applications that utilize specific mechanisms particularly reciprocating sliding actions of piston engine system, industrial sewing machines and net-weaving machines because of direction switching [3–5,16]. For such applications, the specific method, namely reciprocating wear test, should be used to determine the wear characteristics. The reciprocating wear test method has been standardized by American Society for Testing and Materials method (ASTM) under the G133-05 code and applied to various hard materials [18,19]. For instance, the reciprocating concomitant friction and wear characteristics of WC–Co based materials were studied under various dry-sliding parameters and the results showed increases of friction and wear with increasing sliding velocity [18]. In addition, reciprocating wear study on Al–Si–SiC_p composites revealed that the wear rates depended mutually on levels of applied load and reciprocating velocity as well as the silicon content of composite [20]. Hence, reciprocating sliding wear characteristics are related to workpiece and coating materials. It is thus interesting to investigate the reciprocating sliding wear behaviors of Mo-based coating, which are rarely reported in literature. In this work, the reciprocating dry sliding wear performances of MoN, MoC and MoCN coatings deposited by DC magnetron sputtering are systematically studied on AISI 316 stainless steel with electroplated hard-chrome using the wear test method modified from ASTM: G133-05 standard.

2. Experimental procedure

2.1. Materials

The substrates for characterization were AISI 316 stainless steel sheets. In this study, the effect of electroplated hard chrome layer on wear characteristics would be investigated for three

molybdenum-based coating materials including MoN, MoC and MoCN. Thus, samples were divided into two main groups including stainless steel sheets with and with no electroplated hard chrome layer, which were labeled as Stainless-HC and Stainless-UHC, respectively. In each group, three sets of samples would be deposited with MoN, MoC and MoCN layers by DC-magnetron sputtering. In addition, the samples with no Mo-based coating would also be characterized to evaluate the influence of Mo-based coatings. Hence there were eight sets of samples namely, MoN-HC, MoN-UHC, MoC-HC, MoC-UHC, MoCN-HC, MoCN-UHC, Stainless-HC and Stainless-UHC.

2.2. Deposition processes

The stainless steel substrates were precleaned by dipping in a sulfuric acid-based solution, rinsing in deionized water and drying with nitrogen. Eight substrates for the Stainless-HC group were electroplated with hard chrome using the standard chrome bath containing chromic acid (250 g/L) and sulfuric acid (100:1) at $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a current density of $\sim 0.3\text{ A/cm}^2$ for 80 min. The thickness of hard chrome was measured by a stylus profiler to be around $\sim 70\text{ }\mu\text{m}$. The Stainless-HC samples were then rinsed in deionized water and dried with nitrogen. MoN, MoC and MoCN films were individually deposited onto two Stainless-UHC and two Stainless-HC samples by a reactive DC-magnetron sputtering system. The sputtering target was Mo (99.999%) with 75 mm diameter situated 80 mm above the samples. The samples were loaded into the system, which was evacuated to a base vacuum of $\sim 10^{-9}$ bar. Before deposition, the substrates were cleaned by 75 W radio-frequency (RF) plasma at an argon (Ar) pressure of 3×10^{-6} bar for 20 min. The Mo-based films were deposited in reactive gas mixtures at 5×10^{-6} bar with no substrate heating at a constant DC current of 0.4 A. The reactive gases for nitride and carbide formations were nitrogen (N_2) and acetylene (C_2H_2), respectively. The reactive gas mixtures were Ar/ N_2 (50:50), Ar/ C_2H_2 (50:50) and Ar/ $\text{N}_2/\text{C}_2\text{H}_2$ (50:25:25) for the MoN, MoC, MoCN coatings, respectively. The sputtering time was adjusted for each deposition to obtain the average film thickness of $\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ for all Mo-based coatings. The sputtering parameters were selected based on the attained film qualities according to our previous studies [4,5]. The phase and crystallinity of substrates and coatings were analyzed by X-ray diffractometer (XRD) operated in the glancing incident mode with a scanning speed of 3° per min and high-power $\text{CuK}\alpha$ radiation (30 kV, 15 mA; Rigaku, TTRAX III).

2.3. Wear test

This study employed the linear reciprocating two-body abrasive wear test method modified from ASTM G133-05 standard. The modifications included the use of flat pins instead of balls, periodic abrasive refreshment and adjusted wear test conditions. In addition, the wear characteristics were reported in terms of weight loss and wear rate instead of wear volume since the density of worn materials would be uncertain when wear proceeded into materials below the coatings. The schematic illustration of the flat-on-flat test apparatus is shown in Fig. 1. The wear flat made of silicon carbide (SiC) abrasive paper (Grit#1000) was pressed against the reciprocating sample surface directly by a loading weight. SiC has been widely used as the wear flat due to high abrasive properties and wide availability [20–24]. The abrasive paper was periodically replaced every 20 min to refresh the abrasive and allowed a consistent wear test over a long sliding distance. The sample was reciprocated using a DC motor that can produce the maximum reciprocating speed of 100 rpm. The dry sliding conditions for pin-on-flat tests were a normal force of 5 N, a stroke length of 15 mm and a reciprocating speed of 70 rpm. These parameters were

selected to yield a suitable range of wear rates for all workpiece materials. Each test was repeated six times and the average results were computed. The weight loss value of each sample was collected after each wear test and converted to wear rate. The wear rate was defined by the ratio of the weight loss value to the sliding distance [23,25,26]. The average surface roughness (R_a) and hardness of samples were measured before and after wear test by a commercial nanoindenter (UMIS: model UMIS II) and a standard roughness tester (Mahr: model MarSurf PS1), respectively. The hardness was measured using a Berkovich-type diamond tip with a total included angle of 142.3° . The Berkovich tip had the same projected area-to-depth ratio as a Vickers indenter and would offer the results similar to the Vicker micro-hardness experiment. The applied load and indentation depth were 0.05 N and $0.902 \mu\text{m}$, respectively. The employed large load and indentation depth (around a third of film thickness) would ensure adequate exposure of hard-coating materials and yield the result closer to the standard micro-hardness measurement. The hardness value was estimated from nano-indentation data by the standard Oliver–Pharr analysis. The data of R_a and hardness values were collected at six different locations to avoid the statistical bias of measurements. In addition, the surface morphologies and the chemical compositions of workpiece at various stages were analyzed by scanning electron microscope (SEM: Hitachi SU-8020) and energy dispersive x-ray spectrometer (EDX) at 10 kV accelerating voltage.

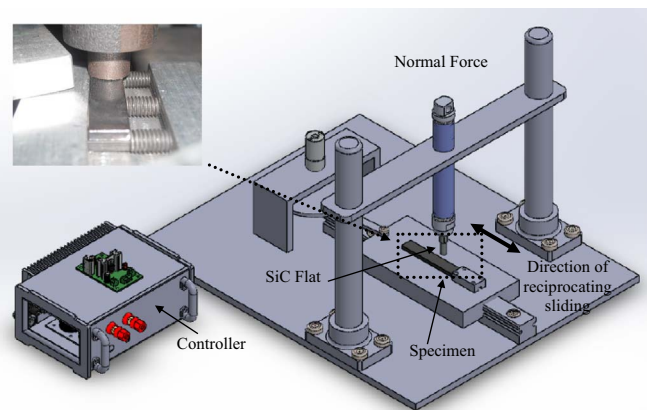


Fig. 1. Schematic illustration of the reciprocating pin-on-flat test apparatus.

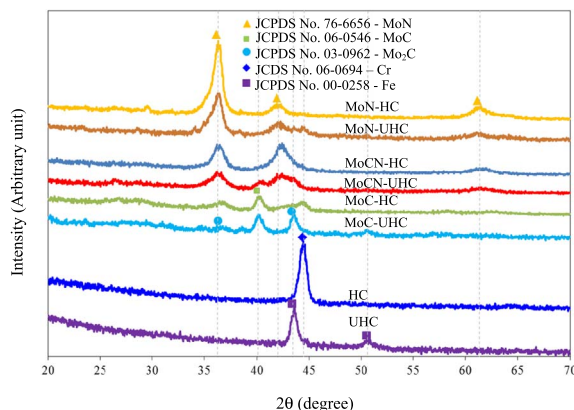


Fig. 2. XRD patterns of Stainless-UHC and Stainless-HC substrates with no, MoN, MoCN and MoC coatings.

3. Results and discussion

3.1. Structural properties of coatings

The XRD patterns of Stainless-UHC and Stainless-HC samples without and with MoN, MoC or MoCN coatings are shown in Fig. 2. It shows that the substrates and coatings contain their expected material phases including Austenite Fe (JCPDS No. 00-0258) for Stainless-UHC, Body-centered cubic Cr (JCPDS No. 06-0694) for Stainless-HC, Hexagonal MoN (JCPDS No. 76-6656) for MoN-HC and MoN-UHC, Hexagonal MoC (JCPDS No. 06-0546) and Orthorhombic Mo_2C (JCPDS No. 03-0962) for MoC-HC and MoC-UHC, Hexagonal MoN (JCPDS No. 76-6656) and Orthorhombic Mo_2C (JCPDS No. 03-0962) for MoCN-HC and MoCN-UHC. In addition, there are some differences of crystallographic properties of each coating on Stainless-HC and Stainless-UHC substrates. For MoN coating, MoN-HC shows stronger and sharper MoN peaks than MoN-UHC, indicating a higher degree of crystallinity of the MoN layer on Stainless-HC substrate. In the case of MoCN, MoCN-HC displays only MoN phase with distinctive two equally pronounced peaks at 36.1 and 41.9° while MoCN-UHC exhibits considerably broader MoN peaks with an additional overlapped peak at 40.4° , which may correspond to Mo_2C phase. The results suggest that MoCN layer on Stainless-HC contains higher content of nitride than MoCN on Stainless-UHC. In contrast, MoC-HC shows broad and low Mo_2C peaks while MoC-UHC displays sharp MoC and Mo_2C contributions. These results indicate that molybdenum carbide phases are better formed on stainless steel than hard chrome substrates. The observation can be explained based on the fact that chromium has low carbon solubility so that it is harder for carbon-based film to grow.

The average roughness (R_a) values of Stainless-UHC and Stainless-HC samples without and with MoN, MoC or MoCN coatings are illustrated in Fig. 3. Comparing between Stainless-HC and Stainless-UHC groups, the R_a values of substrates and different Mo-based coatings are not statistically different. The results indicate that the hard chrome plating process produces a conformal Cr layer and thus insignificantly affects the overall surface smoothness. In contrast, Mo-based coatings particularly MoN by sputtering tends to considerably reduce R_a values on Stainless-UHC and Stainless-HC substrates. The R_a values averaged between Stainless-HC and Stainless-UHC samples for MoN, MoCN, MoC and substrates are 0.59 , 0.68 , 0.77 and $0.93 \mu\text{m}$, respectively. Thus, the sputtered MoN is the best for surface smoothing while MoCN and MoC provide inferior improvements of roughness on Stainless-HC

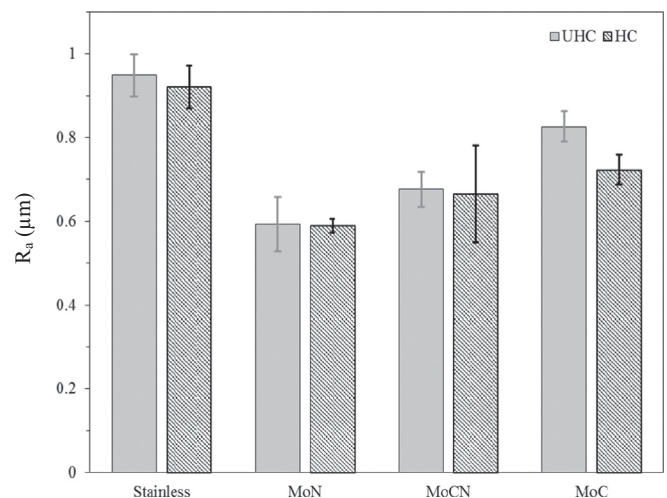


Fig. 3. Average roughness values of Stainless-UHC and Stainless-HC substrates without and with MoN, MoCN and MoC coatings.

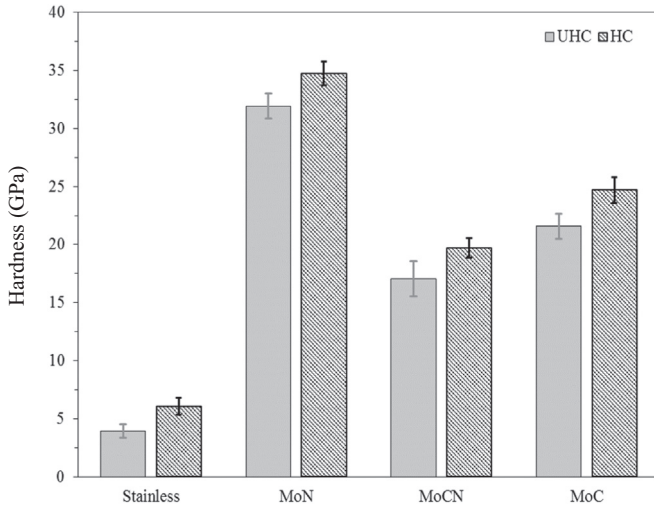


Fig. 4. Average hardness values of Stainless-UHC and Stainless-HC substrates without and with MoN, MoCN and MoC coatings.

and Stainless-UHC surfaces. The results may be attributed to the observation that MoN layer is formed as a single phase dense structure while MoCN or MoC contains multiple phases of MoN, MoC or Mo_2C , respectively.

Fig. 4 demonstrates the nano-indentation hardness values of MoN-HC, MoN-UHC, MoC-HC, MoC-UHC, MoCN-HC, MoCN-UHC, Stainless-HC and Stainless-UHC. It is seen that the hardness value of the Stainless-HC (~6.3 GPa) is considerably higher than that of stainless steel (~4.2 GPa) and the values agree well with their standard values. With Mo-based coatings, the hardness values of Stainless-UHC and Stainless-HC groups increase substantially and the MoN coating exhibits the highest hardness while the MoCN coating shows the lowest hardness among all Mo-based coatings. In addition, the values of Stainless-HC groups are higher than those of Stainless-UHC groups for each type of Mo-based coating. The results confirm that the effective hardness of coating depends on the hardness of substrate. The effective hardness of film-substrate composite (H_c) may be related to the hardness of substrate (H_s) according to [15]:

$$H_c = H_s + \frac{H_f - H_s}{1 + k\beta^2} \quad (1)$$

where H_f is the film hardness, β is the ratio of penetration depth and film thickness and k is a constant that is weakly depending on the film thickness. Using the measured H_s values of 3.95 and 6.08 GPa for Stainless-HC and Stainless-UHC and the β values from nano-indentation experiments with a fixed indentation depth of 0.902 μm , the film hardness values of MoN, MoCN and MoC can be calculated using Eq. (1) to be 39.3, 23.47 and 26.12 GPa, respectively. The corresponding constants k are computed to be 2.6, 4.4 and 4.3, respectively. The results confirm that MoN and MoCN have the highest and lowest hardness values, respectively. In addition, the obtained hardness values are comparable with other reports in literature [9–11]. It should be noted that the obtained nano-indentation hardness values are expected to be higher than the standard Vicker microhardness due to the difference of projected area estimation [27]. Nevertheless, the use of large applied load (0.05 N) and indentation depth (0.9 μm) may reduce the discrepancy to be less than 15%, enabling good comparison with previously reported microhardness values in literature.

3.2. Wear behavior

Fig. 5 illustrates the average weight loss of Stainless-UHC and

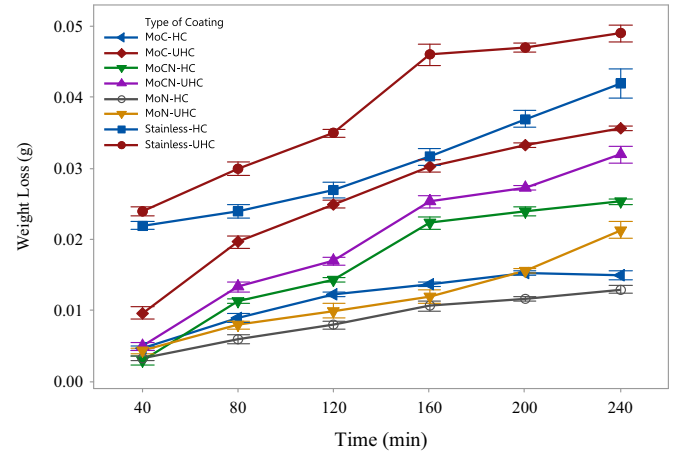


Fig. 5. Average weight loss versus sliding time of Stainless-UHC and Stainless-HC substrates without and with MoN, MoCN and MoC coatings.

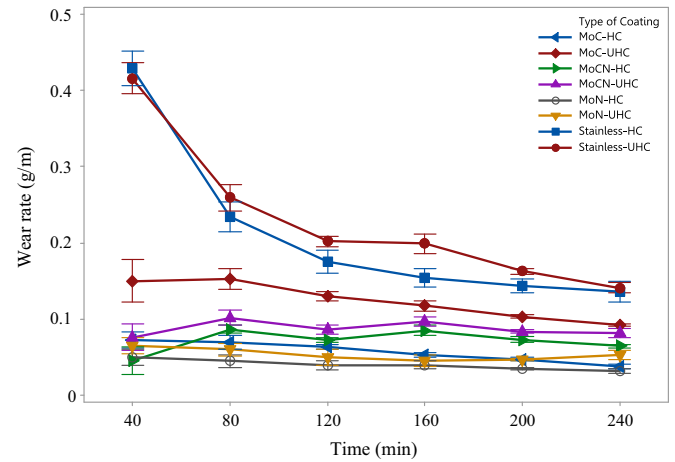


Fig. 6. Average wear rate versus sliding time in the range of 40–240 min of Stainless-UHC and Stainless-HC substrates without and with MoN, MoCN and MoC coatings.

Stainless-HC substrates without and with MoN, MoC or MoCN coatings under the reciprocating flat-on-flat sliding wear test with the sliding time in the range from 40 to 240 min. It is seen that the cumulative weight loss in all samples increases monotonically with increasing sliding time, conforming to a typical sliding abrasive wear behavior [27]. In addition, the bare stainless steel substrate (SS-UHC) exhibits the highest weight loss at all sliding time and the weight loss reduces moderately after hard-chrome coating (SS-HC). After Mo-based coatings, the weight loss decreases differently depending on the Mo-coating material and the presence of hard-chrome. Among the three Mo coating materials, MoN provides the lowest weight loss for both SS-UHC and SS-HC substrates while MoC shows the highest weight loss for Stainless-UHC substrate but MoCN coating exhibits the highest weight loss for Stainless-HC substrate. Furthermore, the weight losses of all three Mo-based coatings are relatively low on Stainless-HC substrates compared with those on Stainless-UHC ones. The MoN coating on hard chrome substrate (MoN-HC) is thus proven to exhibit the highest reciprocating wear resistance among the three Mo-based coatings.

To further analyze the behavior of weight loss, the corresponding wear rate was calculated by dividing the weight loss with the sliding distance as displayed in Fig. 6. Under the present reciprocating test parameters, the sliding time of 40 min corresponds to the sliding distance of 72 m. It can be seen that the wear

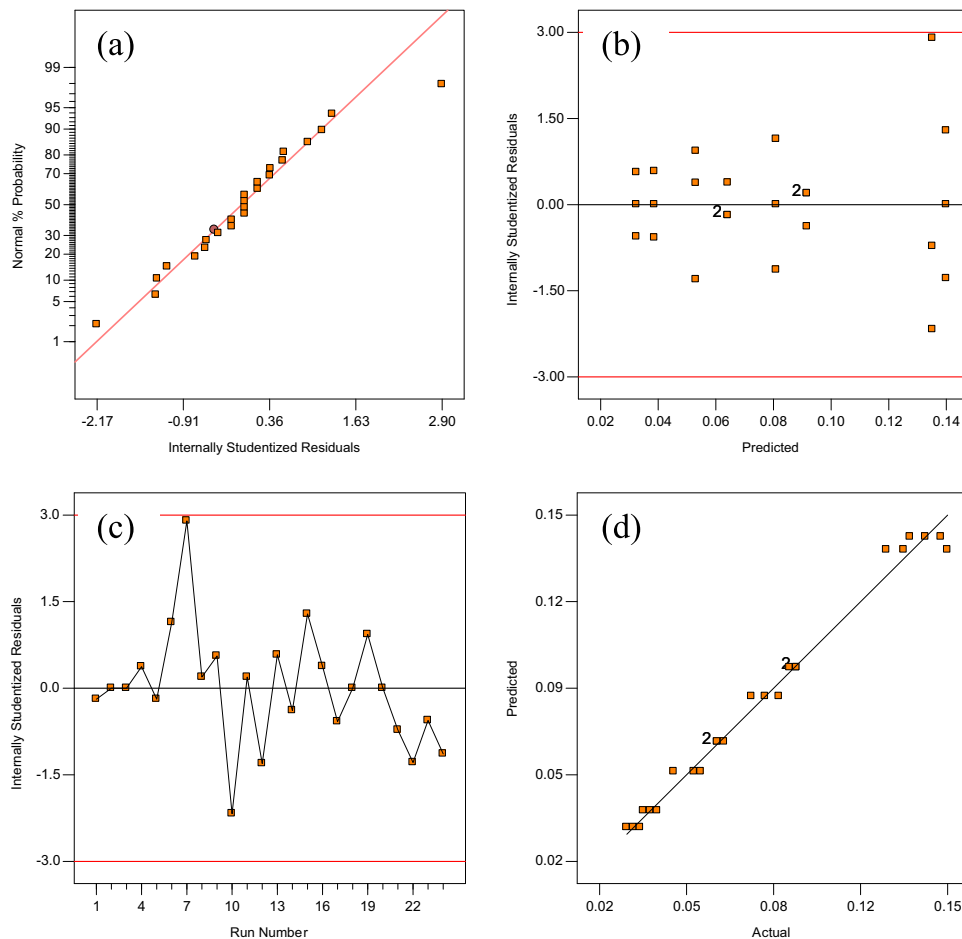


Fig. 7. The residual analysis for statistical evaluation used to validate the wear rate data after 240-min wear test.

rate behavior depends considerably on the presence and material of Mo-based coatings. With no Mo-based coating, the wear rates of stainless steel substrates without and with hard chrome (SS-UHC and SS-HC) are initially high and then decrease rapidly as the time increases from 40 to 80 min, followed by a steadily decline as the time increases further up to 240 min. The initially high wear rate during the run-in stage may be due to initially high friction force between hard SiC particles and rough stainless steel and hard chrome surfaces. In contrast, the wear rates of MoN coating on Stainless-UHC and Stainless-HC substrates are almost constant with slight fluctuations over the whole range of sliding time (40–240 min). In the case of MoCN coating, the wear rates on both substrates initially increase as the time increases from 40 to 80 min and then slightly fluctuate as the time increase further while MoC coatings on both substrates exhibit small and steady declines of wear rate over the entire range of sliding time. The approximately steady wear rate of Mo-based coatings may be attributed to their high surface smoothness, which does not induce high initial friction force when the two counter surfaces become in contact. The results also confirm that the periodic abrasive refreshment at the sliding time of 20 min is sufficient for this long sliding operation.

The significance of the hard chrome and Mo-based coating combinations was statistically evaluated by one-way analysis of variance (ANOVA) and multiple comparison analysis using the average wear rate data after 240-min wear test in Fig. 6. The ANOVA model validity is verified by the analysis of residuals as illustrated in Fig. 7 [28]. The residual for each value of the wear rate data is defined as the difference between the observation and the estimate of the corresponding observation. The observation

includes the average wear rate values of three replicates for Stainless-UHC and Stainless-HC samples without and with MoN, MoC or MoCN coatings. The normality assumption for the wear rate data is checked using a normal probability plot of the residuals as shown in Fig. 7(a). It is seen that there are only two values of residuals outlying from the regression line while other values of residuals lie well along the linear line, confirming a good model adequacy. The constant variance assumption of the model is then attested by plotting the residuals versus predicted values as demonstrated in Fig. 7(b). It is evident that the residuals are highly random against the predicted values, suggesting a good homogeneity of variances. It should be noted that all residuals fell within ± 3 of standard deviation, indicating no outliers. Similarly, the random nature of the residuals versus run order plot as displayed in Fig. 7(c) confirms that the independence assumption of model is valid. The predicted wear rate versus the observation value plot as presented in Fig. 7(d) demonstrates that the one-way ANOVA model can effectively predict the wear rate data.

The results of one-way ANOVA confirmed that there are statistically significant variations in the wear rates among samples with different coating materials at the confidence interval of 95%. However, multiple comparisons based on the least significant difference (LSD) test reveal that the wear rates of MoN-HC and MoC-HC, which are lower than those of all other cases, are actually not statistically different. Thus, the combination of hard chrome and MoN or MoC coatings is considered to be similarly the most effective for improving the reciprocating wear resistance of AISI 316 stainless steel.

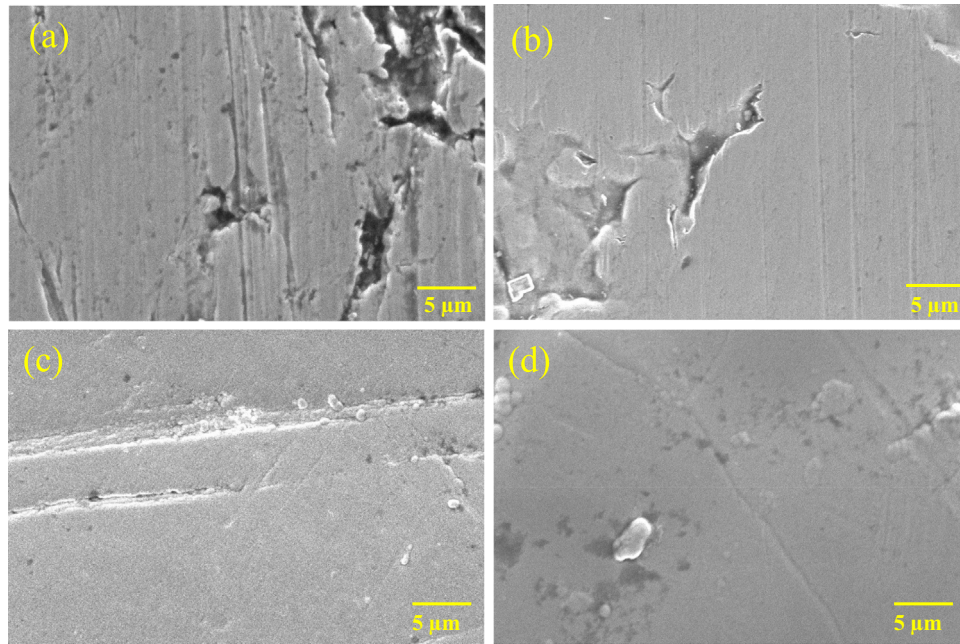


Fig. 8. Typical SEM micrographs of (a) Stainless-UHC, (b) Stainless-HC, (c) MoN-UHC and (d) MoN-HC surfaces before wear test.

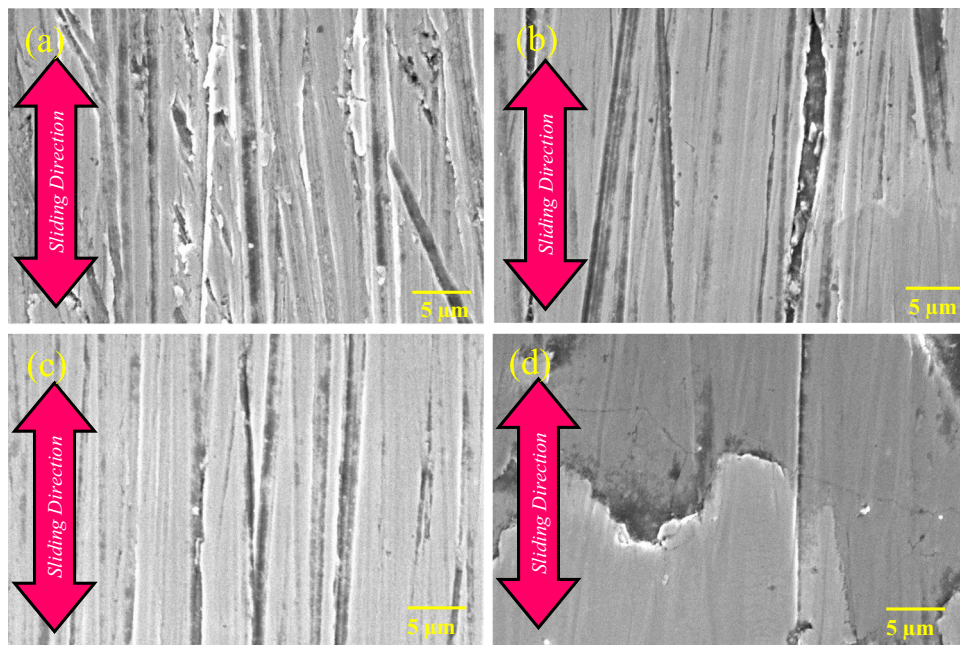


Fig. 9. Typical SEM micrographs of (a) Stainless-UHC, (b) Stainless-HC, (c) MoN-UHC and (d) MoN-HC surfaces after wear test.

3.3. Microstructure analysis

The wear characteristics of Stainless-UHC and Stainless-HC samples with no Mo-based, MoN, MoNC and MoC coatings were examined and analyzed by SEM and EDX. The representative SEM images of Stainless-UHC and Stainless-HC without and with MoN coatings before and after wear test are illustrated in Figs. 8 and 9, respectively. It should be noted that the images of MoCN and MoC are omitted because of their similarities to other cases and their morphologies will be referred to the similar ones in the following discussion. The EDX spectra of Stainless-UHC and Stainless-HC without and with Mo-based coatings after wear test are demonstrated in Fig. 10 and the corresponding elemental composition tables before and after wear test are included in the insets.

Before wear test, the bare Stainless-UHC substrate (Fig. 8(a)) shows rather rough surface with some large pits, dimples, and random line groves. After dry sliding test for 240 min (Fig. 9(a)), the surface is apparently worn exhibiting mostly deep and narrow parallel line grooves along the sliding directions with extensive lips on the groove walls indicating the dominance of microplowing wear mode with plastic deformation since the material worn from plastic flow will mainly be pushed aside the abrasive particles [29]. In addition, the grooves are non-uniform and discontinuous, suggesting that SiC abrasive particles were randomly disintegrated or running away after plowing action. Moreover, there are some fine particles sparsely scattered on the surface, demonstrating the stiction of residual abrasive or wear debris particles in the wear track.

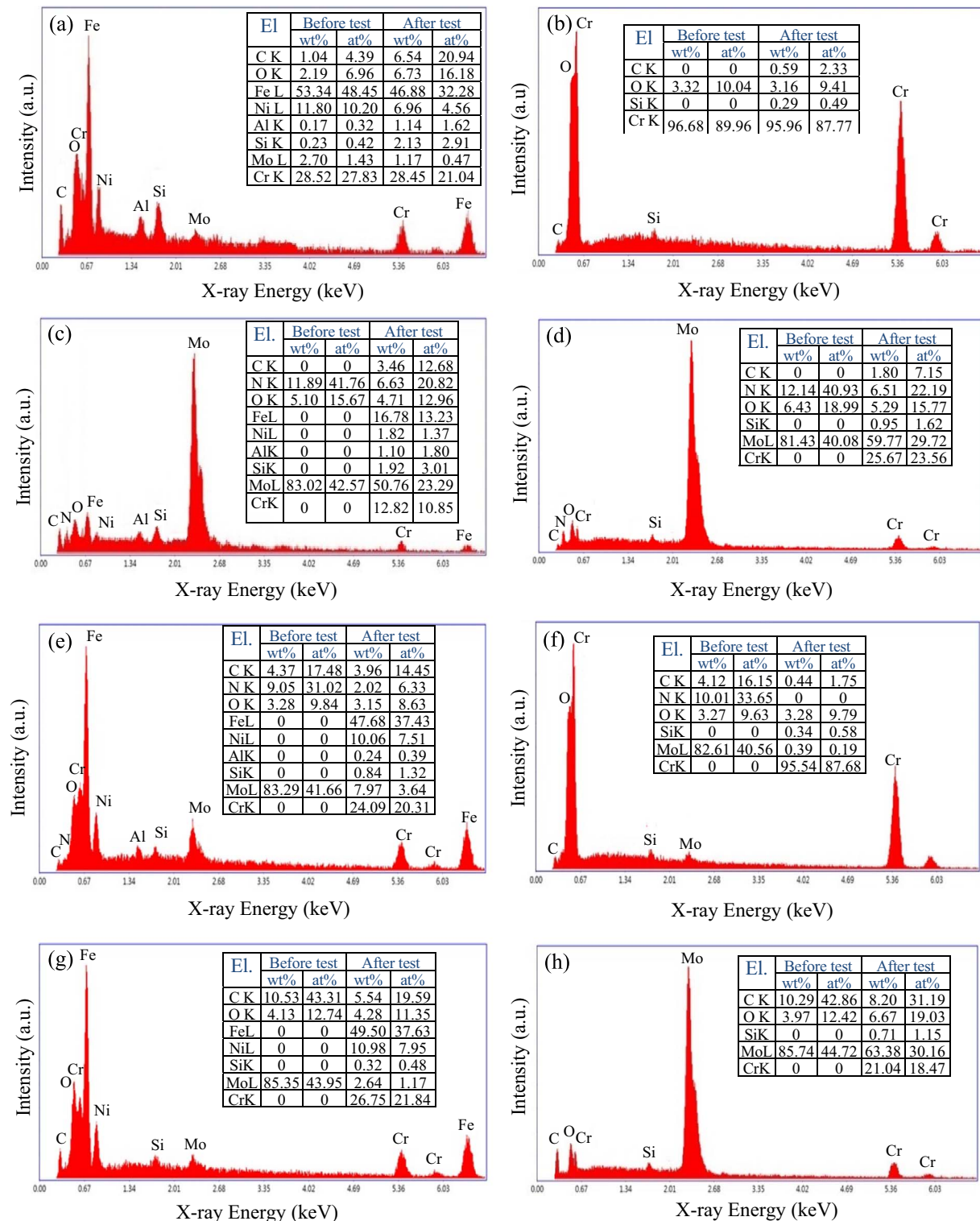


Fig. 10. EDX spectra of (a) Stainless-UHC, (b) Stainless-HC, (c) MoN-UHC, (d) MoN-HC, (e) MoCN-UHC, (f) MoCN-HC, (g) MoC-UHC and (h) MoC-HC surfaces after wear test. Insets: Corresponding elemental composition tables before and after wear test.

The corresponding EDX data (Fig. 10(a)) reveal that the stainless steel surface contains relatively high level of carbon, oxygen and silicon after the wear test. The increase of oxygen content indicates the oxidation of stainless steel during the dry abrasion process, which naturally generates heat leading to a high surface temperature and oxidative wear mechanism. The increase of Si and C contents confirms that some SiC nanoparticles from the SiC counter body stick to the worn stainless steel surface.

After hard chrome plating, the surface of Stainless-HC substrate (Fig. 8(b)) becomes relatively smooth with smaller pits, dimples and random line grooves. Upon the same dry sliding test (Fig. 9(b)), the surface is similarly worn with mostly parallel line grooves along the sliding directions. However, the density of line grooves is relatively low compared with the Stainless-UHC substrate, signifying lower abrasive wear due to the hard chrome layer. In addition, the line grooves appear to be relatively weak with little or

no ridge along wall edges and surrounding surfaces are relatively smooth compared with those of Stainless-UHC one. This morphology suggests the domination of direct microcutting process, in which material is separated from the work surface in form of primary debris with little or no material migrated to the sides [30]. Moreover, the cut surface is clean from particle residues, demonstrating nearly no stiction of abrasive particles and wear debris on surface. The respective EDX data (Fig. 10(b)) show a small increase of oxygen content and additional tiny peaks of carbon and silicon after the wear test. The results suggest relatively weak oxidation and confirm the low adhesion of SiC nanoparticles on HC surface.

With MoN coating, the surface of MoN-coated Stainless-UHC substrate (Fig. 8(c)) is quite smooth with no large pits and only some shallow indented lines. Upon the dry sliding test for 240 min (Fig. 9(c)), the surface exhibits some parallel worn scars along the sliding directions. In addition, the density of worn scars is relatively low compared with those of substrates with no MoN coating and with HC plating, confirming moderately low abrasive wear due to the MoN layer. Moreover, there are little or no ridge around the groove edges similar to those of HC-plated one, signifying the similar microcutting wear mode but with relatively low severity. The EDX data (Fig. 10(c)) demonstrate that the layer before wear test contains the expected contents of Mo and N with a small amount of O. In addition, there is no peak from substrate, confirming the presence of MoN phase and indicating that the film is so thick that electron-solid interaction does not reach the underlying Stainless-UHC substrate. After the wear test, the amounts of Mo and N decrease considerably by around 50% while peaks of stainless steel substrate and SiC counter body including Fe, Ni, Cr, Si and C arise with considerable magnitudes, indicating that the MoN layer has been partially worn out exposing the substrate surface and some SiC nanoparticles adhere on the worn surface.

In the case of the MoN-coated Stainless-HC substrate (Fig. 8(d)), the surface is even smoother than the MoN-coated Stainless-UHC one and there are less pit or indentation defects. After the wear test (Fig. 9(d)), the surface displays only few worn scars with no ridge on edges along the sliding directions but there are some additional observed crack boundaries propagating locally around the wear grooves. In addition, the regions on different sides of some wear grooves are at distinct levels, signifying a cutting fragmentation mechanism [29]. The densities of worn grooves and cracks are much lower than that of MoN-coated Stainless-UHC one, indicating the synergistic effect of MoN and hard chrome on the wear resistant improvement in agreement with the observed wear rate data (Fig. 6). The presence of very few wear grooves along with propagated cracks also implies a fatigue wear mode since the abrasive particles can hardly cut the hard MoN surface so they will rub the surface and eventually cause side cracks under the reciprocating cyclic loading. From the corresponding EDX data (Fig. 10(d)), the layer before wear test contains the expected elemental compositions of Mo, N and O with the absence of substrate contributions similar to MoN-UHC, further affirming the reproducibility of MoN coating with a large thickness. After the wear test, the contents of Mo and N decrease slightly by around 25% while small Cr, Si and C peaks of SiC counter body and underlying hard chrome emerge, demonstrating that the MoN layer has been partly removed and some SiC nanoparticles adhere on the surface. The excellent wear resistant characteristics of MoN coated HC substrate could be attributed to the high effective hardness of MoN/HC bilayer structure as determined from nano-indentation experiments and the expected low friction coefficient of MoN surface on HC due to the observed low surface roughness.

Regarding MoCN coating, MoCN-coated Stainless-UHC substrate exhibits similarly smooth surface like MoN-coated Stainless-UHC one (Fig. 8(c)). After the 240-min dry sliding test, the surface displays deep worn scars along the sliding directions similar to

those of MoN-UHC (Fig. 9(c)) but with a relatively high density, indicating considerable cutting abrasive wear despite the use of MoCN layer, conforming to the observed high wear rate data (Fig. 6). The EDX data (Fig. 10(e)) confirm the incorporation of carbon into the deposited layer with the carbon content of ~17.5 at% while there are no peaks from substrate, affirming a sufficient film thickness. After the wear test, the amounts of Mo, N and C decrease greatly by more than 95% while peaks of the stainless steel substrate including Fe, Ni, Cr, Si and Al clearly appear, specifying that the MoCN layer has been largely worn out exposing the stainless steel substrate surface. In addition, there are still small contents of Si and C arising from SiC nanoparticles of the SiC counter body.

For the Stainless-HC substrate, the MoCN-coated surface is similarly smooth as that of MoN-HC one (Fig. 8(d)). After the 240-min wear test, the surface displays several deep worn scars along the sliding directions similar to that of uncoated Stainless-HC substrate (Fig. 9(b)), indicating that the MoCN layer is also not effective for protection of cutting abrasive wear on Stainless-HC, which is also in accordance with previously observed high wear rate data (Fig. 6). The respective EDX data (Fig. 10(f)) verify similar elemental compositions of the MoCN layer to the one coated on Stainless-UHC (Fig. 10(e)) and the substrate peaks are absent due to the thickness effect, affirming good coating reproducibility. After the wear test, the contents of Mo, C and N also reduce greatly by more than 95% while small Cr and O peaks of hard chrome become dominant and tiny peaks of Si and C from SiC counter body arise, revealing that the MoCN layer has been mostly eliminated and a small amount of SiC nanoparticles adhere on the worn surface. The poor wear resistant characteristics of MoCN coated UHC and HC substrates may be due to relatively low effective hardness of MoCN layer as indicated by nano-indentation experiments and relatively high friction coefficient of MoCN layer due to the perceived surface roughness.

For MoC coating, the surface of MoC-coated Stainless-UHC substrate is quite rough similar to that of Stainless-UHC (Fig. 8(a)). Upon the 240-min dry sliding test, the surface displays a high density of deep worn scars along the sliding directions very similar to uncoated Stainless-UHC one (Fig. 9(a)), demonstrating high abrasive wear in the microplowing mode even with the MoC coating. The EDX data (Fig. 10(g)) indicate that the layer contains the expected contents of Mo and C with a small amount of O and no substrate component is observed, confirming the existence of a few-micron thick MoC layer. After the wear test, the contents of Mo and C decrease largely by more than 95% while peaks of stainless steel substrate and SiC counter body including Fe, Ni, Cr, Si and C arise with high magnitudes, demonstrating that the MoC layer has been primarily deposed and some SiC nanoparticles stick to the tattered surface. The poor wear performances of MoC on Stainless-UHC substrate may be due to its relatively high surface roughness, leading to rather a high friction coefficient and a high wear rate.

In contrast, the MoC-coated Stainless-HC substrate exhibits much smoother surface than the MoC-coated Stainless-UHC one with very small density of pit or indentation defects similar to that of MoC-HC (Fig. 8(d)). After the wear test, the surface shows quite few worn scars along the sliding directions while some additional crack boundaries arise, suggesting the combination of cutting fragmentation and fatigue abrasive wear mechanisms as well as the synergistic effect of MoC and hard chrome on the wear resistant enhancement similar to the case of MoN-coated Stainless-HC (Fig. 9(d)). The EDX data (Fig. 10(g)) also show the expected elemental compositions of MoC with the absence of substrate peaks, further affirming the few-micron thickness of MoC layer. After the wear test, the contents of Mo and C decrease moderately by around 30% while small Cr, Si and C peaks of SiC counter body

and underlying hard chrome emerge, demonstrating that the MoC layer has been slightly removed and some SiC nanoparticles attach on the modified surface. The decent wear resistance of MoC coated HC substrate may be attributed to the expected low friction coefficient of MoC surface on HC due to its low surface roughness and a moderate effective composite hardness of the MoC-HC structure.

From overall results, MoN coating offers the best wear resistant characteristics compared with MoC and MoCN ones and the presence of plated hard chrome on stainless steel substrate substantially improves the wear resistances for all Mo-based coatings. The findings were statistically confirmed by the one-way ANOVA and LSD test. According to microstructure analyses based on SEM and EDX, the wear mechanisms depend on the absence or presence of the HC layer. In the absence of HC layer, the wear mechanisms involve mainly plowing, cutting, and oxidative abrasive wear processes because considerable contents of Si, C and O as well as sharp cutting grooves were observed on the tattered surface. When the SiC protrusions are reciprocating against the bare stainless steel surface, hard SiC particles will first plow through the surface, creating grooves with side ridges and wear debris. With the Mo-based coating on stainless steel surface, the abrasive particles will directly cut the hard surface creating grooves with no side ridge while forming wear debris, leading to material removal. The difference in abrasive wear modes between bare stainless steel and Mo-based coated stainless steel should be attributed to their distinct hardness and ductility. Stainless steel is less hard but more ductile so that the microplowing mode dominates while Mo-based coatings are harder and more brittle such that the direct cutting process prevails but with relatively low abrasion rate. In addition, the mechanical energy loss in sliding action is transformed to heat energy, causing a temperature rise and surface oxidation in air as indicated by the EDX data (Fig. 10). The oxidized surface is hard but brittle so they will accelerate wear as the hard surface particles abrade the metal surfaces further. The wear rate based on the mechanisms will primarily depend on the hardness and friction coefficient of work surface. MoN and MoC on stainless steel (UHC) surfaces exhibit the highest and the lowest wear resistances, respectively. The results can be correlated to the observations that MoN is the hardest and smoothest surface while MoC is the softest and roughest surface on stainless steel.

With the HC layer, the wear of Mo-coatings on HC should be primarily governed by cutting, fragmentation and fatigue wear mechanisms since propagated cracks were found on these worn surfaces. In these cases, the stacked surfaces of Mo coatings and HC are relatively hard such that SiC particles can hardly attack the material and the particles will mostly rub the surface, leading to energy loss but with little material removal. However, the repeated cyclical rubbing between two surfaces under reciprocating action will eventually generate cracks that will propagate leading to material removal from complete cracks. The wear rate based on the mechanisms will depend more on the friction coefficient provided that the hardness of work surface is above a certain threshold. MoN and MoC on HC surfaces exhibit similarly optimal wear resistances because MoN and MoC are relatively hard and similarly smooth on HC surface while MoCN on HC displays relatively poor wear performances since its hardness may fall below a critical threshold.

4. Conclusions

The purpose of this work was to study the influence of hard chrome intermediate layer on the reciprocating two-body abrasive wear behaviours of Mo-based coatings deposited by DC magnetron sputtering. In order to address that challenge, a series of

reciprocating dry sliding tests were conducted on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel with sputtered MoN, MoCN and MoC films along with uncoated and unplated ones against a flat SiC counter face. Based on the results, the following primary conclusions were drawn:

- 1) The presence of plated hard chrome on AISI 316 stainless steel substrate substantially improved the wear resistances for all Mo-based coatings because of enhanced composite hardness and improved surface quality.
- 2) MoN coating offered the best wear resistant characteristics compared with MoC and MoCN ones due to superior hardness and surface smoothness.
- 3) MoN-HC and MoC-HC exhibited statistically insignificant difference in the wear rates, which were considerably lower than other coating combinations.
- 4) Microstructural analyses suggested that the wear mechanisms for Mo-based coating in the absence of HC involved mainly plowing, cutting and oxidative abrasive wear processes while the wear of Mo-coatings on HC should be primarily governed by cutting, fragmentation and fatigue wear processes.

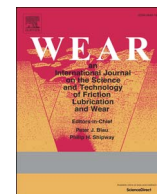
Acknowledgements

The authors would like to thank the Office of the Higher Education Commission of Thailand and the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant No. RSA 5980025 for the financial supports of this research.

References

- [1] Z.X. Yang, X.Y. Kuang, Z.H. Wang, M.M. Zhong, X.F. Huang, The mechanical properties of MoN under high pressure and effect of metallic bonding on its hardness, *Solid State Sci.* 28 (2014) 20–25.
- [2] J. Li, D. Xiong, H. Wu, H. Zhu, J. Kong, R. Tyagi, Tribological properties of MoN layer on silver-containing nickel-base alloy at high temperatures, *Wear* 271 (2011) 987–993.
- [3] M.K. Kazmanli, M. Urgan, A.F. Cakir, Effect of nitrogen pressure, bias voltage and substrate temperature on the phase structure of Mo–N coatings produced by cathodic arc PVD, *Surf. Coat. Technol.* 167 (2003) 77–82.
- [4] P. Srisattayakul, C. Saikaew, A. Wisitsoraat, N. Intanon, Effects of sputtering coating factors on elastic modulus of MoN coatings, *Adv. Mater. Res.* 896 (2014) 249–252.
- [5] P. Srisattayakul, C. Saikaew, A. Wisitsoraat, N. Intanon, Influence of MoN sputtering coating on wear resistance of a fishing net-weaving machine component, *Adv. Mater. Res.* 1016 (2014) 80–84.
- [6] G. Zhang, T. Fan, T. Wang, H. Chen, Microstructure, mechanical and tribological behavior of MoN_x/SiN_x multilayer coatings prepared by magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* 274 (2013) 231–236.
- [7] H. Hazar, Characterization of MoN coatings for pistons in a diesel engine, *Mater. Des.* 31 (2010) 624–627.
- [8] Y.Z. Liu, Y.H. Jiang, J. Feng, R. Zhou, Elasticity, electronic properties and hardness of MoC investigated by first principles calculations, *Physica B* 419 (2013) 45–50.
- [9] E. Martinez, U. Wiklund, J. Esteve, F. Montala, L.L. Carreras, Tribological performance of TiN supported molybdenum and tantalum carbide coatings in abrasion and sliding contact, *Wear* 253 (2002) 1182–1187.
- [10] Q. Liu, T. Liu, Q.F. Fang, F.J. Liang, J.X. Wang, Preparation and characterization of nanocrystalline composites Mo–C–N hard films, *Thin Solid Films* 503 (2006) 79–84.
- [11] D.V. Shtansky, A.V. Bondarev, Ph.V. Kiryukhantsev-Korneev, T.C. Rojas, V. Godinho, A. Fernandez, Structure and tribological properties of MoCN–Ag coatings in the temperature range of 25–700 °C, *Appl. Surf. Sci.* 273 (2013) 408–414.
- [12] T. Zhang, X. Wang, H. Liang, H. Zhang, G. Zhou, G. Sun, W. Zhao, J. Xue, Behaviour of MEVVA metal ion implantation for surface modification of materials, *Surf. Coat. Technol.* 83 (1996) 280–283.
- [13] B. Deng, Y. Tao, Y. Wang, P. Liu, Study of the microstructure and tribological properties of Mo + C-implanted TiN coatings on cemented carbide substrates, *Surf. Coat. Technol.* 228 (2013) 597–600.
- [14] M.S. Mudholkar, L.T. Thompson, Control of composition and structure for molybdenum nitride films synthesized using ion beam assisted deposition, *J. Appl. Phys.* 77 (1995) 5138–5143.

- [15] T. Suszko, W. Gulbin'ski, J. Jagielski, The role of surface oxidation in friction processes on molybdenum nitride thin films, *Surf. Coat. Technol.* 194 (2005) 319–324.
- [16] N. Intanon, P. Srisattayakul, C. Saikaew, Design and fabrication of wear testing machine for a fishing net-weaving machine component, *Adv. Mater. Res.* 896 (2014) 706–709.
- [17] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [18] K. Bonny, P. De Baets, Y. Perez, J. Vleugels, B. Lauwers, Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact, *Wear* 268 (2010) 1504–1517.
- [19] ASTM G133-05, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016 (2016) (www.astm.org).
- [20] V.R. Rajeev, D.K. Dwivedi, S.C. Jain, Effect of load and reciprocating velocity on the transition from mild to severe wear behavior of Al–Si–SiC_p composites in reciprocating conditions, *Mater. Des.* 31 (2010) 4951–4959.
- [21] E.L. Dalibon, V. Trava-Airoldi, L.A. Pereira, A. Cabo, S.P. Bruhl, Wear resistance of nitrided and DLC coated PH stainless steel, *Surf. Coat. Technol.* 255 (2014) 22–27.
- [22] R. Ahmed, O. Ali, N.H. Faisal, N.M. Al-Anazi, S. Al-Mutairi, F.L. Toma, L. M. Berger, A. Potthoff, M.F.A. Goosen, Sliding wear investigation of suspension sprayed WC–Co nanocomposite coatings, *Wear* 322–323 (2015) 133–150.
- [23] Y. Sahin, Optimal testing parameters on the wear behaviour of various steels, *Mater. Des.* 27 (2006) 455–460.
- [24] S. Suresha, B.K. Sridhara, Effect of silicon carbide particulates on wear resistance of graphitic aluminium matrix composites, *Mater. Des.* 31 (2010) 4470–4477.
- [25] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [26] M.R. Dressler, M.A. Strickland, M. Taylor, T.D. Render, C.N. Ernsberger, Predicting wear of UHMWPE: decreasing wear rate following a change in direction, *Wear* 271 (2011) 2879–2883.
- [27] L. Qian, M. Li, Z. Zhou, H. Yang, X. Shi, Comparison of nano-indentation hardness to microhardness, *Surf. Coat. Technol.* 195 (2005) 264–271.
- [28] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, sixth ed., John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [29] B.N. Mordiyuk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman, M.O. Iefimov, K.E. Grinkevych, A.V. Sameljuk, I.V. Tkachenko, Wear assessment of composite surface layers in Al–6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasi crystalline particles: effects of particle size, microstructure and hardness, *Wear* 319 (2014) 84–95.
- [30] Balaji Narayanaswamy, Peter Hodgson, Hossein Beladi, Comparisons of the two-body abrasive wear behavior of four different ferrous microstructures with similar hardness levels, *Wear* 350–351 (2016) 155–165.



Wear behaviours of filtered cathodic arc deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings on AISI 316 stainless steel fishing net-weaving machine components under dry soft-sliding against nylon fibres

Supakanya Khanchaiyaphum^a, Charnnarong Saikaew^{a,*}, Anurat Wisitsoraat^b, Surasak Surinphong^c

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

^b National Electronics and Computer Technology Center, Pathumthani 12120, Thailand

^c NanoShield PVD Hard Coating, Samutprakarn 10560, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Titanium-based coating

Filtered cathodic arc

Hard chrome

Dry soft-sliding wear resistance

ABSTRACT

The aim of this work was to study the wear behaviours and mechanisms of Ti-based coatings deposited by a filtered cathodic arc process on fishing net-weaving machine components, namely hooks, under dry soft-sliding against nylon fibres. A set of dry soft-sliding experiments were conducted on AISI 316 stainless steel hooks with filtered cathodic arc-deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN films along with uncoated and hard-chrome plated ones. The results showed that Ti-based coatings offered substantially better wear resistance improvement for stainless steel hooks than hard-chrome plating in an accelerated dry soft-sliding condition of a net-weaving machine. Among the three Ti-based coatings, TiAlSiN coating displayed the best dry soft-sliding wear resistant characteristics with the lowest wear rate and the longest maximum sliding distance of 189 km, which was about 5 times as high as that of uncoated one due to superior hardness and chemical properties. Microstructural analyses suggested that the wear mechanisms of hard tool surface such as TiAlSiN mainly involved repetitive two-step adhesive wear processes including a corrugated transfer film onto the hard surface and the subsequent detachment of transfer film along with the outermost layer of hard material. Moreover, the hard-chrome plated hook exhibited a rather high wear rate despite its low surface roughness due to rapid material detachment by the adhesive fracture wear mechanisms.

1. Introduction

Titanium-based nitrides are widely studied and employed for industrial hard coatings due to their high hardness, high melting points, low compressibility and good thermal/chemical stability [1]. Titanium nitride (TiN) is a fundamental protective coating that is widely used for general machine tools and components owing to its good wear and corrosion resistances. However, its performances are still insufficient for specific applications involving very hard counter materials and high working temperature because of its limited strength and oxidation resistance [2]. The tribological properties of TiN can be improved by introducing suitable alloying or doping elements such as Al, Cr and Si [2–8]. In particular, alloying with Al to form TiAlN can offer substantially enhanced oxidation and corrosion resistances since Al will form stable Al_2O_3 phases that can inhibit oxidation at an elevated temperature [3–5]. TiAlN has become one of the most widely used

industrial hard coatings but its sliding wear performances are still not highly satisfactory for some applications due to its relatively high friction coefficient [6]. Thus, additional doping of TiAlN with various elements has been investigated to further improve its wear-resistant characteristics [6,7]. TiAlSiN and TiCrAlSiN are among the most recently reported derivatives of TiAlN that display excellent mechanical properties including extremely high hardness and low friction coefficient [7–15]. Nevertheless, the tribological studies and evaluations of these new hard coating materials are still quite limited.

In general, the tribological performances of Ti-based nitride coatings can be mainly affected by deposition method, supporting materials, the type of mechanical action and the properties of counter body. Ti-based nitride coatings can be deposited by various methods including magnetron sputtering, filtered cathodic arc (FCA) and their hybrids. Among these, FCA is the most widely used processes for hard coating due to high film quality, high deposition rate, high surface

* Corresponding author.

E-mail addresses: khansupa@yahoo.com (S. Khanchaiyaphum), charn_sa@kku.ac.th (C. Saikaew), anurat.wisitsoraat@nectec.or.th (A. Wisitsoraat), info@nanoshield-pvd.com (S. Surinphong).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.018>

Received 16 November 2016; Received in revised form 6 July 2017; Accepted 28 July 2017

Available online 29 July 2017

0043-1648/ © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

uniformity and high reproducibility. Recently, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings have been developed based on magnetron sputtering [7–9], FCA [10–13] and the hybrid of FCA and sputtering techniques [14,15]. The wear behaviours of TiAlSiN and TiCrAlSiN have been reported on various supporting materials such as stainless steel (SS) [7], Ni-Cr based alloys [12], tool steel [13] and Ni-based high-temperature alloys [14]. From these studies, the supporting material can substantially influence surface microstructure, effective hardness, friction coefficient and hence wear characteristics of these coatings.

Wear characteristics and related wear mechanisms of materials are also highly dependent on the type of mechanical action, the test method and the properties of counter material [16]. The wear behaviours of Ti-based nitride coatings have been extensively evaluated by various standard wear-test methods including pin-on-disc, pin-on-flat, pin-on-drum and reciprocating ball-on-flat [17]. However, these results may not be applicable to some specific applications such as fishing net-weaving machines that involve long continuous soft-sliding against a polymeric fibre [18]. The net production industry is an important business that supports several other industries in a value chain such as fishing, sporting, agriculture and textile. Fishing nets are generally produced by a fishing net-weaving machine that contains hooks and other mechanics for the net-weaving operations as shown in Fig. 1. In its operation, net fibres will continuously slide through hooks during weaving actions, leading to wear on hook surfaces. When the wear becomes excessive, the hooks must be replaced since they will generate poor quality nets. Typically, hooks are made of SS or hard-chrome (HC) plated SS that will be worn out within months under continuous weaving operations [18]. The hook replacement consumes considerable material, labour and production-time costs. Thus, hard coating should be applied on the hooks in order to minimize the replacement costs and it is important to evaluate soft-sliding wear characteristics of hard coating films. Generally, most soft-sliding studies have focused on the wear of the softer material such as polymers and polymer composites of the two counter surfaces since the wear of the harder one is often negligible [19–22]. However, the wear of the harder material is paramount in this specific application because it is accumulated under long and continuous soft-sliding operation, in which the softer material is constantly fed through the harder one. To obtain such soft-sliding wear characteristics, a customized wear test method will be required to emulate the real working condition [23]. In this work, the soft-sliding wear performances of TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings deposited by FCA on AISI 316 SS hooks of a fishing-net weaving machine are systematically studied using a customized wear test method for the net-weaving operation against nylon fibres. Nylon, a type of polyamide, is

selected as the mating material since it is widely used in textile industries to produce fishing and other types of nets [22].

2. Experimental procedure

AISI 316 SS hooks were prepared by an investment or lost-wax casting process [18]. The produced hook had a straight edge with a hook angle of $\sim 75^\circ$ and a hook radius of $\sim 250\ \mu\text{m}$ located on one end of a cylindrical rod with 5 mm in diameter and 90 mm in length as illustrated in the insets of Fig. 1. TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN were coated on the hooks by a filtered cathodic arc system equipped with five material targets and five straight duct filters (Nanoshield Co., Ltd.). Before coating, hooks were precleaned with alcohol under ultrasonication for 30 min. They were then loaded into the deposition chamber and evacuated to a base vacuum of 5×10^{-3} Pa. Next, they were heated to 350°C and cleaned with metal ions from a filtered cathodic arc under a substrate bias of 1000 V for 10 min to remove remaining surface contaminants and ensure excellent adhesion of deposited films. For TiN coating, the samples were implanted with Ti atoms and precoated with a 50 nm-thick Ti adhesive layer using a high-energy Ti cathodic arc in Ar at a pressure of 0.3 Pa and a discharge current of around 50 A under a substrate bias of 200 V. A 3 μm -thick TiN layer was then reactively deposited in a N_2/Ar gas mixture at a pressure of 0.5 Pa and a discharge current of around 100 A under a substrate bias of 100 V. In the case of TiCrAlSiN coating, the substrates were implanted with Cr atoms and precoated with a 50 nm-thick Cr adhesive layer using a high-energy Cr cathodic arc in Ar at a pressure of 0.3 Pa and a discharge current of around 50 A under a substrate bias of 200 V. Next, a 3 μm -thick TiCrAlSiN layer was coated from arc discharges of Ti, Al, Cr and Si in a N_2/Ar mixture at a pressure of 2 Pa under a substrate bias of 75 V. Regarding TiAlSiN coating, 50 nm-thick Cr and 100 nm-thick TiCrAlSiN adhesive layers were precoated using the same deposition conditions as described above. A 3 μm -thick TiAlSiN layer was deposited from arc discharges of Ti, Al and Si in a N_2/Ar mixture at a pressure of 1.5 Pa under a substrate bias of 75 V. The discharging currents of different targets were controlled and optimized for the hardness of composite films [12]. The wear performances of these coatings would be compared with uncoated and HC-plated ones. Another set of hook samples were electroplated with HC using the standard chrome bath containing chromic acid (250 g/L) and sulfuric acid (100:1) at 55°C with a current density of $\sim 0.3\ \text{A}/\text{cm}^2$ for 80 min [18]. The thickness of HC layer was measured to be around $\sim 70\ \mu\text{m}$ by a stylus profiler. The plated samples were rinsed in DI water and dried with nitrogen. The phase and crystallinity of substrates and coatings

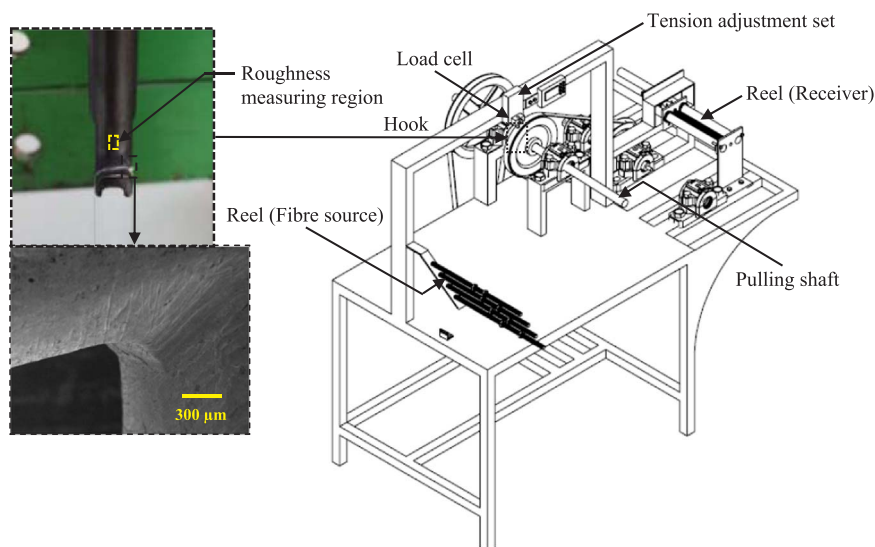


Fig. 1. Schematic illustration of the soft-sliding test apparatus for a hook used to weave fishing net. Insets: Photograph of a hook feeding with a nylon fibre and side-view SEM image of a hook.

were analyzed by an X-ray diffractometer (XRD) operated in the glancing incident mode with a scanning speed of 3° per min and high-power $\text{CuK}\alpha$ radiation (30 kV, 15 mA; Rigaku, TTRAX III).

The average surface roughness (R_a) and hardness of samples were measured before wear test by a standard roughness tester (Mahr: model MarSurf PS1) and a commercial nanoindenter (UMIS: model UMIS II), respectively. The sampling and cut-off lengths for all roughness measurements were 0.2 and 5.6 mm, respectively. To avoid the effects of the curvature of the surfaces, the roughness measurements were taken on approximately planar regions slightly away the hook corners as marked in the photograph of Fig. 1. The hardness was measured using a Berkovich-type diamond tip with a total included angle of 142.3° . The Berkovich tip had the same projected area-to-depth ratio as a Vickers indenter and would offer the results similar to the Vicker micro-hardness experiment. The applied load and indentation depth were 50 mN and $0.902\ \mu\text{m}$, respectively. The moderate load and indentation depth (around a third of film thickness) would ensure adequate exposure of hard-coating materials and avoid surface roughness as well as substrate effects. The hardness value was estimated from nano-indentation data by the standard Oliver–Pharr analysis. The data of R_a and hardness values were collected at five different locations to avoid the statistical bias of measurements. No surface polishing was performed prior to these measurements.

The wear performances of various hook materials were evaluated using the soft-sliding test apparatus as schematically illustrated in Fig. 1. The design and fabrication of the test apparatus was reported recently [23]. The hook was clamped vertically on a tension adjustment holder equipped with a load cell for tension force measurement. The fibre with 0.12 mm in diameter employed in this experiment is made of polymer blend containing 80 wt% nylon 6 and 20 wt% nylon 66, which is a common material used in fishing nets. The fibre stored on a source reel was fed through the hook via pulling shaft and gear mechanisms onto a receiving reel. The tension on the hook was adjusted by moving the holder in vertical direction and monitored by an attached load cell. The pulling shaft was rotated using a DC motor that can produce the maximum speed of 300 rpm. The dry soft-sliding conditions for hook tests were a tension force of 2 N and a rotation speed of 150 rpm. The tension force was selected according to the value used in a fishing-net weaving machine while the fibre feeding speed was about 10 times as high as the normal value to accelerate the wear rate and obtain measurable weight loss within a reasonable period of time [23]. The average sliding velocity of the fibre over the hook was 225 m/min and the fibre passed the hook only once (no fibre recirculation). Each test was repeated five times and the average result was computed. The wear characteristics were reported in terms of weight loss and wear rate. The weight loss value of each sample was collected after each wear test and converted to wear rate. The wear rate was nominally defined by the ratio of the weight loss value to the sliding distance. The wear test would be terminated when the nylon fibre would be torn apart becoming a poor net after passing through a hook. This sliding time and corresponding distance would be taken as the maximum sliding time and distance that a hook can operate a nylon fibre without excessive wear. In addition, the surface morphologies and the chemical compositions of workpiece at various stages were analyzed by scanning electron microscope (SEM: Hitachi) and energy dispersive x-ray spectrometer (EDX) at an accelerating voltage of 20 kV.

3. Results and discussion

3.1. Structural properties of coatings

The XRD patterns of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks are shown in Fig. 2. It shows that the uncoated, HC-plated, TiN-coated hooks contain their expected material phases including tetragonal CrFe alloy (JCPDS No. 65-4528), body-centered cubic Cr (JCPDS No. 06-0694) and cubic TiN (JCPDS

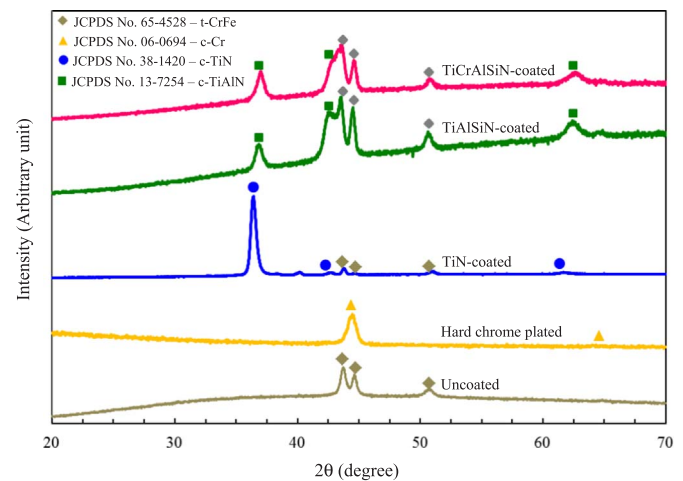


Fig. 2. XRD patterns of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks.

No. 38-1420), respectively. In the case of TiN-coated one, it exhibits only a single dominant peak at 36.5° corresponding to the (111) plane of TiN, suggesting the highly-oriented nature of this coating while other tiny secondary peaks arise from the underlying CrFe alloy hook body. Regarding the TiAlSiN-coated hook, the XRD pattern indicates the presence of the cubic TiAlN phase (JCPDS No. 13-7254) along with the CrFe alloy phase from the substrate whose peaks become predominant over the coating. Likewise, the TiCrAlSiN-coated one displays similar XRD peaks but the peak positions are slightly shifted and the peak at 42.7° becomes obscure, suggesting the influence of Cr on the lattice modification of TiAlN phase. For both TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings, the substrate peaks are dominant due possibly to the low X-ray absorption coefficients of light elements including Al and Si, which permit X-ray to penetrate deeper into substrate. In addition, there is no peak associated with a Si phase, which may be due to its low concentrations or formation as an amorphous phase. A previous study demonstrated that Si presented as an amorphous silicon nitride phase in a TiAlSiN layer [14]. This should be applicable to these TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings since the observed broad background signals in XRD pattern could signify the presence of amorphous phase in the layers.

The average roughness (R_a) values of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks are illustrated in Fig. 3. It should be noted that error bars represent the variation from five samples. It is evident that the roughness values of the SS hook surfaces are substantially reduced upon HC plating as well as Ti-based coatings by FCA. In addition, the roughness values of HC-plated hook as well as those of Ti-based coated ones are comparable and statically

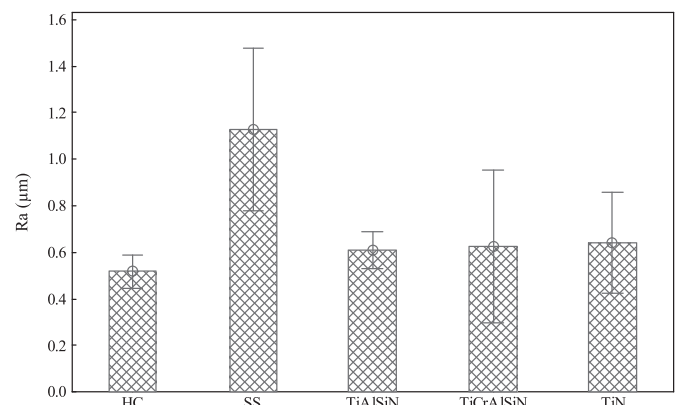


Fig. 3. Average roughness values of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks.

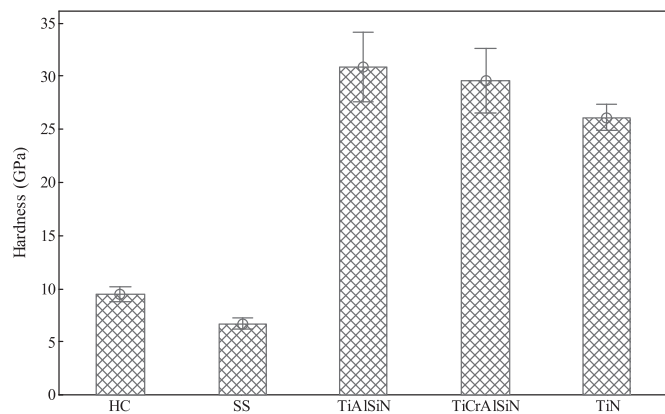


Fig. 4. Average hardness values of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks.

indifferent. The reduced surface roughness value after HC plating can be attributed to the employed plating condition with low current density and long plating time, allowing plated Cr atoms to uniformly fill in the surface cavities. Likewise, FCA provides high quality smooth coating on the hooks comparable with the electroplating process, which produces a much thicker coating layer.

Fig. 4 demonstrates the nano-indentured hardness values of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks. It can be seen that the average hardness value of HC-plated hooks (~ 9.7 GPa) is considerably higher than that of uncoated one (~ 6.6 GPa) and their values agree well with their standard values. With Ti-based coatings, the hardness values increase greatly and the TiAlSiN coating exhibits the highest hardness value (~ 31.6 GPa) while the TiCrAlSiN and TiN coatings have lower values of ~ 30.4 and ~ 26.4 GPa, respectively. The obtained hardness values are comparable with other reports in literature [7–15].

3.2. Wear behaviour

Fig. 5 illustrates the average weight loss of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks under the soft sliding wear test against nylon fibres with the sliding time in the range from 60 to 840 min. The weight loss data of all hooks are only reported up to the maximum sliding time defined previously in Section 2. It is seen that the cumulative weight loss of all hook samples increases rather linearly with increasing sliding time, conforming to a

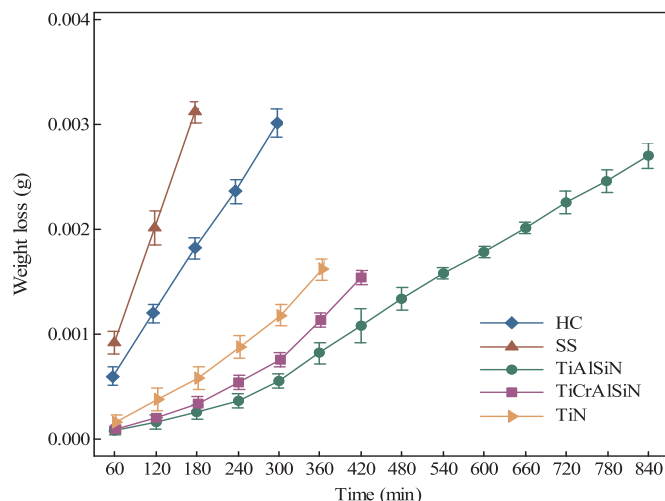


Fig. 5. Average weight loss versus sliding time of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks.

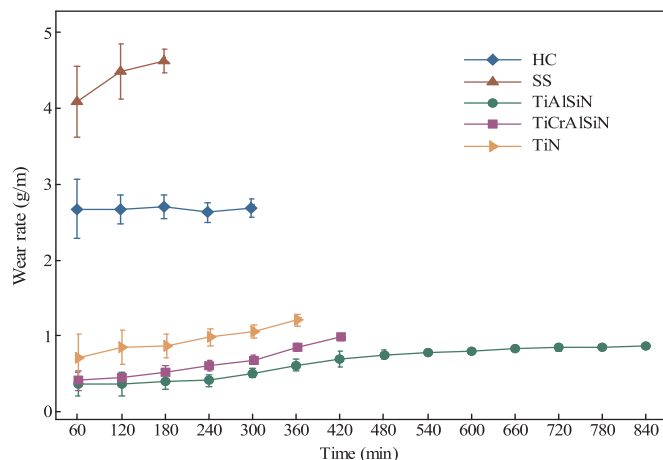


Fig. 6. Average wear rate versus sliding time of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks.

typical sliding wear behaviour. In addition, the uncoated SS hook exhibits the highest weight loss at a given sliding time and the shortest maximum sliding time of 180 min. Upon HC plating, the weight loss moderately reduces while the maximum sliding time increases considerably to 300 min. After applying Ti-based coatings, the weight loss decreases differently depending on the coating material. Among the three Ti-based coatings, TiAlSiN coating provides the lowest weight losses and the longest maximum sliding time of 840 min. In contrast, TiN coating shows the highest weight loss and the shortest maximum sliding time of 360 min. Interestingly, TiCrAlSiN coating displays relatively low wear performances compared with TiAlSiN coating, giving a substantially shorter maximum sliding time of 420 min. TiAlSiN coating on SS hook is thus proven to offer the highest soft-sliding wear resistance against a nylon fibre.

To further analyse the behaviour of weight loss, the corresponding wear rate was calculated by dividing the weight loss with the sliding distance as displayed in Fig. 6. With the present soft-sliding test parameters, the sliding time of 60 min corresponds to the sliding distance of 225 m. It can be seen that the wear rate behaviour depends considerably on coating. With no coating, the wear rates of SS hook is initially low and then increases quite quickly as the time increases from 60 to 120 min, followed by a slow rise as the time increases further up to 180 min. The initially low wear rate during the run-in stage may be due to initially low adhesive force between the soft nylon fibre and SS hook surface. As the run proceeds, the hook surface becomes increasing rough due to progressive wear of SS, leading to a higher adhesive force and a higher wear rate. In contrast, the wear rate of HC-plated SS hook is almost constant with slight fluctuations over the whole range of sliding time (60–300 min), indicating a steady adhesive force between the nylon fibre and thick HC layer. In the case of Ti-based coatings, their wear rates increase slowly as the sliding time increases from 60 min to their maximum sliding times. The slowly rising wear rate of Ti-based coatings may be due to their slowly increasing surface roughness with progressive wear under the soft-sliding process (to be subsequently illustrated in Fig. 8), which depends on the hardness of the coating. The increase of surface roughness in the hook still cannot be verified by the roughness tester since the probe tip cannot get into the hook regions. Special setup and instrument will be required for the measurement to be done in the future. Correspondingly, TiAlSiN and TiN coatings exhibit the smallest and largest increasing degrees of wear rate, respectively.

3.3. Microstructure analysis

The wear characteristics of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks were examined and

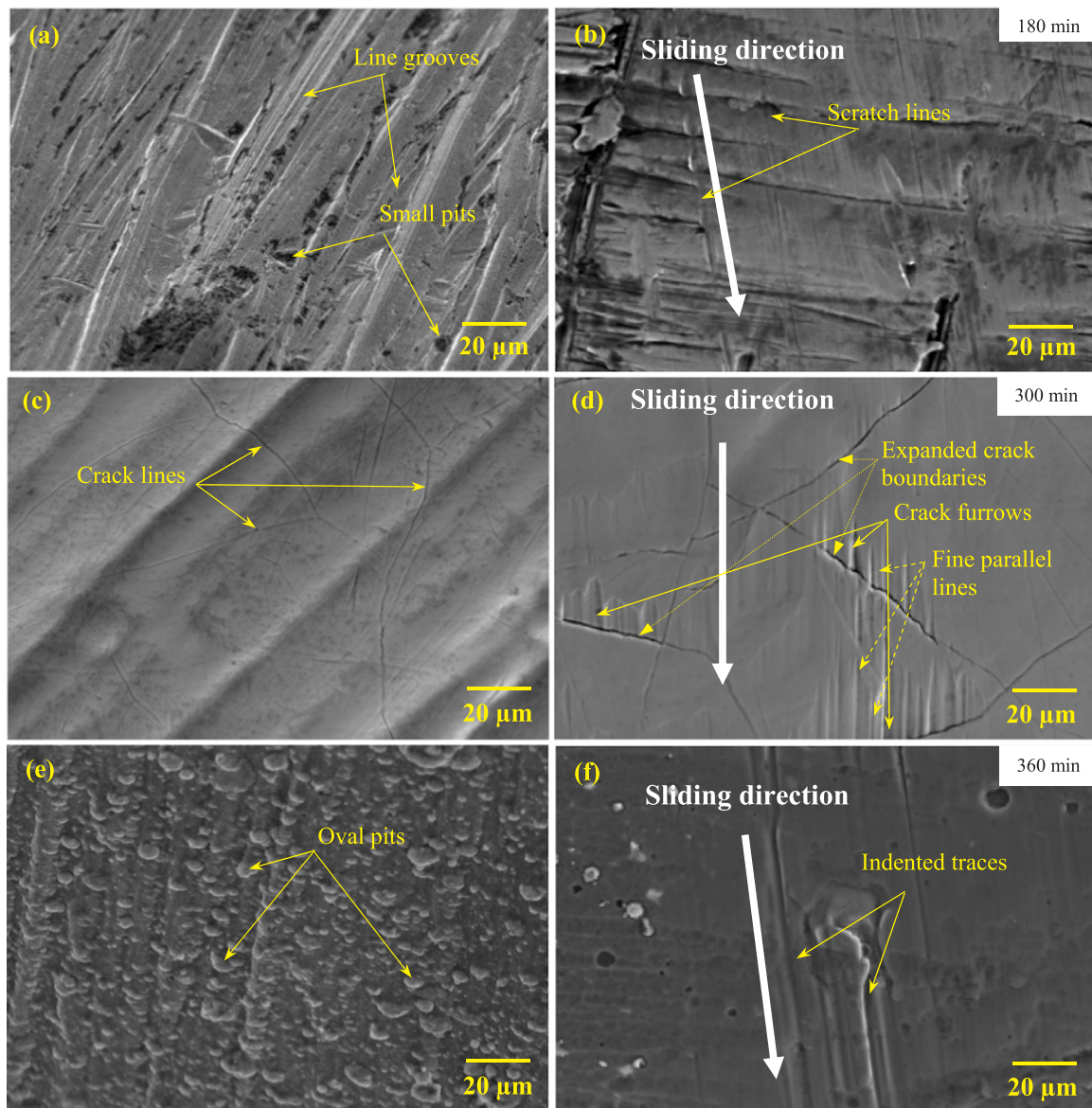


Fig. 7. SEM micrographs of uncoated SS hook (a) before and (b) after wear test, HC-plated SS hook (c) before and (d) after wear test, TiN-coated SS hook (e) before and (f) after wear test, TiAlSiN-coated SS hook (g) before and (h) after wear test and TiCrAlSiN-coated SS hook (i) before and (j) after wear test.

analyzed by SEM and EDX. The representative SEM images of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks before and after wear test are illustrated in Fig. 7. The EDX spectra of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks after wear test are demonstrated in Fig. 8 and the corresponding elemental composition tables before and after wear test are included in the insets. It should be noted that SEM images and EDX spectra after wear test of different hooks are presented here at their distinct maximum sliding times as labeled in the figures.

Before wear test, the bare SS hook (Fig. 7(a)) shows rather rough surface with semi-parallel line grooves and some small pits, which is a typical texture of surface produced by manual abrasive thread grinding and polishing. After dry soft-sliding test for 180 min (Fig. 7(b)), the surface becomes relatively smooth exhibiting very fine parallel scratch lines along the sliding direction. The corresponding EDX data (Table 1) reveal that the SS surface contains additional oxygen (O) and aluminum (Al) elements as well as relatively high level of carbon (C) after the wear test. The increase of C content and additional O element should come from the residue of nylon fibre on the hook surface, indicating the adherence of nylon fibre on surface which may lead to the adhesive

wear process. Nevertheless, this must be further verified with more accurate characterizations due to the large uncertainty of C content measured by EDX (see err% in Table 1). The appearance of a small Al content may arise from Al contamination on the nylon fibre, which was rolled from a reel made of Al.

After HC plating, the hook surface (Fig. 7(c)) is relatively smooth with less number of line and pit textures. However, there are additional fine distributed crack lines on the surface due possibly to stress developed in the very thick HC layer. Upon the dry soft-sliding test for 300 min (Fig. 7(d)), the surface is worn with mostly parallel fine lines along the sliding direction and expanded crack furrow around the wear track. In addition, the lines and furrows are particularly large and deep near the expanded crack boundaries, suggesting a fracture wear mechanism. The respective EDX data (Table 1) show a small increase of C content and the additional tiny peak of Al after the wear test, suggesting relatively low adhesion of nylon fibre and low Al contamination on the HC hook surface compared with the uncoated one.

With TiN coating, the surface of TiN-coated hook (Fig. 7(e)) is also quite smooth with no large line grooves but displays a shallow micron-size oval pit pattern. Upon the dry sliding test for 360 min (Fig. 7(f)),

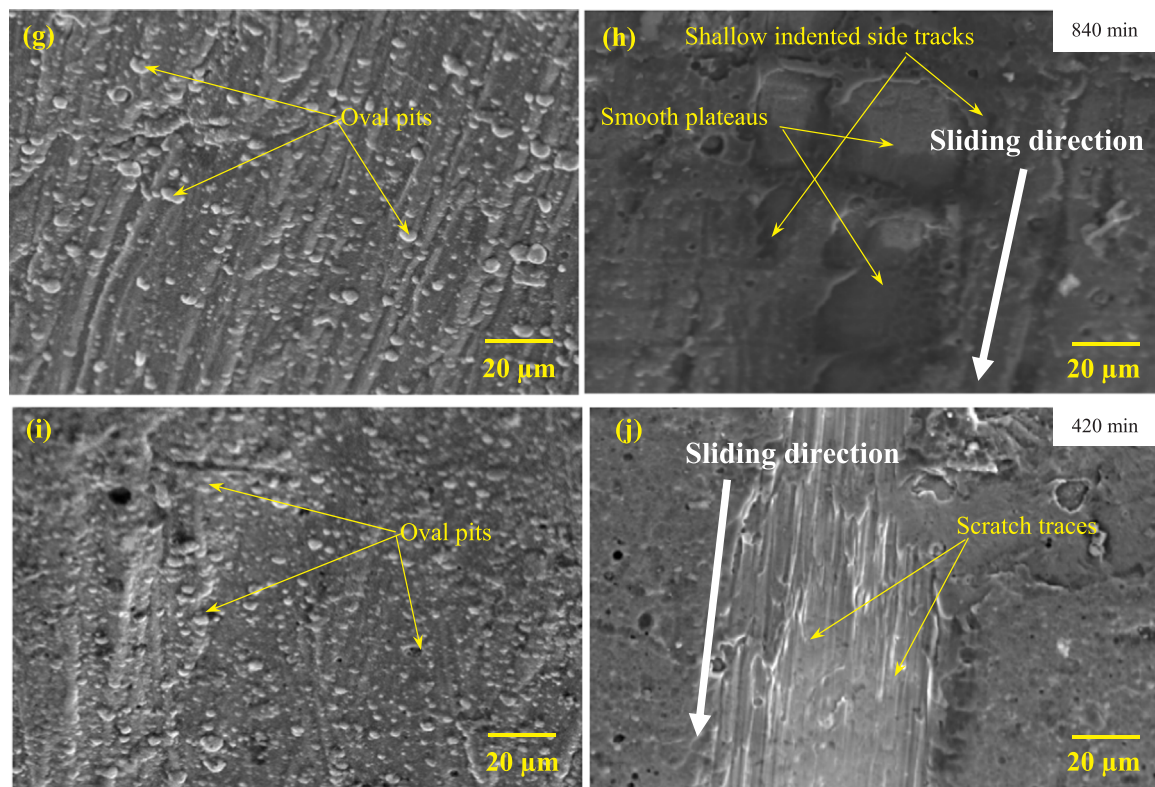


Fig. 7. (continued)

the pattern is largely faded away around the sliding contact area and some parallel indented traces along the sliding direction appeared at the centre of wear track. In addition, the density of indented traces is relatively low compared with those of uncoated and HC-plated ones, confirming moderately low dry sliding wear against nylon fibres due to the presence of TiN layer. The EDX data (Table 1) demonstrate that the layer before wear test comprises of the expected contents of Ti (38.9 at %) and N (41.57 at %) with small amounts of O due to oxidation (11.73 at %) and C (7.8 at %) due to organic contamination. In addition, there is no peak from substrate (Fe), confirming that the film is so thick that electron-solid interaction does not reach the underlying SS material. After the wear test, the amounts of Ti and N decrease slightly by around 10–15% while peaks of SS substrate, nylon fibre and contamination including Fe, C, O and Al arise with small magnitudes, indicating that the TiN layer has been partially worn down and a small amount of nylon material sticks on the worn surface.

In the case of the TiAlSiN-coated hook, the surface exhibits the oval indented pattern similar to the TiN-coated one (Fig. 7(g)) but the size and density of oval pits are lower. After the wear test for 840 min (Fig. 7(h)), the surface displays relatively smooth wear indentation along the sliding direction while the area surrounding the wear trace are also smoothen. In addition, the wear trace is somewhat unique comprising quite smooth plateaus and shallow indented side tracks. Thus, the wear of the TiAlSiN-coated hook appears to be relatively mild compared with that of TiN-coated one in accordance with the observed wear rate data (Fig. 6). From the corresponding EDX data (Table 1), the layer before wear test contains the film compositions of 16.98, 16.23, 1.2 and 46.57 at% for Ti, Al, Si and N, respectively. It is seen that the TiAlSiN film before the wear test has approximately the same Ti and Al atomic contents while Si is a minor constituent. In addition, there is a small O content (9.07 at %) due to oxidation, a small C amount (7.68 at %) from organic contamination and a small Cr concentration (2.27 at %) from underlying TiCrAlSiN and Cr adhesive layers while the substrate peak (Fe) is absent. After the wear test, the contents of Ti, Al, Si and N decrease slightly by around 10–20% while the magnitudes of Cr and Fe

increase because the TiAlSiN layer is thinned down leading to deeper electron penetration into adhesive layers and substrate. The slight increases of C and O contents imply the slight adherence of nylon fibre. The results demonstrate the superior wear resistant characteristics of TiAlSiN coating, which may be partly attributed to its relatively high effective hardness according to nano-indentation measurements.

Regarding TiCrAlSiN coating, the coated hook surface before wear test similarly exhibits an oval pitted pattern like TiAlSiN ones (Fig. 7(i)). After the 420-min dry sliding test (Fig. 7(j)), the surface displays scratch traces along the sliding directions similar to those of TiN-coated one but with a relatively high trace density, indicating considerable sliding wear despite the use of TiCrAlSiN layer in accordance with the observed high wear rate data (Fig. 6). The EDX data (Table 1) show the presence of Ti, Al, Cr, Si and N in the deposited layer with the elemental contents of 6.39, 11.42, 6.56, 0.9 and 60.86 at%, respectively. It is seen that the composite film is Al-rich having Al content about twice as high as those of Ti and Cr with very small fraction of Si. Similar to other Ti-based coatings, it contains small amounts of O (6.6 at %) and C (7.27 at %) while the substrate contribution (Fe) is absent. After the wear test, the amounts of Ti, Al, Si and N decrease moderately by around 15–25% while Cr, C, O and Fe contents increases, implying that the TiCrAlSiN layer has been partly worn out and nylon material slightly adheres on the surface. It should be noted again that the Cr content increases as the TiCrAlSiN layer is thinner because of deeper electron interaction with the underlying Cr adhesive layer.

From the results, the TiAlSiN coating offers the best wear resistant characteristics with the lowest weight loss and the longest maximum sliding distance of 189 km (840×225 m). The microstructural data based on SEM and EDX confirms that the TiAlSiN coating exhibits relatively mild wear compared with other Ti-based as well as thick HC coatings. According to morphological observations, the wear mechanism of Ti-based coated as well as uncoated SS hooks should be based on the mild adhesive wear while that of HC involves adhesive fracture mechanism. To gain an insight into the wear mechanism, SEM

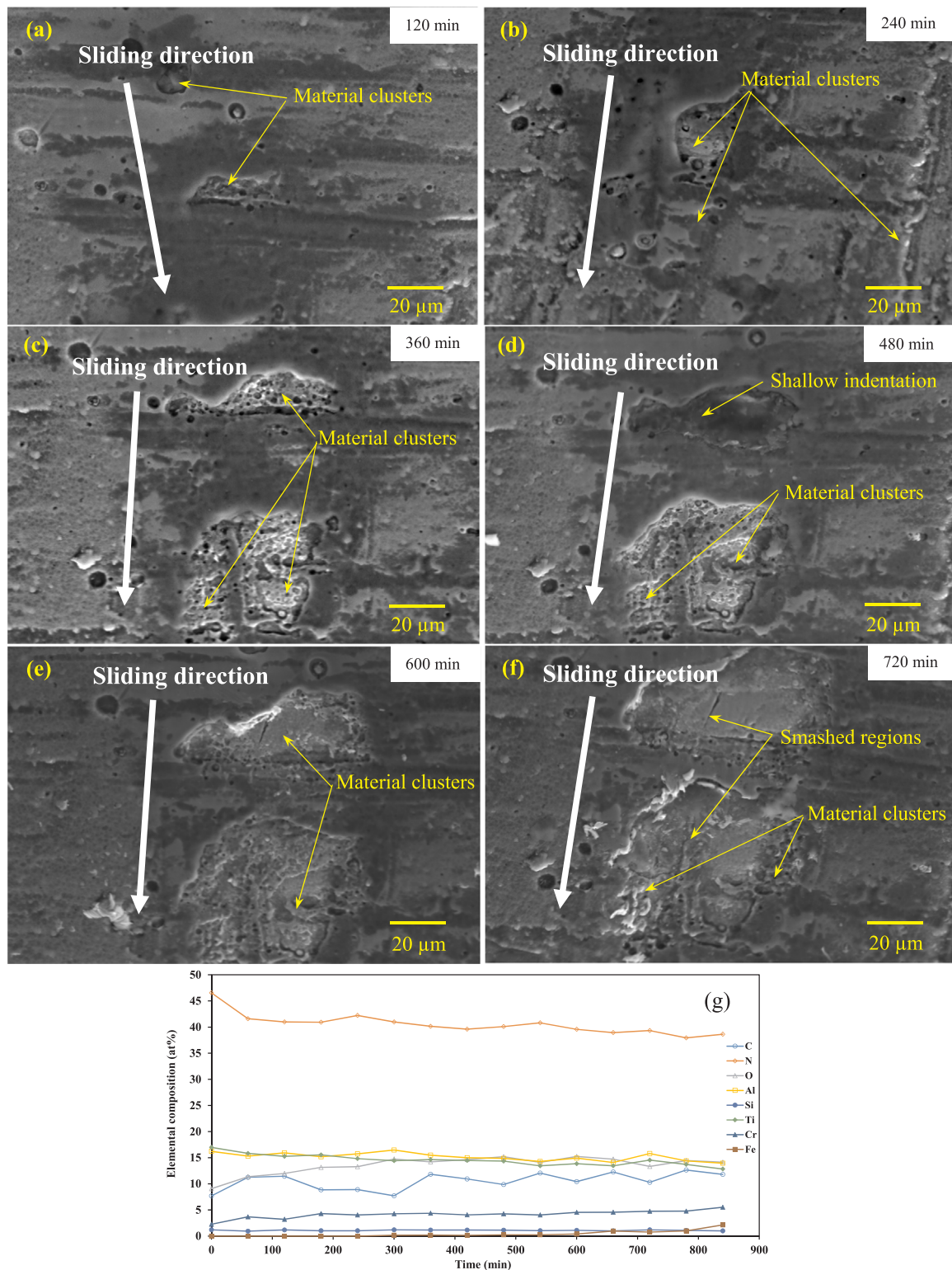


Fig. 8. SEM micrographs of TiAlSiN-coated SS hook after sliding test for (a) 120, (b) 240, (c) 360, (d) 480, (e) 600 and (f) 720 min and (g) EDX elemental compositions of various elements as a function of sliding time.

and EDX analyses were performed at various sliding times as illustrated for the TiAlSiN coating in Fig. 8. It is seen that the surface around sliding contact area is already largely smoothed after sliding against the nylon fibre for 120 min while some small and shallow clusters of material with corrugated morphologies appear sporadically on the smooth background (Fig. 8(a)). According to spot EDX analysis, the material is carbon and oxygen rich so it is most likely to be nylon

clusters detached from the fibre. As the sliding time increases to 240 min, the nylon clusters spread more widely over the area while their sizes remain rather small (Fig. 8(b)). At the longer sliding time of 360 min, there are relatively few larger nylon clusters, which may be formed by the accumulation of smaller clusters due to material migration under continuous sliding action (Fig. 8(c)). When the sliding time increases further to 480 min, the material from the top cluster is

Table 1

EDX Elemental composition tables of uncoated, HC-plated, TiN-coated, TiAlSiN-coated and TiCrAlSiN-coated SS hooks before and after wear test.

Material sliding time	Test status	Elemental composition (at%)									
		C K	N K	O K	Al K	Si K	Ti K	Cr K	Mn K	Fe K	Ni K
SS 180 min	Before test	9.1 ± 2.1	–	–	–	1.5 ± 0.2	–	19.6 ± 0.8	1.7 ± 0.2	62.6 ± 2.3	5.5 ± 0.4
	After test	25.4 ± 3.8	–	5.9 ± 0.8	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1	–	14.7 ± 2.4	0.9 ± 0.1	47.2 ± 1.9	4.8 ± 0.4
HC 300 min	Before test	8.6 ± 1.9	–	–	–	–	–	91.4 ± 4.5	–	–	–
	After test	9.4 ± 1.3	–	–	0.7 ± 0.1	–	–	89.9 ± 5.4	–	–	–
TiN 360 min	Before test	7.8 ± 1.5	41.6 ± 6.4	11.7 ± 0.9	–	–	38.9 ± 1.4	–	–	–	–
	After test	10.3 ± 1.5	38.8 ± 6.1	14.3 ± 1.2	0.1 ± 0.01	–	33.4 ± 1.4	–	–	3.2 ± 0.1	–
TiAlSiN 840 min	Before test	7.7 ± 1.9	46.6 ± 6.6	9.1 ± 0.3	16.2 ± 1.1	1.2 ± 0.2	17.0 ± 0.7	2.3 ± 0.3	–	–	–
	After test	12.8 ± 2.0	38.6 ± 5.1	13.2 ± 1.9	14.0 ± 0.6	1.0 ± 0.2	12.8 ± 0.5	5.5 ± 0.4	–	2.1 ± 0.3	–
TiCrAlSiN 420 min	Before test	7.3 ± 1.8	60.9 ± 8.8	6.6 ± 0.7	11.4 ± 0.6	0.9 ± 0.2	6.4 ± 0.3	6.6 ± 0.4	–	–	–
	After test	8.6 ± 1.4	42.5 ± 6.6	11.1 ± 0.9	9.8 ± 0.8	0.8 ± 0.1	5.6 ± 0.4	17.4 ± 0.6	–	4.3 ± 0.5	–

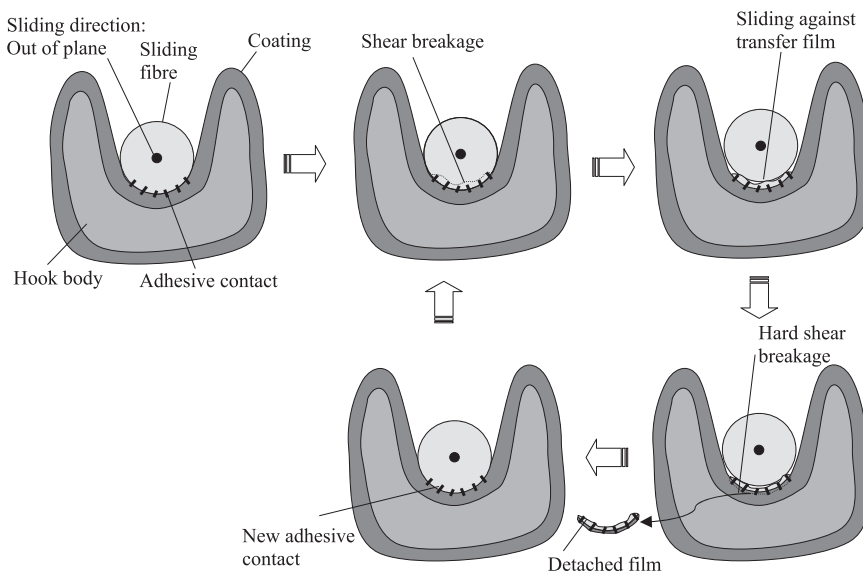
largely removed, leaving a shallow indentation appeared as a darker region while the material cluster located downstream becomes correspondingly larger, implying material transfer from one cluster to another (Fig. 8(d)). Subsequently, the nylon material is re-accumulated around the same regions and becomes increasingly large as the sliding time increases to 600 min (Fig. 8(e)). When the sliding time increases further to 720 min (Fig. 8(f)), the material clusters are smashed away again and becomes largely fainter at the maximum sliding time to 840 min (Fig. 7(h)). The corresponding elemental compositions of various elements as a function of sliding time are demonstrated in Fig. 8(g). It can be seen that the elemental contents of the film including Ti, Al, Si and N decrease slowly while those of Cr, O and Fe increase gradually with increasing sliding time, confirming the mild wear of TiAlSiN coating. In contrast, the C content, which should be primarily from nylon, is fluctuating with sliding time, indicating alternate deposition and abstraction of nylon material around the sliding contact in accordance with the SEM observation. However, it is a paradox that the O content, which is also a component of nylon material, does not fluctuate in similar manner but increases slowly with increasing sliding time. A possible explanation is that the film is increasingly oxidized with increasing sliding time due to elevating temperature around the dry sliding contact and the oxygen content mainly arises from the oxidized layer on surface.

A mechanistic wear model of a hard solid hook surface under continuous dry sliding against a soft polymeric fibre is proposed according to the experimental observations as depicted in Fig. 9. When a softer polymeric fibre is sliding through the harder hook surface, the softer asperities that are strongly adhered to the hard metal surface at an

adhesive contact will undergo plastic shear deformation until a shear breakage occurs, forming a corrugated transfer film on the hard surface [20]. Subsequent sliding will induce relatively high friction force on the rough transfer film leading to partial removal of the film material and second shear breakage into the hard surface.

The rough transfer film along with hard surface material will be detached eventually from the hook due to following sliding force, resulting in the adhesive wear of hard material. The processes of transfer film formation and detachment will be repeated leading to progressive adhesive wear and poor structural functionality when excessive deformation occurs at a maximum sliding distance. The wear rate based on this mechanism will depend mainly on the adhesive force between the hard and soft material surfaces. The adhesive force can be affected by several factors including surface roughness, hardness of the harder material, surface geometry and chemical interaction between the two materials. The higher surface roughness generally leads to higher adhesive force due to larger contact area. In contrast, the higher hardness of the harder material results in the lower adhesive force due to higher atomic self-adherence [16].

The uncoated SS hook exhibits high surface roughness but low hardness, leading to very high adhesive force with nylon fibre and very high wear rate. According to the material characterization results, the surface roughness is changed along with the material after coating, leading the compound effects of material and roughness on the wear performances. It is thus not possible to assess only the effects of material change. For the HC-plated one, the surface roughness decreases while the hardness increases, leading to a relatively low wear rate due to the compound effects. With Ti-based coatings, the surface roughness

**Fig. 9.** Wear mechanism of a hard solid hook under continuous soft-sliding against a polymeric fibre.

is considerably lower whereas the hardness becomes higher resulting in much lower wear rates compared with the uncoated one. However, if compared the results among different coatings, the surface roughness values of HC and different Ti-based coatings are comparable so the variation in wear rate should be mainly attributed to the effect of material change. From the results, TiAlSiN, TiCrAlSiN, TiN and HC coatings exhibits the lowest to highest wear rates in accordance with their measured hardness values. Therefore, the wear performances improve accordingly with increasing hardness of material with similar surface roughness values. Moreover, it can be expected that the SS hook would wear less if it had lower surface roughness. This expectation may be confirmed by ultrafine polishing of the SS hook in the future.

Nevertheless, the adhesive wear mechanism alone cannot explain some specific behaviours observed in the experimental data. In particular, it is interesting that TiCrAlSiN coating displays much more rapid increase of wear with increasing sliding time and much lower maximum sliding distance compared with TiAlSiN coating although TiCrAlSiN has only slightly smaller hardness than TiAlSiN. This paradox may be explained by an additional oxidation mechanism. As the sliding time and distance increase, the mechanical energy loss in dry sliding action is transformed to heat energy, causing a temperature rise and surface oxidation in air. The oxidized surface is hard having low adhesive interaction with polymer and may help limiting adhesive wear with increasing sliding distance. TiAlSiN can form a stable oxidized layer with $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ phases so that adhesive wear can be limited when the temperature increases with increasing sliding distance. With Cr addition, TiCrAlSiN will be less oxidized due to anti-oxidation property of Cr and adhesive wear will be less limited as the contact temperature increases. In the case of HC-plated one, it is also observed that the wear surface is distinct from other cases containing cracks and expanded line pits near crack boundaries. In this case, the initial cracks already present in the HC thick layer are quickly propagated during initial material removal force by the adhesive wear process leading to quicker material detachment via the fracture wear mechanism. Thus, the HC-plated hook exhibits rather high wear rate despite its low surface roughness.

4. Conclusions

The aim of this work was to study the wear behaviours and mechanisms of Ti-based coatings deposited by FCA on SS machine components, namely hooks, under dry soft-sliding against a nylon fibre. In order to address this challenge, a set of dry soft-sliding tests were conducted on AISI 316 SS hooks with FCA-deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN films along with uncoated and HC-plated ones. Based on the results, the following primary conclusions were drawn:

- 1) Ti-based coatings offered substantially better wear resistance improvement for SS hooks and can effectively protect the SS surface over a longer sliding distance than HC plating in an accelerated dry soft-sliding condition of a fishing net-weaving machine.
- 2) Among the three Ti-based coatings, TiAlSiN coating offered the best dry soft-sliding wear resistant characteristics with the lowest wear rate and the longest maximum sliding distance of 189 km, which was about 5 times as high as that of uncoated one due to superior hardness and chemical properties.
- 3) Microstructural analyses suggested that the wear mechanisms of hard tool surface such as TiAlSiN mainly involved repetitive two-step adhesive wear processes including a corrugated transfer film onto the hard surface and the subsequent detachment of transfer film along with the outermost layer of hard material.

- 4) The HC-plated hook exhibited rather high wear rate despite its low surface roughness due to rapid material detachment by the adhesive fracture wear mechanisms.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Office of the Higher Education Commission of Thailand and the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant no. RSA 5980025 for the financial supports of this research.

References

- [1] G. Paller, B. Matthes, W. Herr, E. Broszeit, Tribological properties of R. F. sputtered titanium based hard coatings and their behaviour under plastic-processing conditions, *Mater. Sci. Eng. A* 140 (1991) 647–654Y.
- [2] S. Hofmann Otani, High temperature oxidation behaviour of $(\text{Ti}1 - x\text{Cr}x)\text{N}$ coatings, *Thin Solid Films* 287 (1996) 188–193.
- [3] W.D. Munz, Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings, *J. Vac. Sci. Technol. A* 4 (1986) 2717–2722.
- [4] S. PalDey, S.C. Deevi, Single layer and multilayer wear resistant coatings of $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$, *Mater. Sci. Eng. A* 342 (2003) 58–79.
- [5] L. Chen, J. Paulitsch, Y. Du, P.H. Mayrhofer, Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings, *Surf. Coat. Technol.* 206 (2012) 2954–2960.
- [6] F. Vaz, L. Rebouta, M. Andritschky, M.F. da Silva, J.C. Soares, The effect of the addition of Al and Si on the physical and mechanical properties of titanium nitride, *J. Mater. Process. Technol.* 92–93 (1999) 169–174.
- [7] Z.L. Wu, Y.G. Li, B. Wua, M.K. Lei, Effect of microstructure on mechanical and tribological properties of TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 503 (2015) 197–205.
- [8] H.C. Barshilia, M.G. Shashidhara, R. Ramakrishna, K.S. Rajam, Deposition and characterization of TiAlSiN nanocomposite coatings prepared by reactive pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* 256 (2010) 6420–6426.
- [9] T. Chen, Z.W. Xie, F. Gong, Z.Z. Luo, Z. Yang, Correlation between microstructure evolution and high temperature properties of TiAlSiN hard coatings with different Si and Al content, *Appl. Surf. Sci.* 314 (2014) 735–745.
- [10] S.K. Kim, P.V. Vinh, J.W. Lee, Deposition of superhard nanolayered TiCrAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) 5395–5399.
- [11] T.D. Nguyen, S.K. Kim, D.B. Lee, High-temperature oxidation of nano-multilayered TiCrAlSiN thin films in air, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2009) 697–704.
- [12] K. Tsuchida, K. Wathanyu, S. Surinphong, Thermal Oxidation Behaviour of TiCrAlSiN and AlCrTiN Films on HastelloyX, *Adv. Mater. Res.* 486 (2012) 400–405.
- [13] R.P. Martinho, M.F.C. Andrade, F.J.G. Silva, R.J.D. Alexandre, A.P.M. Baptist, Micro-abrasion wear behaviour of TiCrAlSiN nanostructured coatings, *Wear* 267 (2009) 1160–1165.
- [14] N. He, H. Li, L. Ji, X. Liu, H. Zhou, J. Chen, High temperature tribological properties of TiAlSiN coatings produced by hybrid PVD technology, *Tribol. Int.* 98 (2016) 133–143.
- [15] D.H. Yu, C.Y. Wang, X.L. Cheng, F.L. Zhang, Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology, *Thin Solid Films* 517 (2009) 4950–4955.
- [16] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [17] D.M. Kennedy, M.S.J. Hashmi, Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials, *J. Mater. Proc. Technol.* 77 (1998) 246–253.
- [18] N. Intanon, C. Saikaew, Effect of surface treatments on wear resistance of spring steel wire as a work-piece material of a fishing net-weaving machine component, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 23 (2016) 79–87.
- [19] W. Luo, Q. Liu, Y. Li, S. Zhou, H. Zou, M. Liang, Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber, *Compos. B: Eng.* 91 (2016) 579–588.
- [20] L. Yu, S. Bahadur, An investigation of the transfer film characteristics and the tribological behaviors of polyphenylene sulfide composites in sliding against tool steel, *Wear* 214 (1998) 245–251.
- [21] Z. Chen, T. Li, Y. Yang, X. Liu, R. Lv, Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends, *Wear* 257 (2004) 696–707.
- [22] S.-H. Wu, F.-Y. Wang, C.-C. Ma, W.-C. Chang, C.-T. Kuo, H.-C. Kuan, W.-J. Chen, Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites, *Mater. Lett.* 49 (2001) 327–333.
- [23] N. Intanon, P. Srisattayakul, C. Saikaew, Design and fabrication of wear testing machine for a fishing net-weaving machine component, *Adv. Mater. Res.* 896 (2014) 706–709.

EFFECTS OF HARD CHROME AND MoN-COATED STAINLESS STEEL ON WEAR BEHAVIOUR AND TOOL LIFE MODEL UNDER TWO-BODY ABRASION WEAR TESTING

Received – Primljeno: 2017-02-27

Accepted – Prihvaćeno: 2017-05-10

Original Scientific Paper – Izvorni znanstveni rad

The objectives of this study were to investigate the effect of the electroplated hard chrome (HC) and the MoN-coated AISI 316 stainless steel coatings on weight loss under two-body abrasion wear testing and to predict the tool life of both materials used as a fishing net-weaving machine component, namely the hook. Both materials were used to carry out the wear experiments under two-body abrasion behavior. These specimens were wear tested with the in-house wear testing apparatus base on ASTM: G133-05 standard. The Taylor's equation was used to formulate the tool life model whereas the Monte Carlo simulation was used to predict the tool life of the machine part. The results showed that the MoN-HC exhibited higher wear resistance than that of the HC.

Key words: AISI 316 stainless steel, coatings, abrasion wear testing, properties, Taylor's equation, Monte Carlo

INTRODUCTION

The two-body abrasion process is a hard particles matched two-surface damages during relative sliding [1]. It is observed when a matter comes into contact with abrasive material [2]. Two-body abrasive wear was a type of wear which was frequently found in manufacturing processes such as drilling, turning, milling operations, and other industries.

Applications of coated machine-parts increase the efficiency and quality of the parts. Sovilj et al. examined the effect between base material and TiN-hard coating [3] whereas Bidulsky et al. studied the sliding wear between sintered and PVD coated surfaces on chromium steel [4].

Deposition metal nitrides were popularly studied for wear resistant coatings because this coating method increased the wear resistant properties e.g. high hardness, low compressibility and good thermal/chemical stability [5]. The properties of MoN are typically important for wear resistance, crack resistance, and corrosion resistance [6-8]. Srisattayakul et al. studied the three coating factors affecting the elastic modulus and weight loss of the MoN coating on a fishing net-weaving machine component, namely the hook for improving the quality of the hook [9, 10]. The machine component, which is normally made of stainless steel is very important for producing the fishing net. If the component is not of good quality as shown in Figure 1, it causes damage to the fishing net. The fishing net manufacturer needs to



Figure 1 The damage to hooks on fishing net weaving process.

replace the new hook before the component wears out. Hence the prediction model of the component life of the fishing net-weaving machine component should be studied.

Previously, many researchers used the Taylor's equation as a powerful methodology for the tool life prediction models. Karandikar et al. used this equation in conjunction with the Markov Chain Monte Carlo approach for the tool life prediction model of carbide tool for turning MS309 steel work material [11]. The tool life model and tool wear mechanism analysis of carbide tools for martensitic S41000 and supermartensitic S41426 turning were investigated using the Taylor's equation [12].

Since the two-body abrasion is a stochastic process and the worn surfaces reveal strong statistical characteristics, the classical mathematical models are not appropriately used to predict the wear rate. Fang et al. verified that the relations of material hardness, particle size and normal load with wear rate between the Monte Carlo simulation and the two-body abrasion tests were

P. Srisattayakul, C. Saikaew, Department of Industrial Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen Thailand and A. Wisitsoraat, National Electronics and Computer Technology Center, Pathumthani Thailand.

in good agreement [1]. Furthermore, Fang et al. also employed the Monte Carlo simulation to compare the plastic deformation wear prediction with the three-body abrasion experiments using spherical abrasive particles with different distribution sizes [13].

In this work, the influence of the electroplated hard chrome (HC) and the MoN coating on the weight loss under two-body abrasion wear testing was investigated. In addition, tool life models of the hook were created for the HC and the MoN-coated AISI 316 stainless steel using Taylor's equation and Monte Carlo simulation in order to improve the quality and operational tool life of the hook.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

The hook was made of AISI 316 stainless steel, which chemical elements included 0,2 %-0,3 %C, 18 %-23 %Cr, 1,0 % - 1,5 %S 1,25 % - 2,50 %Ni and 1 %Mn. The mechanical properties of the specimen were density 8,07 Mg/m³, compressive strength 310 MPa, ductility 0,51, elastic limit 310 MPa, endurance limit 307 MPa, hardness 2 200 MPa, poisson's ratio 0,275, shear modulus 82 GPa, tensile strength 620 MPa, young's modulus 205 GPa and melting point 1 673 K.

Previously, the sliding wear tester used principle between the pin-on-disc (ASTM: G99) and block-on-ring (ASTM: G77) for lower hook of fishing net-weaving machine [14]. The two-body abrasive wear characteristics of MoN, MoC, and MoCN coatings by DC magnetron sputtering on AISI 316 stainless steel were investigated using test a reciprocating pin-on-flat which is homologous to that of ASTM G133-05 standard [15]. In this work, the reciprocating dry sliding wear test was prepared the wear tester according to the ASTM: G133-05 standard. The schematic illustration of the wear tester apparatus is shown in Figure 2.

The specimens were separated into two groups namely, HC coated on stainless steels (SS) by electroplating (SS-HC) and MoN coated on SS-HC by DC-magnetron sputtering (MoN-HC). All specimens were subjected to the wear test condition for SiC-abrasive paper (Grit#1000), with in applied load range of 5 N and 10 N, a speed of 70 rpm, a stroke length of 15 mm

and continuous sliding time range of 40 min with four replicates in each test condition.

RESULTS AND DISCUSSION

The weight loss was used to characterize the influences of SS-HC and MoN-HC on the weight loss under two-body abrasion wear testing with the testing time range from 40 to 880 min. The weight loss of the hook has a major negative effect on the surface and the quality of the component and the fishing net when the weight loss value reaches a certain level of 0,05 g. The weight loss values of both SS-HC and MoN-HC were plotted as a function of sliding time with applied load range of 5 N and 10 N, which is illustrated in Figure 3. It was noted that weight loss increased with the increase of applied load for both materials. The MoN-HC depicted less serious wear than the SS-HC. This indicated that MoN-coated AISI 316 stainless steel had longer life than the electroplated hard chrome for producing the fishing net-weaving machine component.

Life of the hook model was derived from Taylor's equation based on the results of the weight loss values as the function of sliding time with applied load range of 5 N and 10 N. The basic Taylor's equation was developed to relating life of the hook to the main wear experimental parameter (i.e., applied load) shown in Equation (1):

$$L(T)^n = C \quad (1)$$

where T is the life of the hook (min), L is the applied load (N). Furthermore, n and C are the life of the hook constants, whose values depend on wear testing conditions and workpiece materials.

Based on the results as illustrated in Figure 4, the sliding times corresponding to the average weight loss values at the threshold level of 0,05 g with applied load range of 5 N and 10 N of both materials are shown in Table 1. These values were used to develop the life models of both materials by the Taylor's equation.

The life models of both materials modified by the Taylor's equation were formulated as follows:

$$L(T)^n = C$$

$$n \log T - \log C = - \log L$$

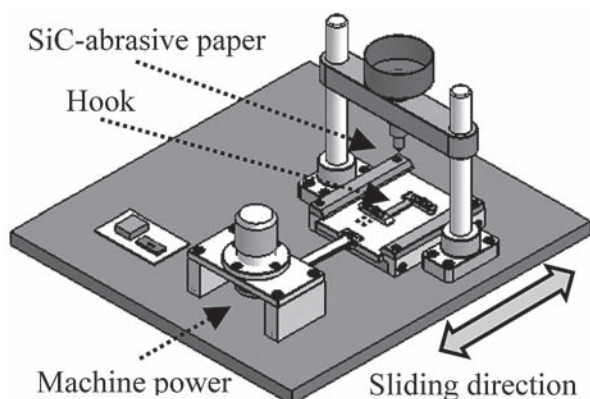


Figure 2 Schematic illustration of the wear tester

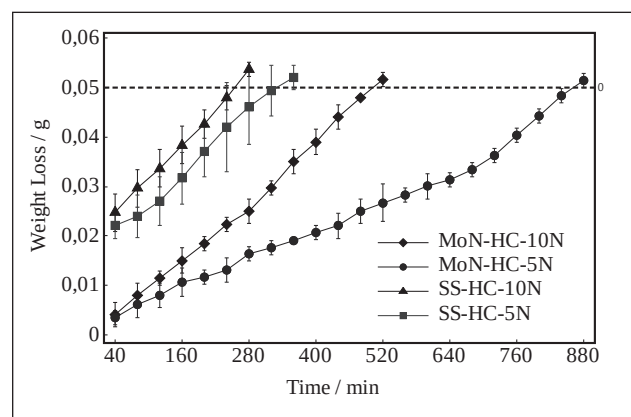


Figure 3 Average weight loss versus sliding time of SS-HC and MoN-HC

Table 1 Sliding time corresponding to the average weight loss values at the level of 0,05 g of SS-HC and MoN-HC

SS-HC		MoN-HC	
5 N	10 N	5 N	10 N
320 min	250 min	320 min	250 min

The unknown constants of the models were calculated based on the modified Taylor's equation and the results in Table 1. Therefore, the life model of SS-HC was obtained as follows:

$$L(T)^{1,278} = 28\,135,7845 \quad (2)$$

which was expressed as Equation (3)

$$T = \left(\frac{28\,135,7845}{L} \right)^{\frac{1}{1,278}} \quad (3)$$

Similarly, the life model of MoN-HC was determined as follows:

$$L(T)^{2,8072} = 53948\,348,77 \quad (4)$$

which was expressed as Equation (5)

$$T = \left(\frac{53\,948\,348,77}{L} \right)^{\frac{1}{2,8072}} \quad (5)$$

Not only the life models of both materials can be estimated by the modified Taylor's equation, but variation of the life values of both materials can be achieved by using a Monte Carlo simulation. In fact, the applied load normally varies during the wear testing on the wear testing apparatus. Hence the Monte Carlo method applied the principle's normal distribution by specifying the mean and standard deviation for input at a confidence level of 90 %. The applied load consisting of 6 levels (5N, 6N, 7N, 8 N, 9 N and 10N) was assigned as the input to generate random data set for each applied load by specifying the mean for the applied load and the standard deviation for the variation of each applied load. Each level of applied load generated the random data set of 1 000 that followed normal distribution. The result of the Monte Carlo simulation for the life models of the SS-HC and MoN-HC is presented in Figure 4.

Considering the Monte Carlo simulation for the life models of the two materials, all life values of the MoN-HC exhibited a longer life than those of the SS-HC at all

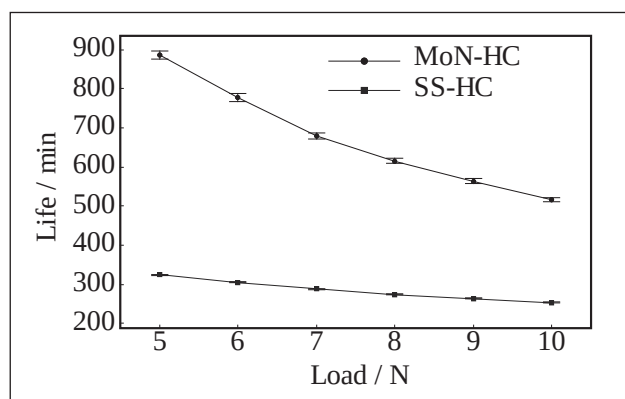


Figure 4 The Monte Carlo simulation for the life models of SS-HC and MoN-HC

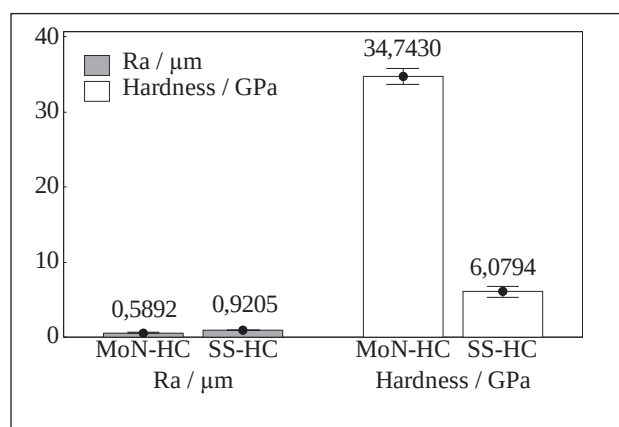


Figure 5 Hardness and Ra- values of SS-HC and MoN-HC

applied loads at least 100 %. In addition, variations of life values at each of applied loads of the MoN-HC were larger than those of the SS-HC. All life values of the MoN-HC were higher than those of the SS-HC that may be attributed to their greater hardness and higher surface smoothness.

The hardness values of the specimens were measured by a nanoindenter. According to Figure 5, the nano-indented hardness values of MoN-HC (~ 34,7430 GPa) were higher than those of the SS-HC (~ 6,0794 GPa). The average roughness values (Ra-values) of the MoN-HC (~ 0,5892 μm) were lower than those of the SS-HC (~ 0,9205 μm) as shown in Figure 5. Since MoN-coated AISI 316 stainless steel by sputtering tends considerably reduce Ra-values, the sputtered MoN is good for surface smoothing.

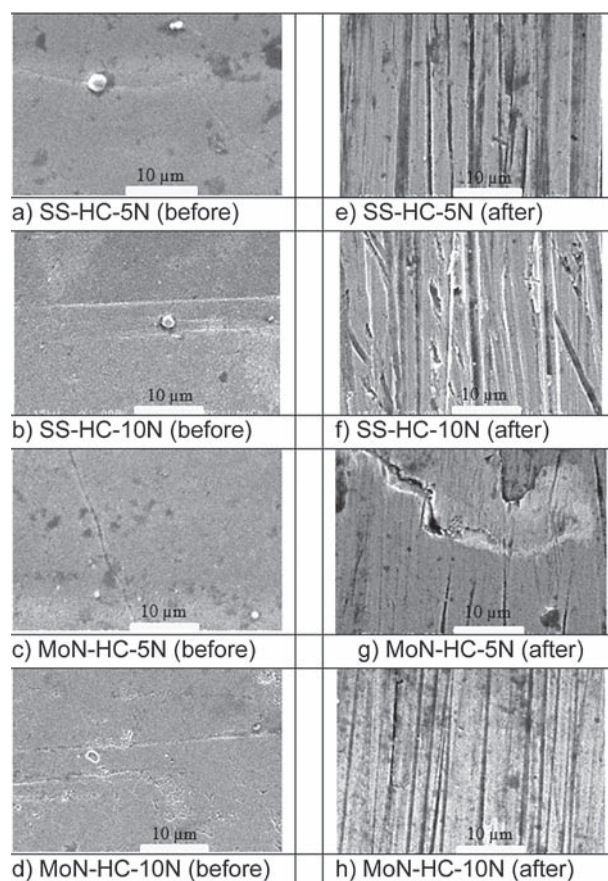


Figure 6 The SEM micrographs of SS-HC and MoN-HC

Figure 6 demonstrates the scanning electron microscope (SEM) micrographs of specimens under the applied load range of 5 N and 10 N. Before the wear test, the SS-HC (Figures 6 (a) and (b)) showed rather rough surface free from pits, dimples and line grooves while the MoN-HC (Figures 6 (c) and (d)) found little. After reciprocating test until reaching the weight loss of 0,05 g, the surfaces were mostly worn in parallel line grooves along the reciprocating directions as shown in Figures 6 (e), (f), (g) and (h). It was noted that the SS-HC had larger pits, dimples and line grooves more than those of the MoN-HC. In addition, the applied load affected the quantity of defects which appeared on the surfaces.

CONCLUSIONS

In this work, the Taylor's equation in conjunction with Monte Carlo simulation was used to construct the tool life model for prediction of the electroplated hard chrome and the MoN-coated AISI 316 stainless steel used as the fishing net-weaving machine component under two-body abrasion wear testing. Base on the comparison of test results, the following conclusions may be included:

- The MoN-HC coating showed the best life behavior compared with the SS-HC.
- All life values of the MoN-HC were longer than those of the SS-HC at all applied loads at least 100 %.
- The variations of life values at each of applied loads of the MoN-HC were larger than those of the SS-HC.
- The SS-HC had larger pits, dimples and line grooves more than the MoN-HC.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge financial support from the Office of the Higher Education Commission of Thailand and the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant No. RSA 5980025 for the financial supports of this research.

REFERENCES

- [1] L. Fang, J.D. Xing, W.M. Liu, Q.J. Xue, G.Q. Wu, X.F. Zhang, Computer Simulation of Two-body Abrasion Processes, *Wear* 251 (2001), 1356-1360.
- [2] T. Ohatani, K. Kamasaki, C. Tanaka, On Abrasive Wear Property during Three-body Abrasion of Wood, *Wear* 255 (2003), 60-66.
- [3] B. Sovilj, I. Sovilj-Nikic, D. Jesic, The Effect of Specific Relationship between Material and Coating on Tribological and Protective Features of the Product, *Metalurgija* 51 (2012), 21-24.
- [4] R. Bidulsky et al., Sliding Wear of Coated Prealloyed Sintered Chromium Steel, *Strojstvo* 55 (2013), 197-201.
- [5] Z.X. Yang, X.Y. Kuang, Z.H. Wang, M.M. Zhong, X.F. Huang, The Mechanical Properties of MoN Under High Pressure and Effect of Metallic Bonding on its Hardness, *Solid State Sciences* 28 (2014), 20-25.
- [6] C. Sarioglu, U. Demirler, M.K. Kazmanlib, M. Urgan, Measurement of Residual Stresses by X-ray Diffraction Techniques in MoN and Mo2N Coatings Deposited by Arc PVD on High-speed Steel Substrate, *Surface & Coatings Technology* 190 (2005), 238-243.
- [7] H. Hazar, Characterization of MoN Soatings for Pistons in a Diesel Engine, *Materials & Design* 31 (2010), 624-627.
- [8] T. Suszko, W. Gulbinski, J. Jagielski, The Role of Surface Oxidation in Friction Processes on Molybdenum Nitride Thin Films, *Surface & Coatings Technology* 194 (2005), 319-324.
- [9] P. Srisattayakul, C. Saikaew A. Wisitsoraat and N. Intanon, Effects of Sputtering Coating Factors on Elastic Modulus of MoN Coatings, *Advanced Materials Research* 896 (2014), 249-252.
- [10] P. Srisattayakul, C. Saikaew A. Wisitsoraat and N. Intanon, Influence of MoN Sputtering Coating on Wear Resistance of a Fishing Net-Weaving Machine Component, *Advanced Materials Research* 1016 (2014), 80-84.
- [11] J.M. Karandikar, A.E. Abbas, T.L. Schmitz, Tool Life Prediction Using Bayesian Updating. Part 2: Turning Tool Life Using a Markov Chain Monte Carlo Approach, *Precision Engineering* 38 (2014), 18-27.
- [12] J.G. Correa, R.B. Schroeter, A.R. Machado, Tool Life and Wear Mechanism Analysis of Carbide Tools Used in the Machining of Martensitic and Supermartensitic Stainless Steels, *Tribology International* 105 (2017), 102-117.
- [13] L. Fang, W. Liu, D. Du, X. Zhang, Q. Xue, Predicting Three-body Abrasive Wear Using Monte Carlo Methods, *Wear* 256 (2004), 685-694.
- [14] N. Intanon, C. Saikaew and P. Srisattayakul, Design and Fabrication of Wear Testing Machine for a Fishing Net-Weaving Machine Component, *Advanced Materials Research* 896 (2014), 706-709.
- [15] P. Srisattayakul, C. Saikaew A. Wisitsoraat and D. Phokharatkul, Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel, *Wear* DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.005.

Note: Allen F. Doyle U.S.A., is responsible for the translation of the paper into the English language, Thailand

PROCESS FACTORS AFFECTING DEPOSITION RATE OF TiN COATING ON A MACHINE COMPONENT

VPLIVNI PROCESNI FAKTORJI HITROSTI NANOSA TiN PREVLEKE NA STROJNI ELEMENT

Charnnarong Saikaew

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123 Friendship Highway, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen 40002, Thailand

Prejem rokopisa – received: 2018-09-07; sprejem za objavo – accepted for publication: 2018-12-17

doi: 10.17222/mit.2018.211

In this work, a titanium nitride (TiN) coating applied with the oblique-angle DC-magnetron sputtering technique was systematically studied using designed experiments. The TiN layer was applied on an upper hook, which is a machine component of a fishing-net weaving machine. The goal was to investigate the influence of sputtering process factors on the deposition rate and to find appropriate operating conditions for statistically significant factors in order to improve the thin-film manufacturing process, raising the quality of the TiN coating. Five process factors including the oblique angle, rotational speed, sputtering DC current, operating pressure and Ar to N₂ flow-rate ratio were simultaneously investigated using the 2⁵⁻¹ fractional factorial design method. A normal probability plot of effects, and main and interaction-effect plots of the process factors were constructed in order to identify the significant process factors and the appropriate operating conditions. The main factors including the oblique angle, sputtering DC current, operating pressure, gas-mixing ratio, interactions between the oblique angle and sputtering DC current, and interactions between the oblique angle and gas-mixing ratio were found to be statistically significant process factors. Moreover, the appropriate operating conditions for the significant process factors were obtained with the graphical method.

Keywords: TiN, deposition rate, statistical analysis, ANOVA, coating

Avtor opisuje sistematično študijo načrtovanih preizkusov nanosa titan nitridne (TiN) prevleke s postopkom poševnokotnega DC magnetronskega naprševanja. TiN prevleka je bila nanešena na zgornji kavelj, ki je strojni element naprave za navijanje ribiške mreže. Cilj študije je bil raziskati vpliv procesnih parametrov naprševanja na hitrost nanašanja prevleke in ugotoviti primerne pogoje delovanja statistično pomembnih faktorjev za izboljšanje kvalitete procesa izdelave tanke TiN prevleke. Istočasno je bilo raziskovanih pet (5) procesnih faktorjev, in sicer nagibni kot, hitrost vrtenja, DC (enosmerni) električni tok naprševanja, delovni tlak in razmerje med hitrostjo pretoka Ar in N₂. Uporabljena je bila 2⁵⁻¹ frakcionirana faktorska metoda. Konstruirani so bili grafični prikazi normalne verjetnosti vplivov ter glavnega in interakcijskega učinka pomembnih procesnih faktorjev in ustreznih pogojev delovanja naprave. Avtor ugotavlja, da so statistično pomembni naslednji procesni faktorji: nagibni kot, hitrost vrtenja, jakost enosmernega električnega toka naprševanja, delovni tlak ter razmerje med hitrostjo pretoka plinov in interakcije med kotom nagiba in DC električnim tokom naprševanja ter kotom nagiba in razmerjem hitrosti pretoka plina. Nadalje je avtor s pomočjo grafične metode dobil ustrezne pogoje delovanja naprave glede na pomembnost procesnih faktorjev.

Ključne besede: TiN, hitrost nanosa prevleke, statistična analiza, ANOVA, prevleka

1 INTRODUCTION

Titanium nitride is one of extremely hard ceramic materials, widely used as a coating to harden and protect cutting and sliding surfaces due to its excellent characteristic properties such as friction coefficient, hardness, abrasive wear and corrosion resistance under various working conditions.¹ It has a cubic structure of the NaCl type with a high modulus of elasticity of 250–450 GPa and a high Vickers hardness of 18–21 GPa.² However, its surface and material properties are considerably dependent on its production process. The most common methods for applying a TiN coating are physical vapor depositions (PVD) including sputtering, filtered cathodic arc, electron-beam evaporation and chemical vapor deposition (CVD).³ Among these, sputtering is the most widely used method due to its well-controlled process

and high-quality thin-film coating. TiN is normally produced with reactive sputtering, during which sputtered Ti atoms are reacted with nitrogen ions to form TiN molecules.⁴

Oblique-angle-deposition (OAD) or glancing-angle-deposition (GLAD) technique is a modified deposition method, in which the substrate is tilted at different angles with respect to the normal of the deposition direction and rotated at an appropriate speed.⁵ Typically, properties and structures of TiN coatings for various applications using this technique depend on coating conditions including oblique angle, Ar pressure, Ar to N₂ flow-rate ratio.⁶⁻⁹ The main advantage of this technique is the ability to control the diameter, shape and density of nanostructures by varying the deposition conditions consisting of oblique angle, rotation speed, operating pressure, gas-mixing ratio and sputtering power. The technique is used for a TiN hard coating to produce a high-density nanocolumnar structure that can have an

*Corresponding author e-mail:
charn_sa@kku.ac.th

extreme hardness, low friction coefficient and very high wear resistance.¹⁰

Fishing-net companies in Thailand and outside Thailand (owned by Thai people) have confronted the problem of high-cost spare parts of fishing-net weaving machines. In this study, a TiN layer was applied on an upper hook, which is a component of a fishing-net weaving machine as illustrated in **Figure 1**. The TiN coating applied using the OAD technique with DC magnetron sputtering was systematically studied through designed experiments in order to improve the manufacturing-process quality of the TiN coating on the machine component. Five process factors including oblique angle, rotational speed, sputtering DC current, pressure, and Ar to N₂ flow-rate ratio were simultaneously investigated using the fractional factorial design method. The deposition rate was a response used to achieve the effects of the process factors.

2 MATERIALS AND EXPERIMENTAL PART

A cast stainless-steel upper hook was made with lost-wax casting and machined with turning and milling operations. The chemical composition of the workpiece material was 62.28 % Fe, 6.91 % Ni, 21.99 % Cr, 3.12 % Cu, 1.94 % Mn, 2.2 % Si, and 1.56 % Al. A vibratory finishing machine with mixed ball-burnishing media in different sizes ranging from 5 mm to 8 mm was used for surface finishing.

In this study, an eight-step method of planning and conducting the experiment was used as described below:

Setting the objectives: The main objectives of this study were to investigate the effects of the sputtering-process factors on the deposition rate of the TiN coating on the upper hook and to obtain appropriate operating conditions of the statistically significant process factor(s) of the TiN coating. A high deposition rate was preferred to increase the thin-film manufacturing throughput.

Identifying the important process factors: Considering the TiN oblique-angle sputtering process, we identi-

fied five main process factors that control the coating behavior including oblique angle, rotational speed, sputtering DC current, pressure, and Ar to N₂ flow-rate ratio.

Determining the upper and lower limits of the process factors: For the current sputtering system, the ranges of the oblique angle, rotation speed, sputtering DC current, pressure, and Ar to N₂ flow-rate ratio were 70° and 80°, 32 min⁻¹ and 64 min⁻¹, 0.35 A and 0.45 A, 40 Pa and 80 Pa, and 0.5 and 1.33, respectively.

Developing of the design matrix: The 2⁵⁻¹ fractional factorial design for this study consisted of 16 factorial runs. The defining relation for this design was $I = ABCDE$ where *A* represented the oblique angle, *B* was the rotation speed, *C* denoted the sputtering DC current, *D* was the pressure, and *E* represented the Ar to N₂ flow-rate ratio. Every main effect was associated with a four-factor interaction, and every two-factor interaction was aliased with a three-factor interaction. Therefore, the design was resolution V. The design provided good information regarding the main effects and two-factor interactions.

Applying the TiN coating as per the design matrix: The oblique-angle coating system consisted of a high-vacuum chamber equipped with a 3" target magnetron gun, 600 W radio-frequency generator, 400 W DC-power supply and a turbomolecular pump. The TiN was deposited on the upper hook using DC magnetron sputtering of pure titanium under a mixture of argon (Ar) and nitrogen (N₂). The TiN deposition experiments were systematically carried out in accordance with the 2⁵⁻¹ fractional factorial design. There were five samples for each condition and the experiments were run in a random order to avoid a statistical bias in the analyses. The distance between the substrate (i.e., the upper hooks) and the target (i.e., titanium) was held constant at 5 cm. An oblique-angle sputtering device and an oblique-angle-sputtering schematic diagram are illustrated in **Figure 2**.

Recording the response: The film thickness was measured with a white-light interferometric optical profiler (Polytech model 2000). The deposition rate was calculated from the film thickness and deposition time. The surface microstructure was examined by means of a scanning electron microscope (SEM). SEM measurements (Hitachi model S-4700) were performed in the secondary electron mode at an accelerating voltage of 10 kV.

Analyzing the results using the graphical tools for a data analysis and interpretation: Analysis of variance (ANOVA) was used to investigate the effects of the five sputtering-process factors on the average deposition rate. Graphical tools included a normal probability plot of the effects and the main and interaction effect plots of the significant process factors.^{11,12}

Determining an appropriate operating condition for the system: The objective of this analysis was to maximize the deposition rate in order to increase the manufacturing throughput of the machine component. The



Figure 1: Fishing-net weaving machine and the upper hooks

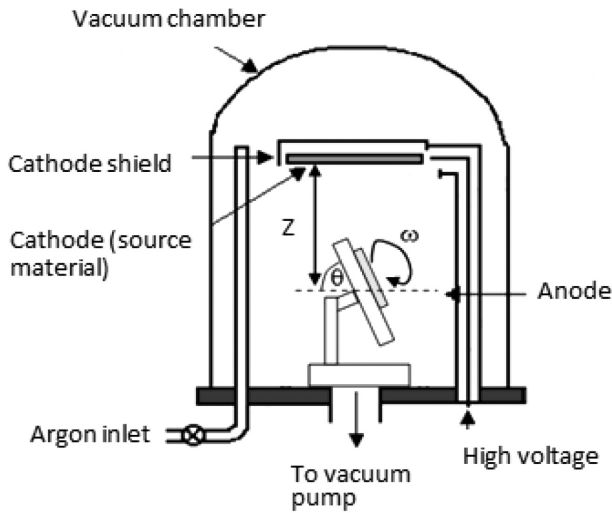


Figure 2: Oblique-angle-sputtering schematic diagram

main and interaction effect plots as well as response surface and contour plots were used to obtain the appropriate statistically significant process factor(s).

3 RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the matrix design consisting of the five sputtering-process factors together with the corresponding responses (deposition rates). In Table 1, A, B, C, D and E represent the factors including the oblique angle, rotational speed, sputtering DC current, pressure, and Ar to N₂ flow-rate ratio, respectively.

Table 1: 2⁵⁻¹ experimental design for the deposition rate

Factor	Dep. rate				
A	B	C	D	E	
70	32	0.35	40	1.33	3.8
80	32	0.35	40	0.50	1.8
70	64	0.35	40	0.50	2.6
80	64	0.35	40	1.33	2.4
70	32	0.45	40	0.50	4.0
80	32	0.45	40	1.33	3.0
70	64	0.45	40	1.33	6.2
80	64	0.45	40	0.50	2.2
70	32	0.35	80	0.05	3.2
80	32	0.35	80	1.33	3.5
70	64	0.35	80	1.33	5.1
80	64	0.35	80	0.50	3.2
70	32	0.45	80	1.33	7.3
80	32	0.45	80	0.50	3.0
70	64	0.45	80	0.50	5.2
80	64	0.45	80	1.33	4.2

Figure 3 illustrates the probability plot of the deposition-rate data set. The probability plot shows that the plotted points approximately formed a straight line and fell within the C.I. The AD statistic was small with a high *p*-value compared to the level of significance ($\alpha =$

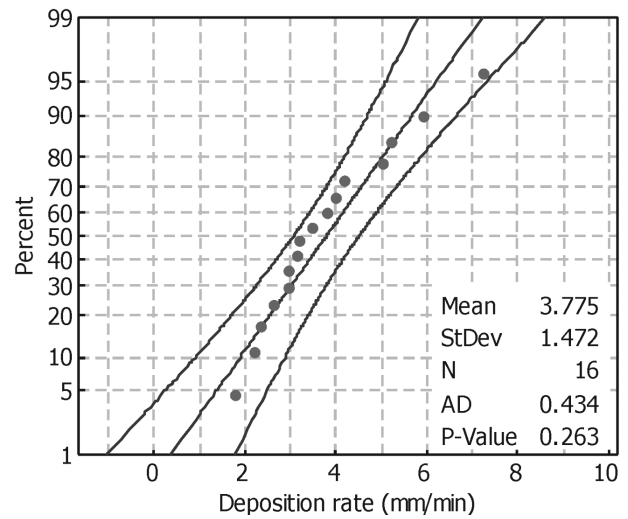


Figure 3: Probability plot of deposition-rate values

0.05). This confirmed that the normal probability distribution fitted the data set of the deposition rate very well.

The adequacy of the underlying model should be checked before performing the statistical analysis and interpretations of the ANOVA. The primary diagnostic tool is a residual analysis.¹³ Figure 4a illustrates the normal probability plot of residuals for the deposition rate of the TiN coating on the upper hooks. Generally, the normal probability plot of residuals does not show anything particularly troublesome, although some residuals bend down slightly on the left side.

If the model is adequate and the assumption is satisfied, the residuals should be structureless. The residuals should be unrelated to any other factors including the predicted response. A plot of residuals versus predicted values is employed to check the non-constant variance. Figure 4b does not show any violation of the assumption of homogeneity of variances because the plot does not look like an outward-opening funnel or megaphone.

The plot of residuals versus run order or time is used to check the independence assumption. Figure 4c displays the residuals and the time sequence of data collection for the deposition-rate data. There is no reason to suspect there was a violation of the independence assumption since the plot does not have a pattern such as the sequence of positive and negative residuals.

A normal probability analysis of effects was used to identify the statistically significant main effects and interaction effects on the deposition rate of the TiN coating. The main and interaction effects of the process factors were plotted against the cumulative normal probability (in percent) in this analysis.¹³ Figure 5 illustrates a normal probability plot of effects of the sputtering-process factors on the deposition rate for the TiN coating. It is worth noting that the effects that fall off from each end of the straight line were deemed to be statistically significant whereas those that fall roughly along the straight line were deemed to be statistically

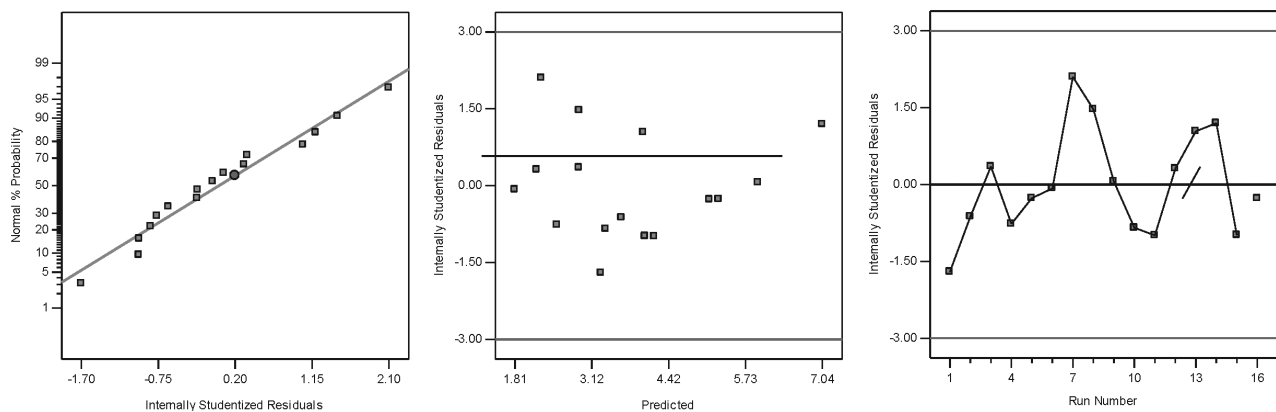


Figure 4: Model adequacy checking of the residuals for deposition-rate values: a) normal probability plot of residuals, b) plot of residuals versus predicted values, c) plot of residuals versus run order

insignificant. The normal-probability data showed that the four process factors, oblique angle (factor *A*), DC current (factor *C*), pressure (factor *D*) and Ar to N₂ flow-rate ratio (factor *E*) had significant impacts on the average deposition rate. Furthermore, interaction effects between oblique angle and DC current (*A* × *C*) and oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio (*A* × *E*) were statistically significant at a significance level of 0.05.

The result from **Table 1** was analyzed with ANOVA, which was employed for investigating the effects of the five sputtering-process factors on the average deposition rate of the TiN coating. **Table 2** shows that the model *F*-value of 87.85 with a very small *p*-value was adequate, having a large coefficient of determination (*R*²) of 0.9832; it was defined as the ratio of the explained variation to the total variation and was a measure of the degree of fit. The adjusted *R*² of 0.9720 and predicted *R*² of 0.9469 were in reasonable agreement where the difference between the two values was less than 0.2. **Table 2** also shows that the sources of variation with a *p*-value of less than 0.05 were considered to have a statistically significant contribution to the average deposition rate. The ANOVA results for a reduced model obtained by selecting the statistically significant terms

with the 0.05 level of significance indicated that the most statistically significant factor affecting the average deposition rate was the oblique angle, which explained the largest contribution, accounting for 37.64 % of the total variability. The Ar to N₂ flow-rate ratio, DC current and pressure had lower contribution levels; similarly, the interaction of oblique angle and DC current, and the interaction of oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio also had lower contribution levels.

In order to interpret the interaction effect effectively, interaction plots were constructed as shown in **Figure 6**. Here, non-parallel lines reveal that there were interactions between the oblique angle and DC current as well as between the oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio. The effect of the oblique angle on the deposition rate was different at low and high levels of DC current. This showed that the maximum deposition rate was obtained when the oblique angle was at a low level (75°) and the DC current was at a high level (0.45 A). Similarly, the interaction effect plot also clearly indicated that the maximum deposition rate was found when the oblique angle was at a low level (75°) and the Ar to N₂ flow-rate ratio was at a high level (1.33).

To determine the appropriate operating conditions of the significant process factors affecting the deposition

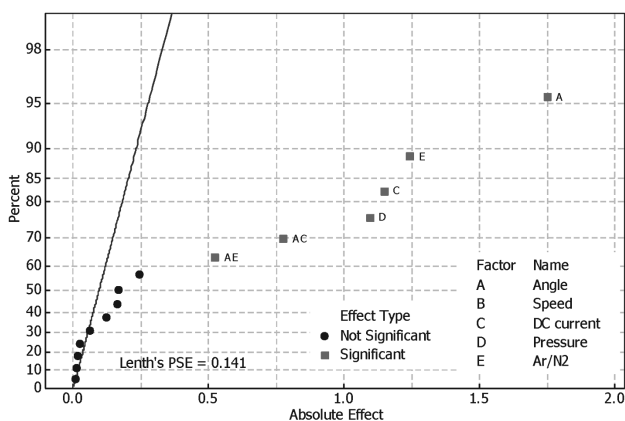


Figure 5: Normal probability plot of effects for the deposition rate of TiN coating

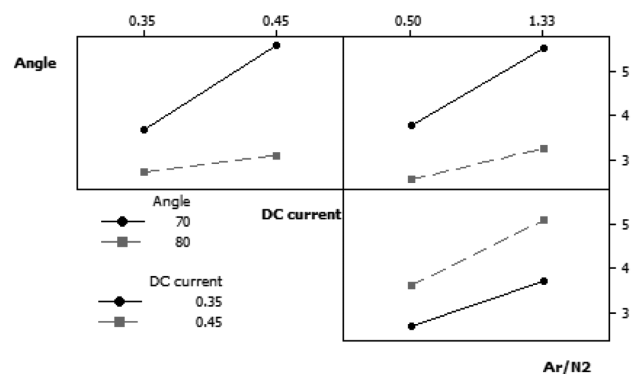


Figure 6: Interaction plots of angle, DC current and Ar/N₂ for the deposition rate of TiN coating

Table 2: ANOVA table for the deposition rate of TiN coating

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value	% contribution
Model	31.96	6	5.33	87.85	< 0.0001	
A-Angle	12.24	1	12.24	210.82	< 0.0001	37.64
C-DC current	5.26	1	5.26	86.84	< 0.0001	16.20
D-Pressure	4.79	1	4.79	79.07	< 0.0001	14.75
E-Ar/N ₂	6.17	1	6.17	101.73	< 0.0001	18.98
AC	2.40	1	2.40	39.60	0.0001	7.39
AE	1.10	1	1.10	18.06	0.0021	3.37
Residual	0.55	9	0.061			
Total	32.50	15				

rate for the TiN coating of the fishing-net weaving-machine component, a numerical analysis using the response surface methodology was carried out. After performing the regression analysis, the empirical relationship between the deposition rate and the oblique angle, pressure, DC current and Ar to N₂ flow-rate ratio was:

$$R = 3.77 - 0.87A + 0.57C + 0.55D + 0.62E - 0.39AC - 0.26AE \quad (1)$$

Response-surface plots and contour plots for the deposition-rate response in terms of oblique angle and DC current and oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio were constructed using Equation (1) as shown in **Figure 7**. We can notice that the deposition rate was higher in the region of a low oblique angle, high DC current and high Ar to N₂ flow-rate ratio. The positive signs for the coefficients of pressure, DC current and Ar to N₂ flow-rate ratio in the fitted model for the deposition rate indicated that the deposition rate increased with

increasing levels of the process factors. On the other hand, the negative sign of the oblique angle showed that the deposition rate increased with a decreasing level of this factor. Furthermore, the negative signs for the coefficients of the two interactions meant that an increase in the deposition rate was obtained due to simultaneous changes of the process factors in the opposite directions. The contour plots and response-surface plots also confirmed that the maximum deposition rate was found when the oblique angle was at a low level (75°), DC current at a high level (0.45 A) and Ar to N₂ flow-rate ratio also at a high level (1.33). Jing et al. stated that the deposition rate of TiN deposited on a 316L stainless-steel substrate increased with a decreasing inclination angle, which could be treated as a geometrical issue.¹⁴

Figure 8 shows the plot of experimental observations and predicted values, used to investigate whether the statistical model fits the experimental observations.¹³ The plot illustrates that most of the data points lie in a straight line. This indicates that the statistical model fits the experimental observations for the TiN coating on the machine component.

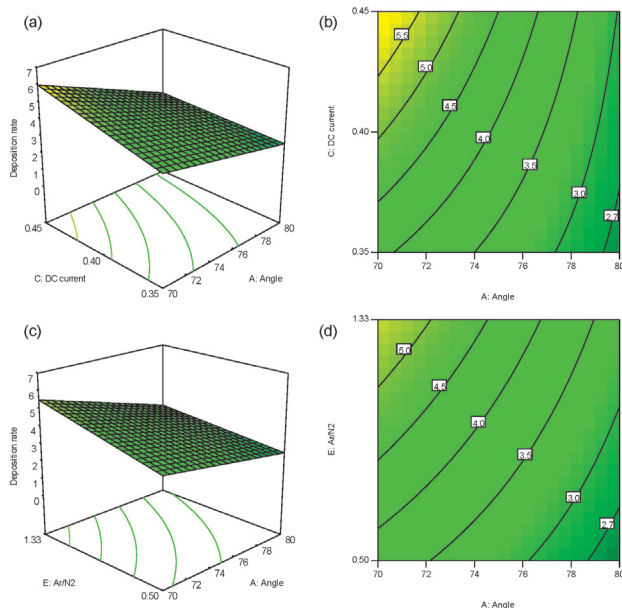


Figure 7: a) Response surface plot, b) contour plot for oblique angle and DC current, c) response surface plot, d) contour plot for oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio

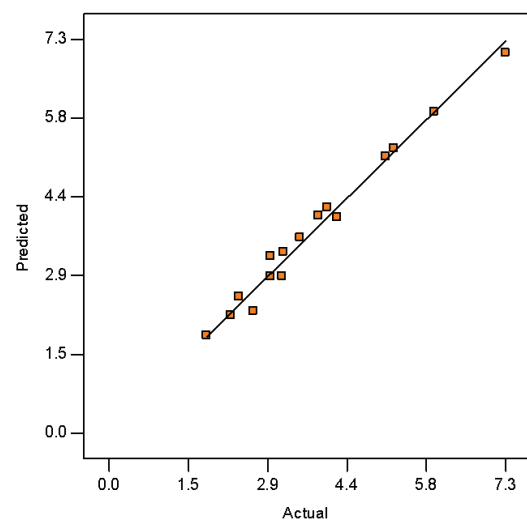


Figure 8: Relationship between the actual deposition rate and predicted deposition rate

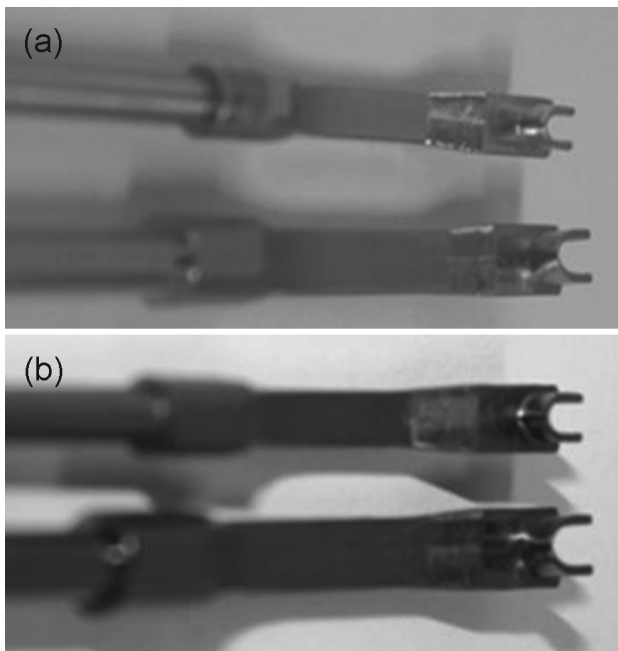


Figure 9: Photographs of the upper hooks: a) before, b) after the TiN coating

Figures 9a and **b** show photographs of the upper hooks before and after the TiN coating, respectively. Before the coating, the upper hooks were silver, with the small one being shinier. This was because the small one was pre-coated with chromium. After the coating, the upper hooks were of a dark yellowish color, indicating a successful TiN coating.

Figure 10 shows typical SEM micrographs of the upper hooks before and after the TiN coating. First, the hook surface was very rough indicating many micro-scratches and pits. After the coating, the hook surface became smooth. Large pits and scratches were diminished whereas most of the fine scratches and pits disappeared. Thus, the surface roughness of the upper-hook surface could be significantly decreased by coating it with sputtered TiN. The coating was expected to provide a considerable improvement in the surface quality regarding the wear resistance of the upper hook.

4 CONCLUSIONS

This work investigated the effect of sputtering process factors on the average deposition rate in order to enhance the manufacturing-process quality of a TiN coating on a machine component of a fishing-net weaving machine. A 2^{5-1} fractional factorial design, ANOVA and other statistical-analysis tools were used to find the statistically significant process factors and to obtain the appropriate operating conditions for the significant factors. The results of this study can be summarized as follows:

The oblique angle made the largest contribution to the total variability at a 0.05 significance level.

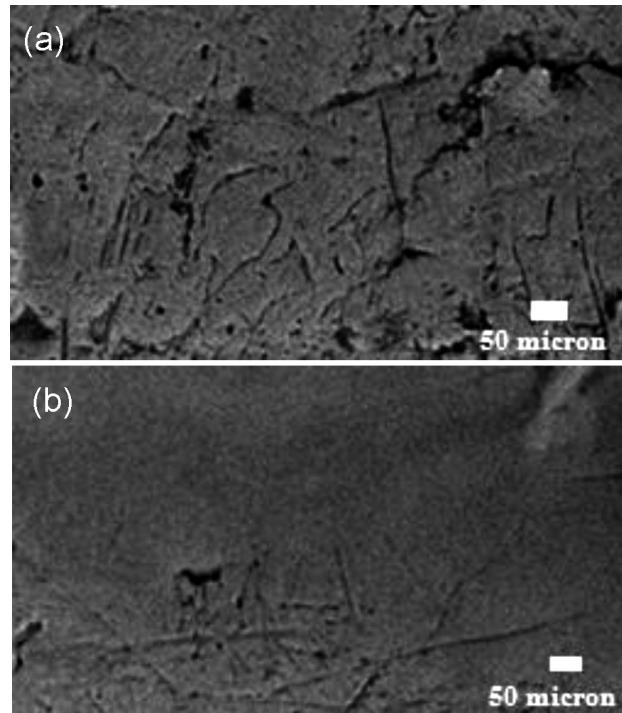


Figure 10: Typical SEM micrographs of the upper hooks: a) before and b) after the TiN coating

The Ar to N₂ flow-rate ratio, DC current and pressure had lower contribution levels.

The interaction of the oblique angle and DC current and the interaction of the oblique angle and Ar to N₂ flow-rate ratio had lower contribution levels.

The highest deposition rate was found when the oblique angle was 75°, DC current was 0.45 A and Ar to N₂ flow-rate ratio was 1.33.

Further research should investigate the performance of TiN by carrying out wear experiments on the machine components of a real fishing-net weaving machine. Moreover, appropriate operating conditions for the process factors should be determined using the response surface methodology coupled with the desirability function approach, based on the data sets for the deposition rate and wear rate.^{15,16}

Acknowledgement

The author gratefully acknowledges the Thailand Research Fund (TRF), grant no. RSA 5980025, and the Faculty of Engineering, Khon Kaen University for the financial supports of this research.

5 REFERENCES

- ¹ Y. Küçük, A. Öztel, M. Y. Balalý, M. Öge, M. S. Gök, Evaluation of the wear behavior of nitride-based PVD coatings using different multi-criteria decision-making methods, *Mater. Tehnol.*, 51 (2017), 307–316, doi:10.17222/mit.2016.041
- ² D. S. Stone, K. B. Yoder, W. D. Sproul, Hardness and elastic modulus of TiN based on continuous indentation technique and new

- correlation, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9 (1991) 4, 2543–2547, doi:10.1002/adfm.201002062
- ³ G. S. Kim, S. Y. Lee, J. H. Hahn, B. Y. Lee, J. G. Han, J. H. Lee, Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 171 (2003), 83–90 doi:10.1016/S0257-8972(03)00243-3
- ⁴ V. H. Pham, S. W. Yook, E. J. Lee, Y. Li, G. Jeon, J. J. Lee, H. E. Kim, Y. H. Koh, Deposition of TiN films on Co-Cr for improving mechanical properties and biocompatibility using reactive DC sputtering, *J. Mater. Sci.*, 22 (2011), 2231–2237, doi:10.1007/s10856-011-4410-8
- ⁵ Z. Xie, X. Liu, W. Wang, C. Liu, Z. Li, Z. Zhang, Fabrication of TiN nanostructure as a hydrogen peroxide sensor by oblique angle deposition, *Nanoscale Res. Lett.*, 9 (2014), 105, doi:10.1186/1556-276X-9-105
- ⁶ B. Bouaouina, C. Mastail, A. Besnard, R. Mareus, F. Nita, A. Michel, G. Abadias, Nanocolumnar TiN thin film growth by oblique angle sputter-deposition: Experiments vs. simulations, *Mater. Des.*, 160 (2018), 338–349, doi:10.1016/j.matdes.2018.09.023
- ⁷ M. A. Domínguez-Crespo, A. M. Torres-Huerta, E. Rodríguez, A. Gonzalez-Hernandez, S. B. Brachetti-Sibaja, H. J. Dorantes-Rosales, A. B. Lopez-Oyama, Effect of deposition parameters on structural, mechanical and electrochemical properties in Ti/TiN thin films on AISI 316L substrates produced by r. f. magnetron sputtering, *J. Alloy Compd.*, 746 (2018), 688–698, doi:10.1016/j.jallcom.2018.02.319
- ⁸ P. Pedrosa, D. Machado, P. Fiedler, B. Vasconcelos, E. Alves, N. P. Barradas, N. Martin, J. Haueisen, F. Vaz, C. Fonseca, Electrochemical characterization of nanostructured Ag:TiN thin films produced by glancing angle deposition on polyurethane substrates for bio-electrode applications, *J. Electroanal. Chem.*, 768 (2016), 110–120, doi:10.1016/j.jelechem.2016.03.005
- ⁹ P. Pedrosa, C. Lopes, N. Martin, C. Fonseca, F. Vaz, Electrical characterization of Ag: TiN thin films produced by glancing angle deposition, *Mater. Lett.*, 115 (2014), 136–139, doi:10.1016/j.matlet.2013.10.044
- ¹⁰ J. Lintymer, N. Martin, J. M. Chappe, J. Takadoum, Glancing angle deposition to control microstructure and roughness of chromium thin films, *Wear*, 264 (2008), 444–449, doi:10.1016/j.wear.2006.08.036
- ¹¹ StatEase Inc., Design Expert 7 (software), User's Guide, Minneapolis 2005
- ¹² Minitab Inc., Minitab 13 (software), State College, U.S.A., 2013
- ¹³ D. C. Montgomer, Design and Analysis of Experiments, 6th ed., John Wiley & Sons, New York 2005
- ¹⁴ F. Jiang, T. F. Zhang, B. H. Wu, Y. Yu, Y. P. Wu, Sh. F. Zhu, F. J. Jing, N. Huang, Y. X. Leng, Structure mechanical and corrosion properties of TiN films deposited on stainless steel substrates with different inclination angles by DCMS and HPPMS, *Surf. Coat. Technol.*, 292 (2016), 54–62, doi:10.1016/j.surfcoat.2016.03.007
- ¹⁵ G. Derringer, R. Suich, Simultaneous optimization of several response variables, *J. Qual. Technol.*, 12 (1980) 4, 214–219, doi:10.1080/00224065.1980.11980968
- ¹⁶ R. H. Myer, D. C. Montgomer, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York 2002

Experimental Analysis and Comparative Performance of Ti-Based Coatings on Hard-Chrome Plated Stainless Steel

Supakanya KHANCHAIYAPHUM^{1,a}, Charnnarong SAIKAEW^{1,b*}, Surasak SURINPHONG^{2,c}

Abstract: Experimental analysis was performed to evaluate the performances of hard-chrome plated stainless steel and TiAlSiN and TiCrAlSiN hard coatings deposited on cast stainless steel based on wear experimental data. The wear tests were carried out using a reciprocating wear tester modified from ASTM: G133. The analysis of variance and other statistical tools were used to explore the influences of coating type, applied load and workpiece surface roughness on the average weight loss values of the workpiece materials. The results showed that coating type, applied load, and workpiece surface roughness and the interactions between coating type and applied load as well as between coating type and workpiece surface roughness were statistically significant at the level of significance of 0.05. Furthermore, the TiCrAlSiN coating had the highest wear resistance followed by the TiAlSiN and the hard-chrome plated stainless steel, respectively.

Keywords: Wear test; weight loss; ANOVA; coatings; hard chrome

1 INTRODUCTION

TiN coatings are extensively employed in various industries to increase the wear resistance and lifetime of machine component [1, 2]. They have limitation of preventing O₂ condensation reaction. If Al and Cr are added, preventing O₂ condensation reaction will increase [3]. TiAlN have been developed to prevent high temperature O₂ condensation [4]. However, TiAlSiN has better wear resistance than TiAlN and TiN by adding Si [5–7]. This technology has led to development of TiSiN and TiAlSiN to provide preferable protection O₂ condensation, wear resistance and mechanical properties [8]. TiAlSiN coated in a vacuum chamber has better mechanical properties and good thermal stability [9]. The coatings will increase the wear resistance and hardness if it has a multi-layer coating [10].

Generally, Ti-based coatings can be deposited by a variety of techniques such as PVD magnetron sputtering [11, 24] and filtered cathodic arc (FCA) which are extensively used processes for hard coatings because of high surface smoothness, quality coatings, coating rate and coating repetitions. TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings are developed on the basis of magnetron sputtering [12–14], FCA [15–18], hybrid of sputtering and FCA techniques [19]. In the past decade, wear behaviours of TiAlSiN and TiCrAlSiN deposited on various materials have been studied such as stainless steel (SS) [12], Ni-Cr based alloys [17], tool steel [18] and Ni-based high-temperature alloys [19]. Wear behaviours of the coatings were examined including microstructure, hardness, friction coefficient and wear characteristics by the standard testing apparatuses such as pin-on-flat, pin-on-drum, pin-on-disc and reciprocating ball-on-flat depending on a variety of industrial applications [20].

In this research work, the performances of TiAlSiN and TiCrAlSiN hard coatings deposited on cast stainless steel (SS) were compared with the hard-chrome plated stainless steel (HC) under abrasive wear tests in dry condition. A three-factor factorial design and analysis of variance (ANOVA) were employed to investigate the influences of the HC, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings, the workpiece surface roughness and applied load on wear resistance in term of weight loss measurements of the workpiece materials.

2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

The test specimens were the cast stainless steel (SS) with the length of 4 cm and the width of 1.5 cm. The SS was produced by the lost wax casting process and was machined by turning and milling operations. The specimens were developed for surface finishing employing a vibratory finishing machine with mixed ball burnishing media in different sizes varying from 5 to 8 mm. The chemical composition of the SS included 61.28% Fe, 20.75% Cr, 6.23% Ni and 3.06% Cu. Improvement of SS surface quality was accomplished through multi-layered depositions with Ti-based materials. TiAlSiN and TiCrAlSiN were coated on the SS by the FCA system (Nanoshield Co., Ltd). The detailed descriptions of TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings by the FCA method were stated in the previous work [23].

The hardness of each specimen was measured by a hardness tester (UMIS: model UMIS II) after coating the specimens and before the wear tests. The surface roughness was measured with a standard roughness tester (Mahr: model MarSurf PS1). The specimens were separated into two groups: the average surface roughness (Ra) lower than 0.02 µm (Rz < 0.05 µm) and the average surface roughness (Ra) higher than 0.5 µm (Rz > 1.5 µm).

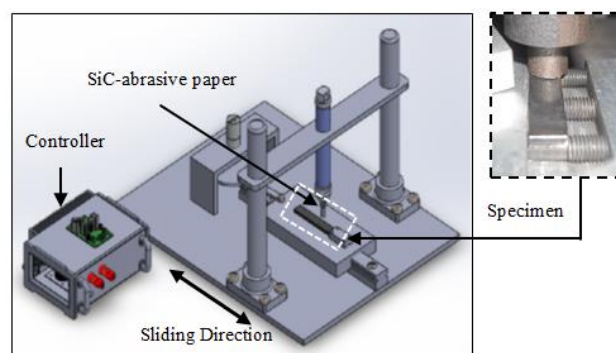


Figure 1 Schematic illustration of the abrasion wear tester [21]

Wear tests of TiAlSiN, TiCrAlSiN and HC were performed by a reciprocating wear tester modified from ASTM: G05-133 as shown in Fig. 1 [21]. The wear tests were performed on a 1000 grit silicon carbide (SiC grit#1000: Struers) and applied load at 5 and 10 N. The

oscillating frequency was 1.167 Hz (70 rpm). The testing time was 100 min and the length of the forward-backward movement was 15 mm. The weight loss values of all specimens were collected as per three-factor factorial design of experiments. Each treatment combination of coating type, applied load and surface roughness factors was repeated three times. The thirty-six specimens were weighed using an electronic balance before wear tests. After wear tests, the specimens were weighed again. The weights before and after the wear test of each specimen were used to calculate a weight loss value. A comparison of average weight loss data from the wear tests was performed to identify the statistically significant factors using ANOVA and statistical graphical tools. The model for the three-factor factorial design was expressed as follows:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\delta)_{ik} + (\beta\delta)_{jk} + (\tau\beta\delta)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

where i represented the i th level of coating type factor (HC, TiAlSiN and TiCrAlSiN); j expressed the j th level of applied load factor (5 N and 10 N); k represented the k th level of workpiece surface roughness factor (Ra of 0.02 and Ra of 0.5 μm); l denoted the l th replication of each treatment combination. Generally, y_{ijkl} was the observed weight loss value from the wear test, μ was the overall mean effect, τ_i was the effect of the i th level of the coating type factor, β_j was the effect of the j th level of the applied load factor and δ_k was the effect of the k th level of the workpiece surface roughness factor. In addition, $(\tau\beta)_{ij}$ was the effect of the two-factor interaction between τ_i and β_j , $(\tau\delta)_{ik}$ was the effect of the two-factor interaction between τ_i and δ_k , $(\beta\delta)_{jk}$ was the effect of the two-factor interaction between β_j and δ_k . Similarly, $(\tau\beta\delta)_{ijk}$ represented the three-factor interaction between τ_i , β_j and δ_k while ε_{ijkl} was a random error component.

The testing hypotheses about the equalities of all treatment effects of the three factors were defined as follows:

$$\begin{aligned} H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0 \\ H_1: \text{at least one } \tau_i \text{ not equal to zero} \quad (2) \\ H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0 \\ H_1: \text{at least one } \beta_j \text{ not equal to zero} \quad (3) \\ H_0: \delta_1 = \delta_2 = 0 \\ H_1: \text{at least one } \delta_k \text{ not equal to zero} \quad (4) \end{aligned}$$

The testing hypotheses about the interactions between the two factors were expressed as follows:

$$\begin{aligned} H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ for all } i, j \\ H_1: \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \text{ not equal to zero} \quad (5) \\ H_0: (\tau\delta)_{ik} = 0 \text{ for all } i, k \\ H_1: \text{at least one } (\tau\delta)_{ik} \text{ not equal to zero} \quad (6) \\ H_0: (\beta\delta)_{jk} = 0 \text{ for all } j, k \\ H_1: \text{at least one } (\beta\delta)_{jk} \text{ not equal to zero} \quad (7) \end{aligned}$$

Similarly, the testing hypothesis about the interaction of the three factors was defined as:

$$\begin{aligned} H_0: (\tau\beta\delta)_{ijk} = 0 \text{ for all } i, j, k \\ H_1: \text{at least one } (\tau\beta\delta)_{ijk} \text{ not equal to zero} \quad (8) \end{aligned}$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

Tab. 1 illustrates the experimental results of weight loss values of each treatment combination after carrying out the wear test. The HC plated specimens had the highest weight loss values followed by TiAlSiN and TiCrAlSiN, respectively. Generally, it was found that most weight loss values after carrying out the wear experiments using the applied load of 5 N were lower than those after carrying out the experiments using the applied load of 10 N regardless of coating type. In addition, most weight loss values after performing the wear experiments using the workpiece surface roughness of 0.5 μm were higher than those after carrying out the experiments using the workpiece surface roughness of 0.02 μm . On the other hand, after carrying out the experiments using the applied load of 10 N, the weight loss values of TiCrAlSiN coated specimens were different. It showed that the coating material and the workpiece surface roughness indicated interactions. However, the ANOVA and the statistical graphical tools were useful approaches for investigating the effects of the factors on the average weight loss values.

Table 1 Experimental result for weight loss

Coating type	Applied load of 5 N		Applied load of 10 N	
	Ra = 0.02	Ra = 0.5	Ra = 0.02	Ra = 0.5
HC	0.0695	0.0972	0.1113	0.1314
	0.0803	0.0935	0.0991	0.1357
	0.0745	0.1070	0.1027	0.1425
TiAlSiN	0.0351	0.0472	0.0495	0.0581
	0.0324	0.0456	0.0522	0.0593
	0.0346	0.0452	0.0518	0.0607
TiCrAlSiN	0.0236	0.0311	0.0398	0.0413
	0.0278	0.0305	0.0384	0.0401
	0.0245	0.0297	0.0388	0.0421

The model adequacy should be checked before carrying out the analysis and interpretations from the ANOVA. The primary diagnostic tool is residual analysis [22]. Fig. 2a presents normal probability plot of residuals for the weight loss values from the wear experiments. If the underlying error distribution is normal, the plot will look like a straight line. The trend of the normal probability plot bent down marginally on the right side and upward moderately on the left side. Generally, the normal probability plot of residuals did not indicate a violation of the assumption of normality, although some residuals on the right and the left sides slightly bent down.

A plot of residuals versus fitted (predicted) values is commonly used to perform a nonconstant variance checking. If the model is adequate and the assumption is satisfied, the residuals should be considered structureless. The residuals should be independent to any other factors including the predicted response. If the plot looks like a megaphone, nonconstant variance arises [22]. Fig. 2b does not illustrate a violation of the assumption of nonconstant variances.

The plot of residuals versus run number is used to check the independence assumption. The experimental observations are not independent if the plot exhibits a pattern such as sequence of positive and negative residuals [22]. Fig. 2c exhibits the residuals and the run order of

data collection for the weight loss values. The plot did not present the violation of the independence assumption. Fig. 2d displays the relationship between the experimental observations (actual) and the predicted values. The plot is used to examine whether the statistical model fits to the experimental observations and the model can be used to

predict the response values. The plot indicated that most of the weight loss values lay in a straight line. This implied that the three-factor factorial model fitted to the experimental observations and the model could be used to predict the weight loss values very well for the wear experiments.

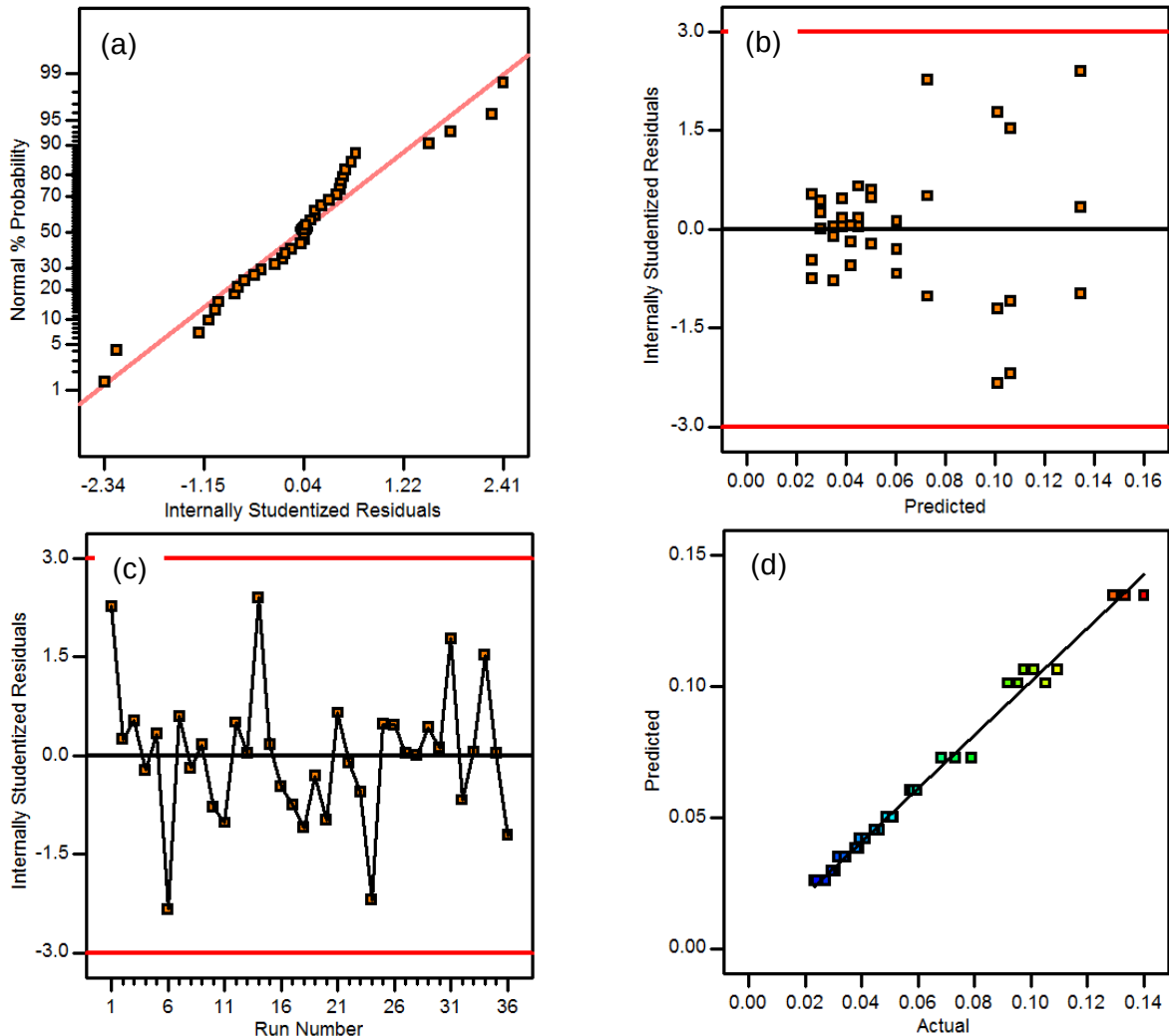


Figure 2 Residuals plot of weight loss (a) normal probability plot of residuals, (b) plot of residuals versus predicted values, (c) plot of residuals versus run number and (d) plot of experimental observations and predicted values

Table 2 The ANOVA table for results for weight loss

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value	% contribution
Model	0.04043	8	0.00505	349.62	< 0.0001	
A-Coating type	0.03279	2	0.01639	1145.19	< 0.0001	81.10
B-Load	0.00371	1	0.00371	259.21	< 0.0001	9.18
C-Ra	0.00177	1	0.00177	123.51	< 0.0001	4.38
AB	0.00079	2	0.00040	27.64	< 0.0001	1.95
AC	0.00098	2	0.00049	34.31	< 0.0001	2.42
Residual	0.00039	27	0.00001			
Lack-of-fit	0.00006	3	0.00002	1.52	0.2349	
Pure error	0.00032	24	0.00001			
Total	0.04043	35				

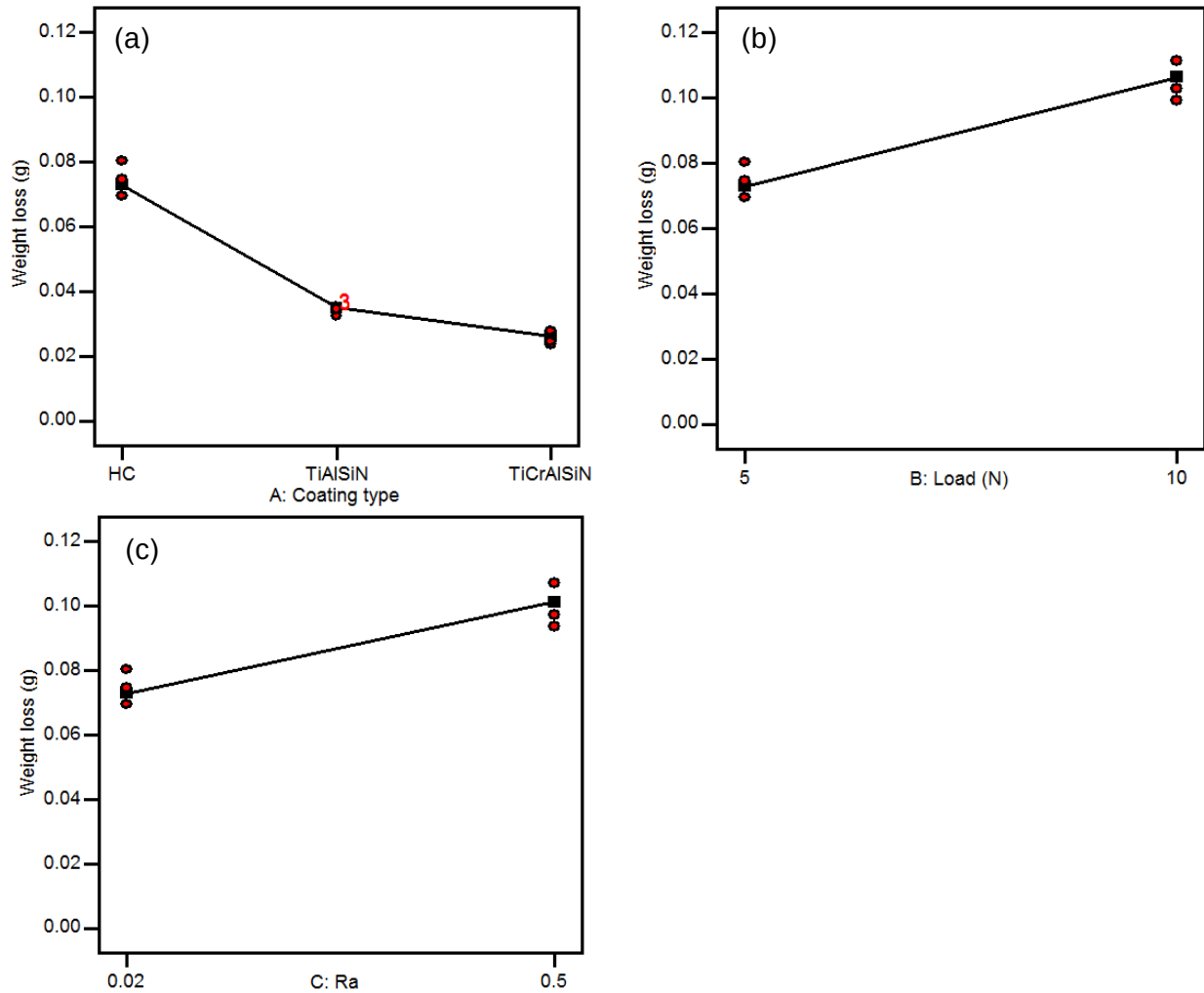


Figure 3 Main effect plots of weight loss for (a) coating type (b) applied load and (c) workpiece surface roughness

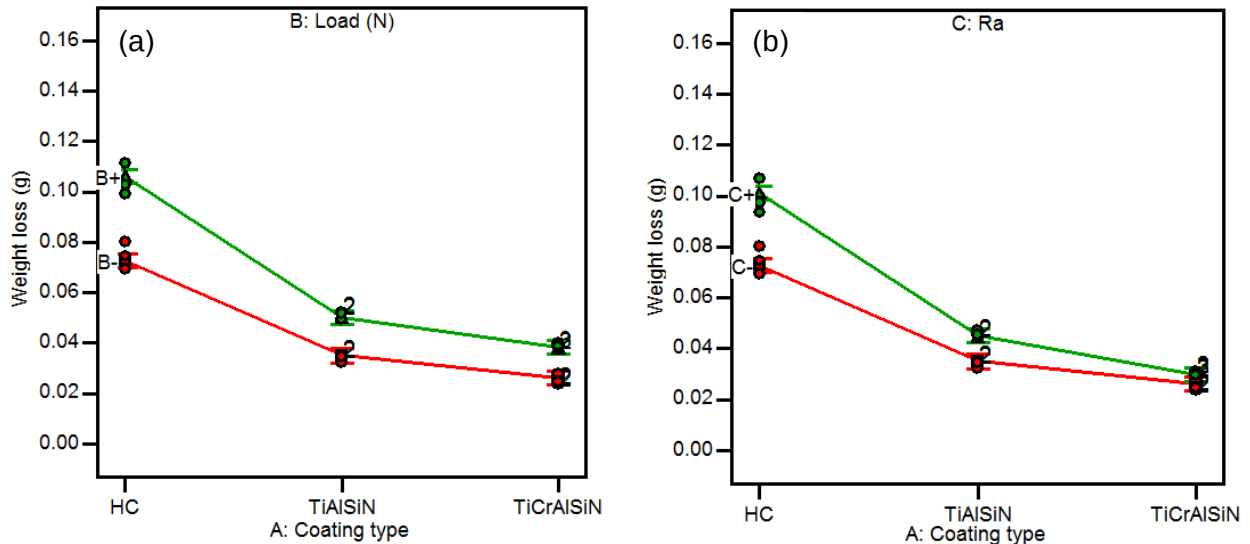


Figure 4 Interaction effect plots of weight loss between (a) coating type and applied load and (b) coating type and workpiece surface roughness

The effects of factors (coating type, applied load and workpiece surface roughness) and interactions among the factors on the average weight loss were investigated using ANOVA. Tab. 2 shows that the F -value of the model was 349.62 with very small p -value. The coefficient of determination (R^2) defined as the ratio of the explained variation to the total variation and was a measure of the

degree of fit. The R^2 was 0.9904. The adjusted R^2 and predicted R^2 were 0.9876 and 0.983, respectively. The difference between the the adjusted R^2 and predicted R^2 was less than 0.2 indicating a good model adequacy. Furthermore, the lack-of-fit value was used to measure the variation of weight loss values around the fitted model. If the model fits the data well, the lack-of-fit value

will be not statistically significant [22]. The F -value and the p -value for the lack-of-fit test were 1.52 and 0.2349, respectively. It was not statistically significant at the level of significance of 0.05 indicating a good model. Tab. 2 also shows the sources of variation with a p -value less than 0.05, which are considered to have a statistically significant contribution to the average weight loss. The ANOVA results for reduced model by selecting the statistically significant terms with the level of significance

of 0.05 indicated that the most statistically significant factor affecting on the average weight loss was coating type, which explained the largest contribution accounting for 81.1% of the total variability. The applied load, workpiece surface roughness, interaction of coating type and applied load, and interaction of coating type and workpiece surface roughness had much lower contribution levels.

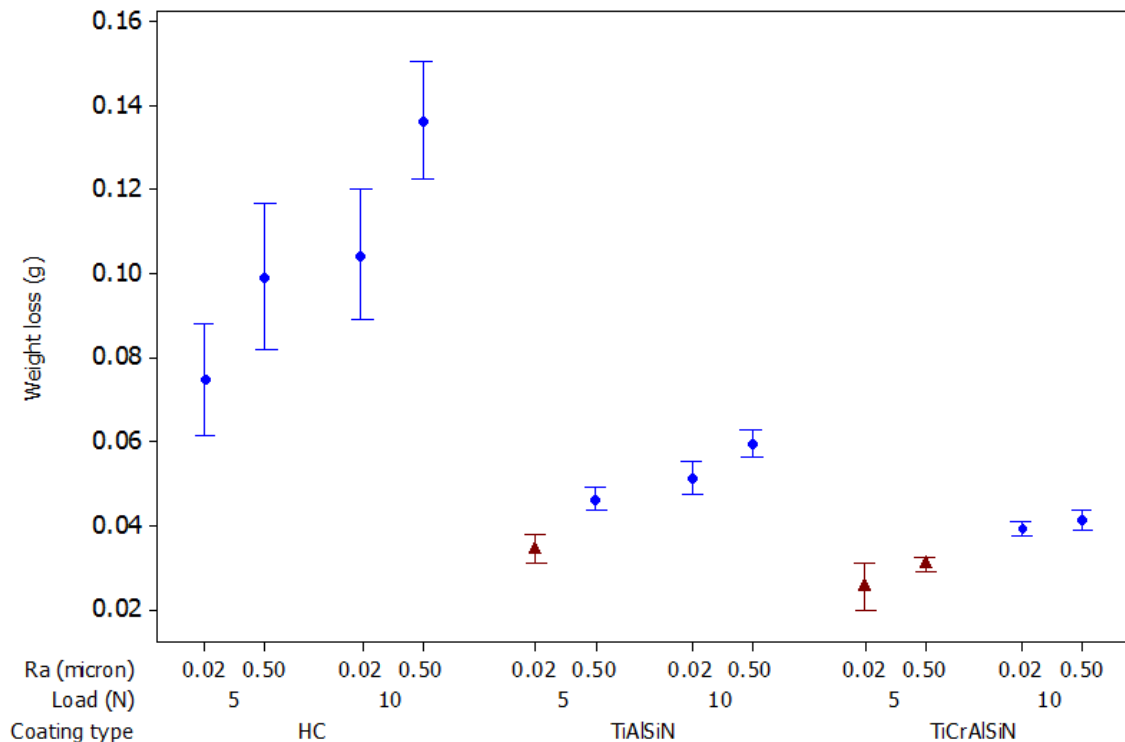


Figure 5 Interval plot of weight loss

This study used a main effect plot and an interaction effect plot to evaluate and compare the relative strength of the influences across the three factors. Main effect plot of the average weight loss values at all levels of each factor was constructed in order to assess the average weight loss values changing across the levels of a factor. Fig. 3 illustrates the main effect plots of weight loss for the three factors. Fig. 3a indicates that the weight loss of hardchrome plated-stainless steel was the highest with the a maximal value of 0.08 g whereas the weight loss of TiCrAlSiN coating material was the lowest. Fig. 3b exhibits the effect of applied load on average weight loss values during the wear tests. The weight loss decreased when the applied load was at 5 N. Similarly, Fig. 3c also reveals that the weight loss decreased if the workpiece surface roughness of 0.02 μm was used to carry out the wear experiments. Although the ANOVA in Tab. 2 and analysis results from the main effect plots indicated the statistical significances of the influences of the three factors on the average weight loss values, interaction effect plots were the most useful tools to evaluate the effects of the three factors on the average weight loss values.

Interaction effect plot is one of the simplest and powerful graphical tools used to determine whether at least two factors are interacting or not [22]. There is

interaction between the factors if the two lines in the interaction effect plot are non-parallel. This indicates that the change in the average response from low level to high level of a factor relies upon the level of another factor. If the degree of departure from being parallel is higher, the interaction effect will be stronger. Fig. 4a illustrates the interaction effect plot between the coating type and applied load. The plot showed that the effects of the coating type at the two levels of applied load on average weight loss values were different. In addition, the effects of applied load at the three levels of coating type were different. Similarly, the results from the ANOVA indicated that the interaction between coating type and applied load was statistically significant at the level of significance of 0.05. The coating type of TiCrAlSiN exhibited the minimum weight loss when the applied load was kept at 5 N. Fig. 4b also showed that the coating type of TiCrAlSiN provided lower weight loss values when the workpiece surface roughness of 0.02 μm was used to carry out the wear tests. This confirmed that wear resistance increased with decreasing surface roughness of the coated materials. Furthermore, hardness of the coatings should be evaluated. The average hardness values of HC, TiAlSiN and TiCrAlSiN were approximately 8.9 GPa, 30.8 GPa and 29.6 GPa, respectively. The hardness values of TiAlSiN and

TiCrAlSiN were not significantly different. More statistical analysis for wear resistance of these materials should be further studied. Moreover, the optimal settings for wear resistant improvement should be investigated using graphical plot.

The 95% confidence interval plot is used to present average response and confidence interval for one or more factors [22]. This plot illustrates both a measure of central tendency (i.e., average response) and variability of the data (i.e., 95% confidence interval). Fig. 5 depicts 95% confidence interval plot of the weight loss values of HC, TiAlSiN and TiCrAlSiN with different applied loads and workpiece surface roughness values. The results clearly indicated that the average weight loss values of HC were higher than those of TiAlSiN and TiCrAlSiN when carrying out wear tests at different applied loads and workpiece surface roughness values. Moreover, the variations of weight loss values of HC were larger than those of TiAlSiN and TiCrAlSiN because the surface after HC plating allowed Cr atoms to consistently filled in the surface cavities causing substantially different weight loss values [23]. On the other hand, the averages and variations of weight loss values for TiAlSiN and TiCrAlSiN were not significant different. Some interval plots of the weight loss values of TiAlSiN and TiCrAlSiN exhibited overlapping. The 95% confidence intervals with overlapping implied that the difference in averages among wear testing conditions was statistically insignificant at the level of significance of 0.05. Hence the analyses suggested that the suitable operating conditions for wear resistant improvement were proposed as follows: 1) using the coating type of TiAlSiN with the workpiece surface roughness of 0.02 μm by carrying out the wear experiments at the applied load of 5 N 2) the coating type of TiCrAlSiN with the workpiece surface roughness of 0.02 μm by performing the wear tests at the applied load of 5 N and 3) the coating type of TiCrAlSiN with the workpiece surface roughness of 0.5 μm by carrying out the wear tests at the applied load of 5 N.

4 CONCLUSION

This work investigated the performances of TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings obtained by the FCA process compared to the hard-chrome plated stainless steel under the reciprocating wear tests in dry condition. A three-factor factorial design was used to prepare wear tests of the three materials with different applied loads and workpiece surface roughness values. The ANOVA was employed to investigate the influences of coating types, workpiece surface roughness and applied load on average weight loss values of the coatings from the wear tests. The findings of this study could be summarized as follows:

- The coating type, applied load and workpiece surface roughness were statistically significant at the level of significance of 0.05.
- The interaction between coating type and applied load was statistically significant at the level of significance of 0.05.
- The interaction between coating type and workpiece surface roughness was statistically significant at the level of significance of 0.05.

- If the workpiece surface roughness of 0.02 μm with the applied load of 5 N was used to carry out the wear tests, TiAlSiN and TiCrAlSiN coated specimens exhibited the lowest weight loss values.
- TiCrAlSiN coated specimens revealed higher wear resistance if the workpiece surface roughness of 0.5 μm with the applied load of 5 N was used to perform the wear tests.
- Wear resistance increased with increasing hardness of the coated materials.

Acknowledgement

The authors acknowledge funding supports from the Office of the Higher Education Commission of Thailand and the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant No. RSA 5980025.

5 REFERENCES

- [1] Cheng, Y. H., & Tay, B. K. (2003). Development of texture in TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. *Journal of Crystal Growth*, 252, 257-264. [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(03\)00871-6](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(03)00871-6)
- [2] Costa, M. Y. P., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., & Guimaraes, V. A. (2010). An investigation on sliding wear behavior of PVD coatings. *Tribology International*, 43, 2196-2202. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.07.002>
- [3] Sun, K. K., Pham, V. V., & Jae, W. L. (2003). Deposition of superhard nanolayered TiCrAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition. *Journal of Crystal Growth*, 252, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.020>
- [4] Rodríguez-Baracaldo, R., Benitob, J. A., Puchi-Cabrera, E. S., & Straiad, M.H. (2007). High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments. *Wear*, 262, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.010>
- [5] Çalışkan, H., Kurbanoglu C., Panian P., Çekada M., & Kramar, D. (2013). Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling. *Tribology International*, 62, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.035>
- [6] Faga, M. G., Gautier, G., Calzavarini, R., Perucca, M., Boot, E. A., Cartasegna, F., & Settineri, L. (2007). AlSiTiN nanocomposite coatings developed via arc cathodic PVD: evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear*, 263, 1306-1314. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.109>
- [7] Yu, D. H., Wang, C. Y., Cheng, X. L., & Zhang, F. L. (2009). Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. *Thin Solid Films*, 517, 4950-4955. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.091>
- [8] Sun, K. K., & Vinh, V. L. (2010). Cathodic arc plasma deposited TiAlSiN thin films using an Al-15 at.% Si cathode. *Thin Solid Films*, 518, 7483-7486. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.029>
- [9] Veprek, S., Männling, H. D., Jilek, M., & Holubar, P. (2004). Avoiding the high-temperature decomposition and softening of (Al_{1-x}Ti_x)N coatings by the formation of stable superhard nc-(Al_{1-x}Ti_x)N/a-Si₃N₄ nanocomposite. *Materials Science and Engineering: A*, 366, 202-205. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.052>
- [10] PalDey, S., & Deevi, S. C. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 342, 58-79. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00259-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00259-9)
- [11] Major, L. (2015). The wear mechanisms description of multilayer coatings, performed by transmission electron

- microscopy-an overview of the own research work. *Archives of Metallurgy and Materials*. 60(3B), 2319–2326. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0379>
- [12] Wu, Z. L., Li, Y. G., Wua, B., & Lei, M. K. (2015). Effect of microstructure on mechanical and tribological properties of TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 597, 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.047>
- [13] Barshilia, H. C., Shashidhara, M. G., Ramakrishna, R., & Rajam, K. S. (2010). Deposition and characterization of TiAlSiN nanocomposite coatings prepared by reactive pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering. *Applied Surface Science*. 256, 6420–6426. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.04.028>
- [14] Chen, T., Xie, Z. W., Gong, F., Luo, Z. Z., & Yang, Z. (2014). Correlation between microstructure evolution and high temperature properties of TiAlSiN hard coatings with different Si and Al content. *Applied Surface Science*. 314, 735–745. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.057>
- [15] Kim, S. K., Vinh, P. V., Lee, & W. J. (2008). Deposition of superhard nanolayered TiCrAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition. *Surface & Coatings Technology*. 202, 5395–5399. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.020>
- [16] Nguyen, T. D., Kim, S. K., & Lee, D. B. (2009). High-temperature oxidation of nano-multilayered TiCrAlSiN thin films in air. *Surface & Coatings Technology*. 204, 697–704. <https://doi.org/j.surfcoat.2009.09.008>
- [17] Tuchida, K., Wathanyu, K., & Surinphong, S. (2012). Thermal oxidation behavior of TiCrAlSiN and AlCrTiN films on hastelloyX. *Advance Materials Research*. 486, 400–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.486.400>
- [18] Martinho, R. P., Andrade, M. F. C., Silva, F. J. G., Alexandre, R. J. D., & Baptist, A. P. M. (2009). Micro-abrasion wear behaviour of TiCrAlSiN nanostructured coatings. *Wear*. 267, 1160–1165. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.063>
- [19] He, N., Li, H., Ji, L., Liu, X., Zhou, H., & Chen, J. (2016). High temperature tribological properties of TiAlSiN coatings produced by hybrid PVD technology. *Tribology International*. 98, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.02.034>
- [20] Kennedy, D. M., & Hashmi, M. S. J. (1998). Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *Journal of Material Processing Technology*. 77, 246–253. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00424-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00424-X)
- [21] Srisattayakul, P., Saikaew, C., Wisitsoraat, A., & Phokharatkul, D. (2017). Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel. *Wear*. 378–379, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.005>
- [22] Montgomery, D.C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*, 6th Ed., John Wiley & Sons, New York.
- [23] Khanchaiyaphum, S., Saikaew, C., Wisitsoraat, A., & Surinphong, S. (2017). Wear behaviours of filtered cathodic arc deposited TiN, TiAlSiN and TiCrAlSiN coatings on AISI 316 stainless steel fishing net-weaving machine components under dry soft-sliding against nylon fibres. *Wear*. 390–391, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.018>
- [24] Mrkvica, I., Neslusan, M., Cep, R., & Sleha, V. (2016). Properties and comparisons of PVD coatings. *Journal Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*. 23, 569–574. <https://doi.org/10.17559/TV-20140509105317>

Contact information:

Supakanya KHANCHAIYAPHUM, PhD

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen 40002 Thailand
Postal address 40002
E-mail: khansupa@yahoo.com

Charnnarong SAIKAEW, Associate Professor, PhD

(Corresponding author)
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen 40002 Thailand
Postal address 40002
E-mail: cham_sa@kku.ac.th

Surasak SURINPHONG, MS

NanoShield PVD Hard Coating Co., Ltd., Samutprakarn, 10560 Thailand
Postal address 10560
E-mail: info@nanoshield-pvd.com

PAPER • OPEN ACCESS

Influences of sputtering process factors on wear resistance of TiN coated on a machine component

To cite this article: Charnnarong Saikaew 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **503** 012023

View the [article online](#) for updates and enhancements.



IOP | ebooks™

Bringing you innovative digital publishing with leading voices to create your essential collection of books in STEM research.

Start exploring the **collection** - download the first chapter of every title for free.

Influences of sputtering process factors on wear resistance of TiN coated on a machine component

Charnnarong Saikaew

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen 40002 Thailand

E-mail: charn_sa@kku.ac.th

Abstract. In this work, effects of sputtering process factors including DC current, pressure and Ar to N₂ flow rate ratio on wear resistance of TiN coated on cast stainless steel of a fishing net-weaving machine part namely, an upper hook were systematically investigated using 2^k factorial design, analysis of variance (ANOVA) and other statistical tools. Wear testing experiments of the TiN coated upper hooks were carried out on the real fishing net weaving machine. A normal probability of effects and main and interaction effect plots of process factors were constructed in order to identify the statistically significant process factors and to determine an appropriate operating condition of the process factors with the lowest weight loss. The Ar to N₂ flow rate ratio and the interaction between the pressure and the Ar to N₂ flow rate ratio were found to be statistically significant while pressure and sputtering DC current were not statistically important.

1. Introduction

Titanium nitride (TiN) is widely used as a coating to harden and protect cutting and sliding surfaces in abundant tribological applications [1]. It has a cubic structure of NaCl type with modulus of elasticity of 250-450 GPa and high Vickers hardness of 18-21 GPa [2]. Its surface and material properties are considerably dependent on its creation process. The most common techniques for TiN coating are physical vapor depositions (PVD) including sputtering, filtered cathodic arc and electron beam evaporation and chemical vapor deposition (CVD) [3]. Sputtering is the most generally used method because of high quality thin film coating and well-controlled process. Normally, TiN is produced by reactive sputtering, in which sputtered Ti atoms are reacted with nitrogen ions to form TiN molecules [4].

Oblique angle deposition (OAD) technique is a modified deposition method, in which substrate is tilted at an angle greater than 70° with respect to the normal of deposition direction and rotated at a suitable speed [5]. It provides a functional control of surface nanostructures by shadowing effect and surface diffusion [6]. The main advantage of this technique is ability to control the diameter, shape density of nanostructures by varying the deposition conditions including rotation speed, oblique angle, operating pressure, gas mixing ratio and sputtering power. The technique is applied to TiN hard coating to produce high-density nanocolumnar structure, which could have an extreme hardness, low friction coefficient and very good wear resistance [7].

In this work, TiN was coated on cast stainless steel of a fishing net-weaving machine component namely, an upper hook by OAD technique with DC magnetron sputtering. A three factor, two level full factorial design was selected to investigate the effects of the three sputtering process factors on



average weight loss and determine an appropriate level of each process factor with minimization of weight loss.

2. Materials and procedure

The cast stainless steel upper hooks were made by the lost wax casting process and were machined by turning and milling operations. Chemical composition of the workpiece material consisted of 62.28% Fe, 21.99% Cr, 6.91% Ni, 3.12% Cu, 2.2% Si, 1.94% Mn and 1.56% Al. A vibratory finishing machine with mixed ball burnishing media in different sizes ranging from 5 to 8 mm was used for surface finishing. The oblique angle coating system included a high vacuum chamber equipped with a 3" target magnetron gun, 600 W radio frequency generator, 400 W DC power supply and a turbomolecular pump. Figure 1(a) illustrates an oblique angle sputtering schematic diagram. The titanium nitride was deposited on the upper hooks by reactive sputtering of pure titanium target under a mixture of argon (Ar) and nitrogen (N₂) gases. The oblique angle and rotation speed were fixed at 70° and 45 rpm, respectively. Figure 1(b) depicts a typical photograph of the upper hooks coated by TiN. Three process factors including DC current, operating pressure and Ar to N₂ flow rate ratio were simultaneously investigated using the full factorial design method. The ranges of sputtering DC current, pressure and Ar to N₂ flow rate ratio were 0.35 to 0.45 A, 50 to 100 Pa and 0.5 to 1.5, respectively. The TiN coatings were systematically performed according to the 2³ factorial design as shown in Table 1. The TiN coated upper hooks were then used to carry out the wear testing experiments on the fishing net-weaving machine with direct sliding between the upper hooks and the fishing net (nylon 6). After carrying out the wear testing experiments, each upper hook was cleaned with a dry cloth and then wiped clean with alcohol. Each hook was weighed with 4-digit scale and the weight loss data was recorded. The analysis of variance (ANOVA) was employed to investigate the influences of the three sputtering process factors on the wear resistance according to designed experiments.

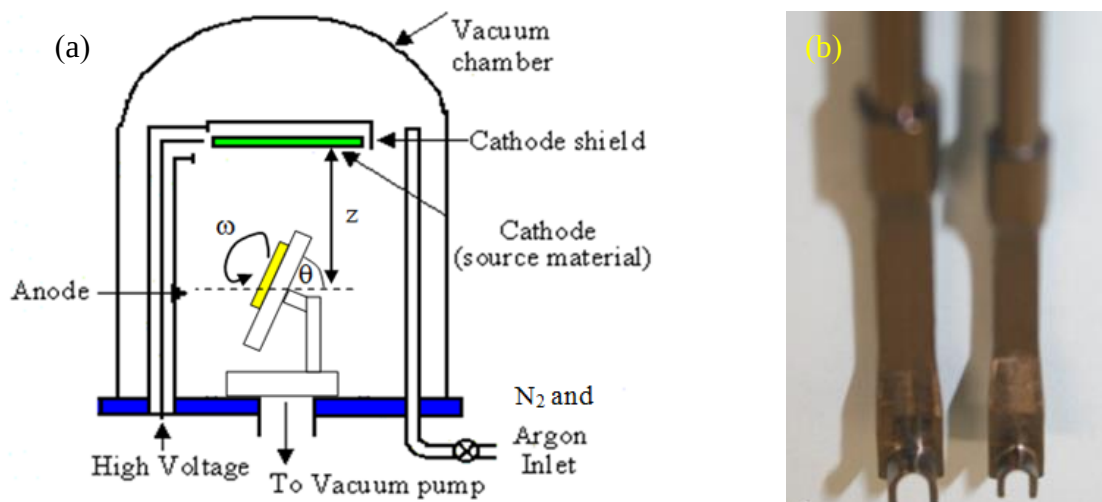


Figure 1. (a) An oblique angle sputtering schematic diagram (b) a typical photograph of upper hooks coated by TiN

Table 1. Factors and their levels in TiN coated on cast stainless steel process

Experimental run	DC current (A)	Pressure (Pa)	Ar /N ₂
1	0.35 (-)	50 (-)	0.50 (-)
2	0.45 (+)	50 (-)	0.50 (-)
3	0.35(-)	100 (+)	0.50 (-)
4	0.45 (+)	100 (+)	0.50 (-)
5	0.35 (-)	50 (-)	1.50 (+)
6	0.45 (+)	50 (-)	1.50 (+)

7	0.35 (-)	100 (+)	1.50 (+)
8	0.45 (+)	100 (+)	1.50 (+)

3. Results and discussion

Before performing ANOVA, the data set of weight loss values should be evaluated whether it distributes as normality. The probability plot was used to illustrate the data points, fitted line of the data points and associated confidence intervals (C.I.) based on parameters estimated from the data set along with an Anderson-Darling (AD) goodness-of-fit statistic and associated p -value [8]. Figure 2(a) illustrates probability plot of weight loss value. The probability plot shows that the plotted points of the complete data set of weight loss roughly form a straight line and fall within the 95% confidence interval. Moreover, AD statistic of the data set was small with high p -value compared to the level of significance of 0.05. This confirmed that normal probability distribution fitted the data set of the weight loss values capably. Furthermore, the adequacy of the underlying model should be checked using a primary diagnostic tool, residual analysis. Figure 2(b) displays a normal probability plot of residuals. If the underlying error distribution is normal, this plot will resemble a straight line [8]. Obviously, the normal probability plot of residuals for weight loss did not indicate anything particularly troublesome problem of normality. Hence the residual analysis was satisfactory.

The results from the 2^3 full factorial experiment were analyzed by a half normal probability plot of effects using the Design Expert software package [9]. A half normal probability plot of effects is a plot of the absolute value of the effect estimates against their cumulative normal probabilities [8]. The significant effects with nonzero means will not lie along the straight line while the effects that are imperceptible are normally distributed, with mean zero and variance σ^2 and will contribute to fall along a straight line on this plot. The straight line on the half normal plot always passes through the origin and passes close to the fiftieth percentile data value. Figure 3(a) presents the half normal plot of the effects for weight loss value. The important effects for the weight loss were factor C (Ar to N_2 flow rate ratio) and interaction between factor B (pressure) and factor C . Factor B was included to preserve hierarchy in the model. This implied that if the BC interaction was in the model, both the main effects B and C should be included. Pareto chart of effects is another tool used to evaluate the effects of the process factors. Figure 3(b) illustrates the Pareto chart of effects for this study. The lower horizon line indicates Student's t -test value for the minimum statistically significant effect magnitude for a level of significance of 0.05. Only factor B and BC interaction were higher than the threshold. Like the half normal plot of the effects, factor B was included to preserve hierarchy in the model. Thus, only pressure, Ar to N_2 flow rate ratio and the interaction between pressure and Ar to N_2 flow rate ratio were statistically significant at the level of significance of 0.05.

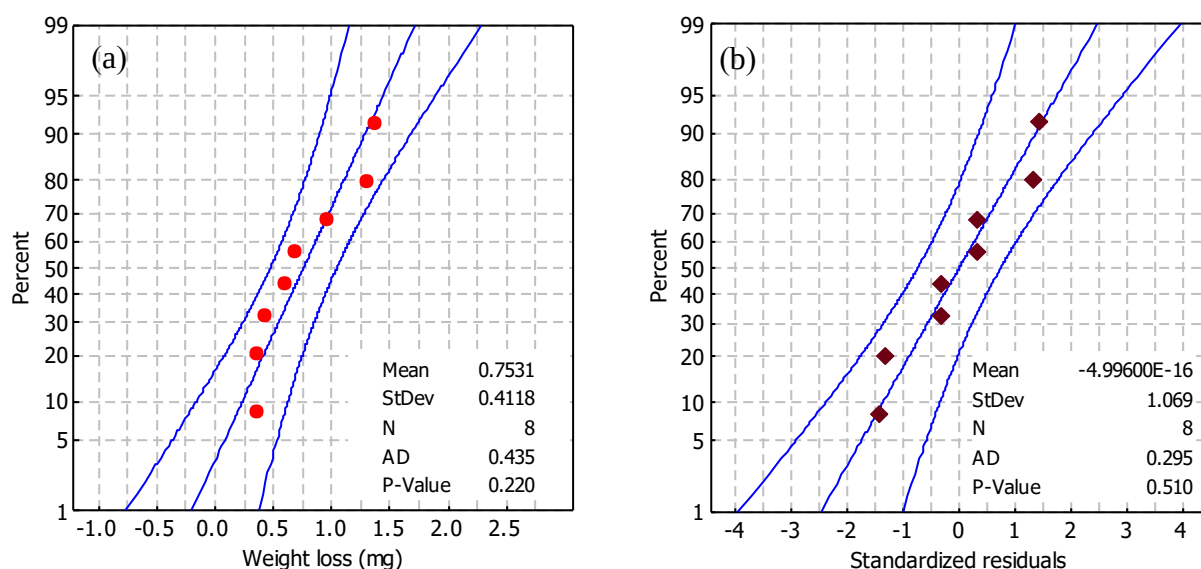


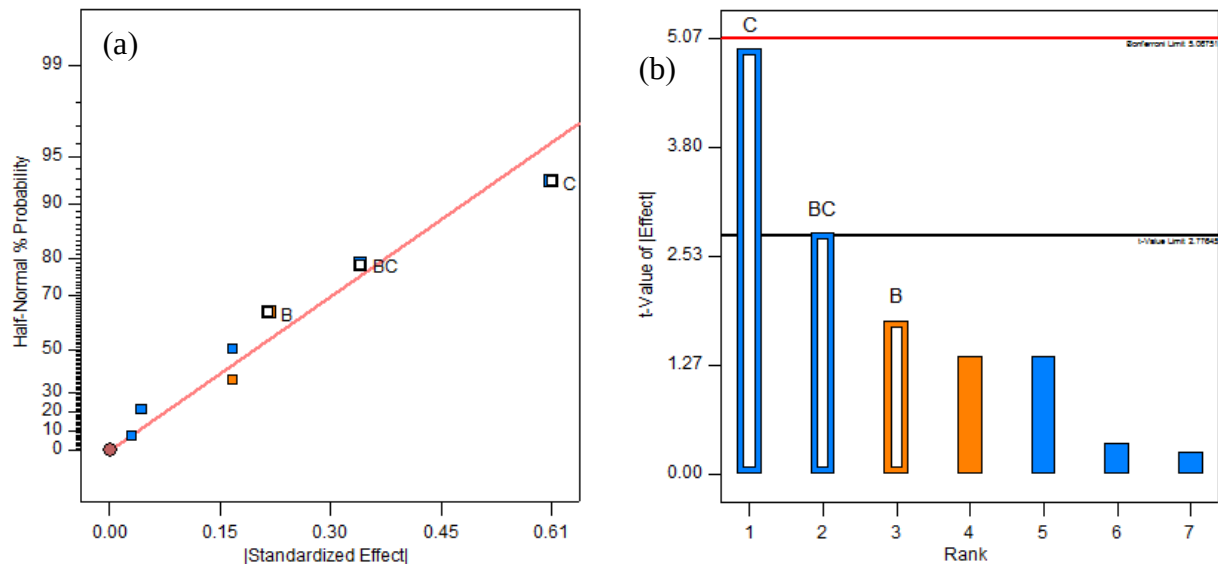
Figure 2. (a) Probability plot of weight loss value and (b) normal probability residual plot for weight loss**Figure 3.** (a) Half normal probability plot of effects and (b) Pareto chart of effects for weight loss value

Table 2 shows the effect estimates, sum of squares and percent contribution of the three sputtering factors on the weight loss of the TiN coated upper hooks. Based on variance component estimates, 61.94% of the total variation in weight loss value was due to the difference between the Ar to N₂ flow rate ratio levels while 19.91% resulted from the differences between pressure levels and Ar to N₂ flow rate ratio levels. Hence Ar to N₂ flow rate ratio was approximately three times as influential as the interaction between the pressure and the Ar to N₂ flow rate ratio.

Table 2. Effect estimates, sum of squares and percent contribution

Model term	Effect estimate	Sum of squares	Percent contribution
A-DC current	0.17	0.057	4.80
B-Pressure	0.22	0.096	8.06
C-Ar/N ₂	-0.61	0.740	61.94
AB	-0.17	0.057	4.80
AC	-0.044	0.004	0.32
BC	-0.34	0.240	19.91
ABC	-0.031	0.002	0.16

The effects of the statistical significance of the three sputtering factors on the weight loss of the TiN coated upper hooks were evaluated by ANOVA as shown in Table 3. The results in Table 3 were analyzed with ANOVA used for investigating the influence of the three sputtering factors on response weight loss. Table 3 reveals that the model *F*-value of 11.89 with a *p*-value of 0.0184 was adequate. A coefficient of determination (*R*²) of 0.8992 defined as the ratio of the explained variation to the total variation and was a measure of the degree of fit. The adjusted *R*² of 0.8235 was in reasonable agreement. This concluded that the Ar to N₂ flow rate ratio and the interaction between the pressure and Ar to N₂ flow rate ratio significantly affected the mean weight loss at the level of significance of 0.05.

The statistical model of weight loss as the function of pressure, Ar to N₂ flow rate ratio and the interaction between the pressure and the Ar to N₂ flow rate ratio was expressed in Eq. (1):

$$\text{weight loss} = 0.75 + 0.11B - 0.3C - 0.17BC \quad (1)$$

where *weight loss* represented the response variable, *B* denoted pressure and *C* was Ar to N₂ flow rate ratio. The equation was in terms of coded factors on the -1, +1 scale.

Table 3. ANOVA table for weight loss

Source	Df	SS	MS	F-value	p-value
Model	3	1.07	0.36	11.89	0.0184
<i>B</i> -Pressure	1	0.09	0.09	3.20	0.1482
<i>C</i> -Ar/N ₂	1	0.74	0.74	24.57	0.0077
<i>BC</i>	1	0.24	0.24	7.90	0.0483
Error	4	0.12	0.03		
Total	7	1.19			
PRESS = 0.48 $R^2 = 0.8992$ Adj. $R^2 = 0.8235$					

Figure 4(a) presents a plot of actual weight loss versus the predicted weight loss values. This plot shows the prediction capability of the model. The relationship between the actual value and the predicted value of weight loss was expressed in Eq. (2):

$$\hat{P} = 0.076 + 0.8992 \text{weight loss} \quad (2)$$

where $\hat{P}$ represented the predicted weight loss whereas *weight loss* denoted the actual value. The R^2 was 0.899 indicating the model in Eq. (2) accounted for 89.9% of the variability in the data. The intercept of the linear model was close to zero and the slope was about 1. The plot indicated that model could satisfactorily be used in predicting the weight loss response. Similarly, Figure 4(b) also shows the pair difference between the actual value and the predicted value of weight loss in each experimental run. This plot clearly indicated that there was a small difference between the actual value and the predicted value of weight loss in each experimental run. This also confirmed that the model in Eq. (1) was adequate.

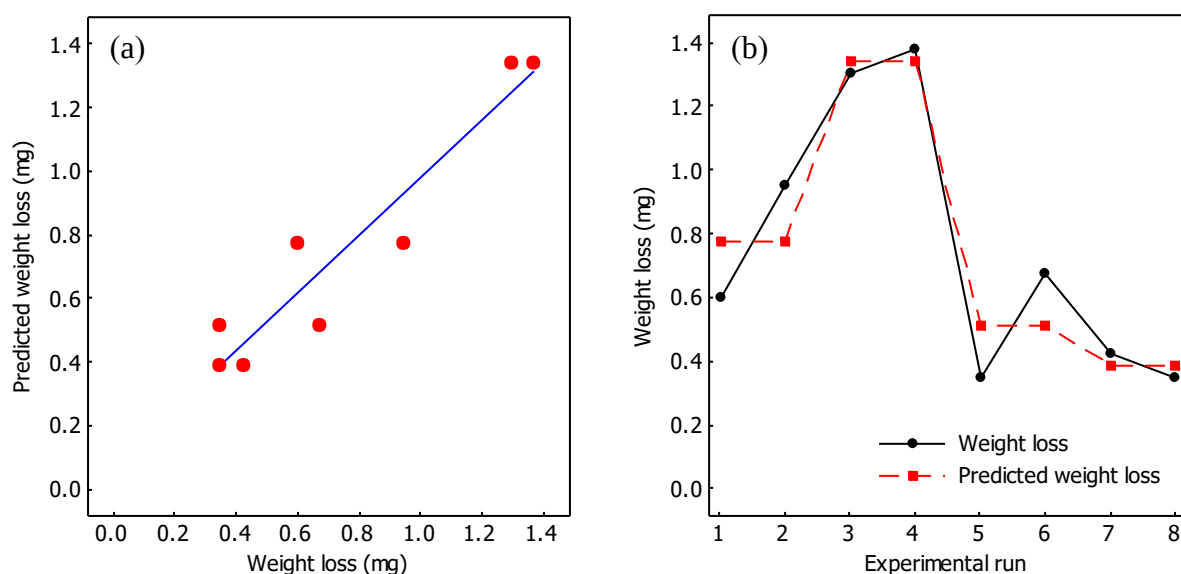
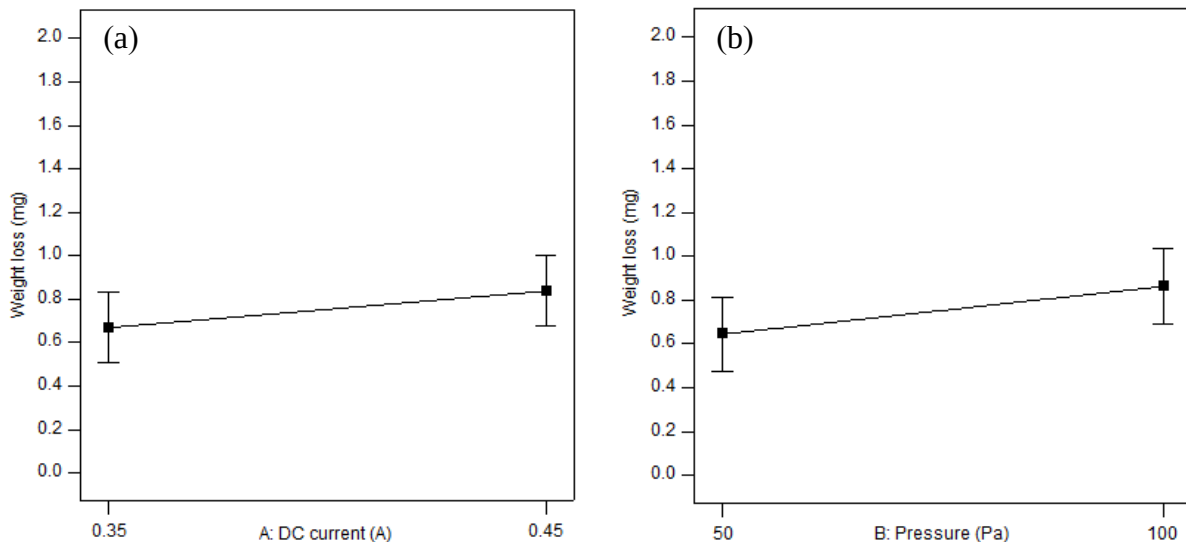


Figure 4. (a) Scatter plot between actual weight loss and predicted weight loss and (b) the pair difference between the actual value and the predicted value in each experimental run

The objective of this study was to minimize weight loss of the TiN coated upper hooks after carrying out the wear testing experiments. To assist in accomplishing this objective, graphical methods can be effectively used. A main effect plot is a graph of the averages at each level of a factor [8]. A main effect occurs when the average response changes across the levels of a factor. The main effect plot is employed to compare the relative strength of the effect of the factor. Although this plot is useful to compare main effect, the ANOVA table is a primary tool used to significantly assess the influence of the factor. The main effect plots displayed in Figures 5(a) and 5(b) prove that there were no statistically significant differences of the averages weight loss values between the two levels of the factor DC current and the factor pressure. On the other hand, there was a statistically significant difference between the two levels of the factor Ar to N₂ flow rate ratio as shown in Figure 5(c). The main effects do not have much meaning when they are involved in statistically significant interactions [8]. Hence it is necessary to evaluate any interactions that are important. In order to interpret interaction effectively, an interaction plot was constructed as illustrated in Figure 5(d), (Pressure and Ar/N₂ interaction). The non-parallel lines revealed that there was a strong interaction between pressure and Ar to N₂ flow rate ratio. The interaction indicated that Ar to N₂ flow rate ratio had little effect at high (+) Ar to N₂ flow rate ratio but a high positive effect at low (-) Ar to N₂ flow rate ratio. The pressure effect was very small when the Ar to N₂ flow rate ratio was at the high level and very large when the Ar to N₂ flow rate ratio was at the low level. However, the effect of Ar to N₂ flow rate ratio was not different at low level of pressure. Therefore, the minimum weight loss value was obtained when pressure and Ar to N₂ flow rate ratio were at low levels (i.e., pressure at 50 Pa and Ar to N₂ flow rate ratio at 0.5). This would allow the reduction of the Ar to a lower production cost. The previous studies have found that as a flow rate of Ar decreases, the grain size of TiN coating decreases resulting higher hardness as well as wear resistance improvement [1,10,11]. In addition, the effect of DC current was not different. Hence weight loss value was preferred for lower level of DC current.



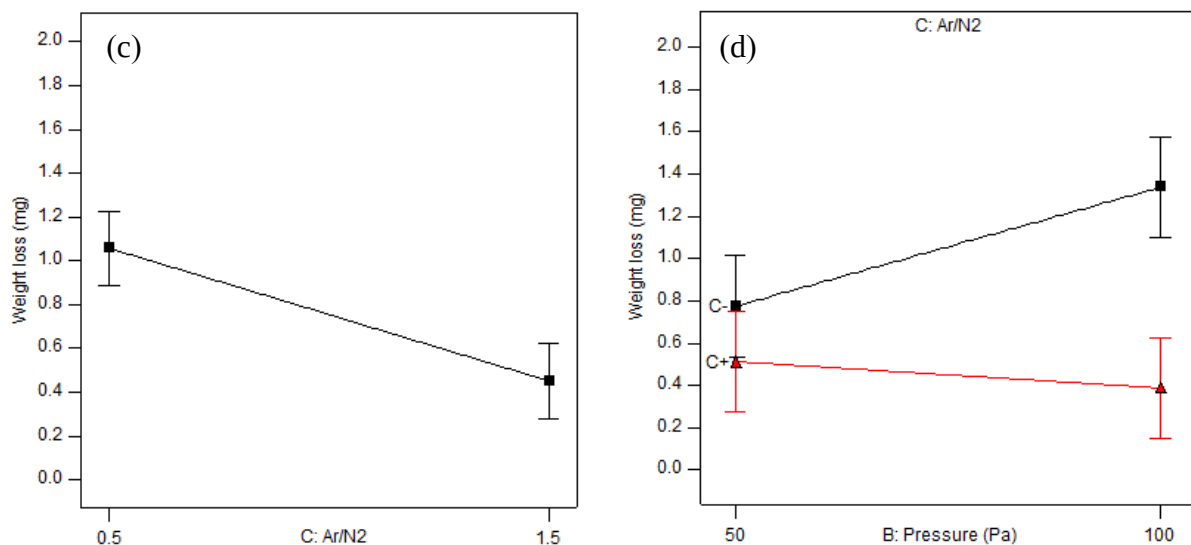


Figure 5. Effect graphs for factors (a) DC current (b) pressure (c) Ar to N₂ flow rate ratio and (d) interaction between pressure and Ar to N₂ flow rate ratio

4. Conclusion

This study had shown how statistically designed experiments combined with other statistical techniques could be used for investigating the influences of sputtering process factors affecting weight loss of TiN coated fishing net weaving machine component during carrying out the wear testing experiments. A normal probability of main and interaction effects of process factors was plotted against cumulative probability in order to identify the statistically significant process factors. The Ar to N₂ flow rate ratio and the interaction between the pressure and the Ar to N₂ flow rate ratio were found to be statistically significant at the level of significance of 0.05. An appropriate operating condition of the process factors was at DC current of 0.35 A, pressure of 50 Pa and Ar to N₂ flow rate ratio of 0.5.

Acknowledgements

This research is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant no. RSA 5980025.

References

- [1] Bahri A, Guermazi N, Elleuch K and Urgan M 2015 *Wear* **342-343** 77-84
- [2] Stone D S, Yoder K B, and Sproul W D 1991 *J. Vac. Sci. Technol. A*, **9(4)** 2543-7
- [3] Kim G S, Lee S Y, Hahn J H, Lee B Y, Han J G, Lee J H and Lee S Y. 2003 *Surf. Coat. Technol.* **171** 83-90
- [4] Pham V H, Yook S W, Lee E J, Li Y, Jeon G, Lee J J, Kim H E and Koh Y H 2011 *J. Mater. Sci.* **22** 2231-7
- [5] Knorr T G and Hoffman R W 1959 *Phys. Rev.* **113** 1039-46
- [6] Lintymer J, Martin N, Chappe J M, Delobelle P, Takadoun J 2004 *Surf. Coat. Technol.* **180C-181C** 26-32
- [7] Lintymer J, Martin N, Chappe J M and Takadoun J 2008. *Wear* **264** 444-9.
- [8] Montgomery D C 2001 *Design and Analysis of Experiments* 6th ed John Wiley & Sons New York 2001
- [9] Stat Ease, Inc. Design Expert Version 7 User's Manual. Stat Ease, Inc. Minneapolis, MN. (2005)
- [10] Raoufi M, Mirdamadi S and Mahboubi F 2011 *Surf. Coat. Technol.* **205** 4980-4
- [11] Nishat A, Junqing L, Yun K J, Chan G L, Jae H Y and Faheem A 2012 *Mater. Chem. Phys.* **134** 839-44

Effect of surface treatments on wear resistance of spring steel wire as a work-piece material of a fishing net-weaving machine component

Naphatara Intanon & Charnnarong Saikaew*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002 Thailand

Received 24 September 2014; accepted 13 August 2015

Wear resistance of lower hook, an important fishing net-weaving machine component made from spring steel wire, was improved by systematically investigating the influences of manufacturing factors using experimental design and response surface methodology (RSM). Three manufacturing factors of hard-chrome plated lower hooks including hook forming temperature, plating time and polishing condition were studied and optimized for maximum wear resistance. It was found by statistical analysis of variance (ANOVA) that the polishing condition and the interaction between hook forming temperature and plating time significantly affected the hardness of hooks. The hook forming temperature of 30°C, plating time of 80 min, and thread and polishing condition were found to be the optimal manufacturing condition by RSM coupled with desirability function and were proven to give higher wear resistance of the hook compared with those produced with non-optimal condition.

Keywords: Spring steel wire, Fishing net-weaving machine, Sliding wear, Wear resistance, Hard chrome process

Wear rate of a tool and a work-piece depends on the tool/work-piece material, its manufacturing process as well as operating/application conditions. For abrasive or sliding wear mechanisms, the key factors that determine wear rate include the friction coefficient of materials, the frictional force, sliding speed and the hardness of softer material. Under the same working conditions, the type of work-piece material is the main factor that determines the wear rate. For instance, the wear rate of typical steel (AISI 1340) is affected by the grinder roughness while the rubbing force has very little influence on the wear rate. In contrast, the sliding distance is a major factor that affects the wear rate of tool steel (AISI 1020 and 1050)¹. In addition, the wear rate increases significantly with increasing applied pressure and sliding distance but decreases with increasing sliding speed because the friction coefficient decreases^{2,3}. Wear resistance of a material is also affected by treatment process. It has been reported that the wear resistance of steel alloy is increased after heat treatment due to microstructure transformation⁴. However, the work-piece operates under high temperature conditions, wear of material will increase due to decreasing of the bonding strength of atoms at high temperature⁵.

The surface roughness of contacting surfaces is another important factor affecting the wear resistance. The wear resistance will decrease if the roughness of contacting surface increases because the friction coefficient (μ) of the surface reduces with increasing surface roughness⁶. However, the wear rate does not depend on the frictional coefficient alone because the coefficient will be changed due to the surface modification as a result of abrasion. Nevertheless, a rough surface with a low friction coefficient generally suffers from a relatively high wear rate and surface smoothening can help reducing the adhesive or fretting wear⁷. In addition, the smoothened surface should also have high hardness to minimize abrasive wear and it should be resistant to chemical oxidation. Hard coating is one of the most effective approaches to obtain these surface properties.

Hard chromizing coating is a widely used hard coating technique to deposit a layer of hard chrome as well as chromium compounds such as chromium nitride and carbide. It has been applied on various metal structures such as P110 oil casting tube steel and austenitic alloys to improve the wear performance and increase the operating life-time^{8,9}. The chromizing coating has been shown to exhibit excellent adhesion strength and high surface hardness, resulting in substantially improved wear resistance and low mass loss compared with untreated surface. Hard chrome

*Corresponding author (E-mail: charn_sa@kku.ac.th)

plating is a common chromizing-coating method, which is well-known for more than 80 years. It is a low cost and effective mean to improve structural strength, hardness, surface smoothness, and wear resistance of a solid part. The thickness of the hard chrome plating can be largely varied from 5 μm to 1 mm, which can increase the surface hardness to over 60 HRC. In addition, the wear resistance of plated hard chrome surface is substantially improved with increasing hard chrome thickness¹⁰. The hard chrome thickness monotonically increases with increasing plating time as well as temperature of plating solution. It also increases with the concentration of chromic acid in the plating solution but will begin to decrease if the concentration exceeds 282 g/L¹¹. The ratio of sulfuric to chromic acid is another important factor that affects the thickness with 0.0075 being an optimum value. In addition to the hard chrome thickness, other key factors affecting the wear resistance of hard chrome coating include the smoothness and cleanliness of the work-piece, which depend considerably on specimen preparation prior to chrome plating.

To effectively apply hard chrome, it is thus important to optimize the conditions of hard chrome plating process for each tribological application to maximize wear resistance, reduce production cost, and increase product quality. Fishing net-weaving machine for industrial net production is an interesting tribological application that has considerable economic impact due to its large commodity market. A fishing net-weaving machine generally uses two kinds of hook called upper and lower hooks to perform net weaving operation. Typically each machine contains 500-700 lower hooks, depending on the machine size. Normally, these hooks must be frequently replaced due to rapid dry sliding wear occurred at non-lubricated contacts between lower hooks and high-tension nets during weaving operation and each hook is made to be easily substituted by a technician. It is thus an important component that affects the quality of net products and its consumption per machine is large. The lower hook is usually made from spring steel wire with 1.8 to 2.0 mm in diameter and 4-6 cm length. It can be produced by a standard forming process, including cutting, folding, grinding, and plating with hard-chrome as illustrated in Fig. 1. The cost of the hook contributes a considerable portion of net production cost. It is thus of interest to improve the wear resistance of the hook, resulting in

increase of lifetime, reduction of the number of hooks required in weaving operation, and improvement of the net product quality. In this work, the manufacturing factors of hard-chrome plated lower hooks of a fishing net-weaving machine for fishing-net production were studied and optimized by means of experimental design and RSM.

Materials and Methods

Materials used in the experiment was spring steel wire JIS G 3522-1991 SWP-A ($C = 0.60\text{-}0.95\text{ wt\%}$, $Si = 0.12\text{-}0.32\text{ wt\%}$, $Mn = 0.3\text{-}0.9\text{ wt\%}$). Fiber nets used in the experiment was made of nylon 66 with a diameter of 0.12 mm. Since the smoothness and thickness of the coating surface substantially affected the wear resistance^{7,10}, the work-pieces were polished to smoothen the surface before hard chrome plating. From the production process consideration, there were three main factors affecting the quality of hard chrome surface. These included temperature for hook forming, hard chrome plating time, and condition of hook polishing. In the present study, each factor was assigned into two levels. The lower and upper levels of hook forming temperature (factor *A*) were 30 and 180°C, respectively while the lower and upper values for plating time (factor *B*) were 40 and 80 min, respectively. For polishing condition (factor *C*), the first one (considered as the lower level) was scrubbing with abrasive filament (thread) and the upper level combines scrubbing and fine polishing (thread & polishing). All hooks were scrubbed with thread to a 40–60 μm surface finish and then divided into two sets. The first set will proceed to cleaning and chrome plating while the rest will be fine polished using an in-house polishing machine with emery cloth and 5 μm polishing slurry for one hour. Next, they are cleaned by dipping in a sulfuric acid-based solution and rinsing in deionized (DI) water. Electroplating of hard-chrome was then conducted in the standard chrome bath containing chromic acid (250 g/L) and sulfuric acid (100:1) at 55°C with a current density of $\sim 0.3\text{ A/cm}^2$. Lastly, the samples were rinsed in DI water and dried by nitrogen.

A series of hook production experiments were then conducted according to the central composite design (CCD) with 3 factors as given in Table 1. *A*, *B*, and *C* represent process factors of surface treatment temperature, time for hard chrome plating, and surface polishing on the smooth curved hook, respectively. *T* represents a type of surface polishing



Fig. 1 – Lower hook manufacturing process

with thread whereas T & P represents another type of surface polishing with thread and polishing. The hardness of the produced hook was measured by a micro hardness testing machine (Galileo, Microscan OD). Wear resistance test was then carried out using a fishing net-weaving machine (Fig. 2) with direct sliding between the hook and woven net over a set of controlled sliding distances of 18000, 36000, 54000 and 72000 m, respectively. Wear rate was determined from weight loss of hard chrome plated hook calculated from the difference of weight before and after testing with each sliding distance using a 5-digit precision scale. The ANOVA was then used to evaluate the influence of each factor in the hard chrome plating process on the wear resistance and hardness of the hooks produced according to the designed experiments. In addition, RSM was used to determine the appropriate values of the factors in the hook production process that provide the maximum wear resistance or the lowest weight loss.

Results and Discussion

The hardness values of hooks produced in all experiments are plotted as shown in Fig. 3 and the weight lost values from all phases of the wear experiments are graphically illustrated in Fig. 4. It is seen that the hardness and weight lost values in each phase of the test are not always in correspondence and the hook with higher hardness does not necessarily have lower weight lost or higher wear resistance.

Table 1 – The central composite design matrix with the values of process factors

Trial	Factor		
	A	B	C
1	30	40	T
2	180	40	T
3	30	80	T
4	180	80	T
5	0	60	T
6	211	60	T
7	105	32	T
8	105	88	T
9	105	60	T
10	105	60	T
11	105	60	T
12	105	60	T
13	105	60	T
14	30	40	T & P
15	180	40	T & P
16	30	80	T & P
17	180	80	T & P
18	0	60	T & P
19	211	60	T & P
20	105	32	T & P
21	105	88	T & P
22	105	60	T & P
23	105	60	T & P
24	105	60	T & P
25	105	60	T & P
26	105	60	T & P



Fig. 2 – Fishing net-weaving machine and the lower hooks

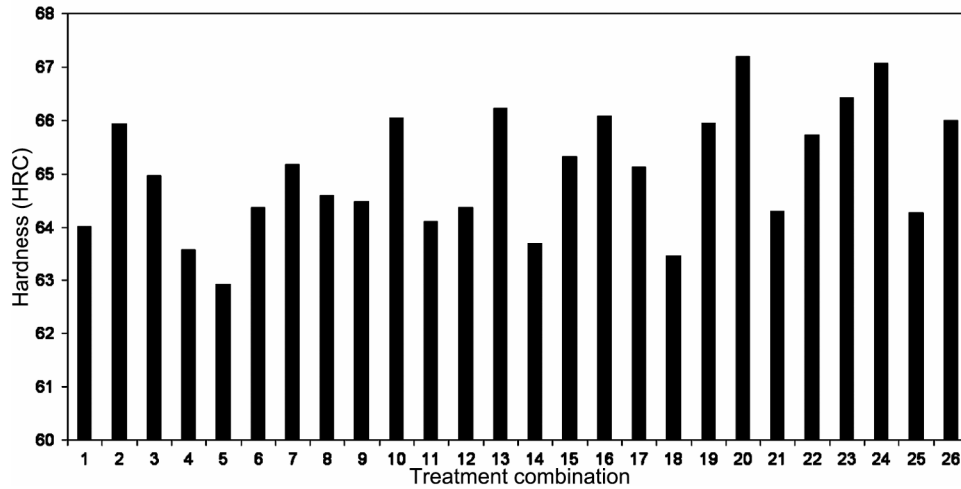


Fig. 3 – Hardness of lower hook for each of hard-chrome surface treatment combination

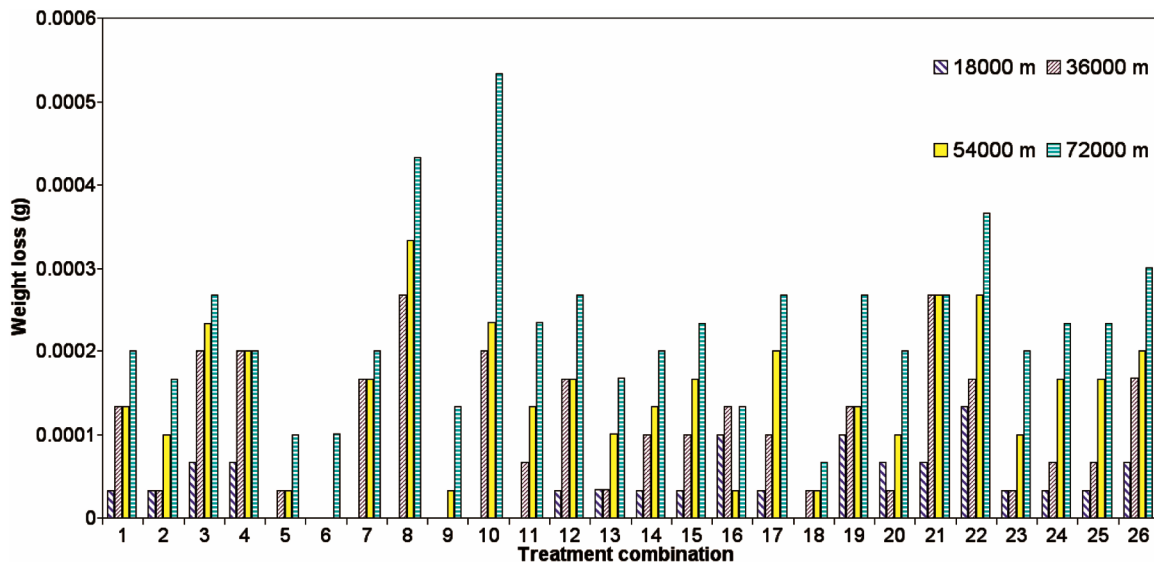


Fig. 4 – Weight loss of lower hook after wear experiments with various sliding distances

Effect of the three factors on hardness

Significant factors affecting the hardness of the hook were identified by ANOVA as shown in Table 2. From the table, the small model p -value of 0.0068 indicated that the obtained hardness model was statistically significant. In addition, the lack of fit p -value of 0.2102 was insignificant relative to the pure error at the significance level of 0.05. Non-significant lack of fit suggested a good fit of the model to the data set. The polishing condition (factor C) significantly affected the hardness of hooks at the level of significance 0.05. The interaction between hook forming temperature (factor A) and plating time (factor B) also significantly affected the hardness of hooks. In general, the analysis of effect from

interaction between factors provided more meaningful interpretation than the impacts of main factors (main effect)¹². In this case, the hardness change dependence on the change of hook forming temperature (factor A) depended on the level of plating time (factor B). The change was in one direction at the low level of plating time (factor B) of 40 min while it would be in the different direction at the high level of plating time (factor B) of 80 min. Conversely, it could also be interpreted that hardness change dependence on the change in plating time (factor B) depended on the level of temperature (factor A). The change was in one direction at the low level of temperature (factor A) of 30°C and then diverted to another direction at the high level

Table 2 – ANOVA for hardness

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	10.47	4	2.62	4.77	0.0068
A-Temperature	0.15	1	0.15	0.28	0.6045
B-Time	1.22	1	1.22	2.23	0.1502
C-Surface polishing	3.70	1	3.70	6.74	0.0168
AB	5.40	1	5.40	9.83	0.0050
Residual	11.52	21	0.55		
Lack of fit	8.56	13	0.66	1.78	0.2102
Pure error	2.97	8	0.37		
Cor Total	22.00	25			

of temperature (factor A) of 180°C. The regression model obtained from ANOVA yielded the relationship between the predicted hardness value and all factors as Eq. (1):

$$\text{hardness} = 62.18 + 0.097A + 0.28B + 0.38C - 0.82AB \quad \dots (1)$$

The regression equation could be represented as the contour plots as shown in Fig. 5. The analysis results of the contour plots were consistent with the results of ANOVA. The polishing condition (factor C) had larger positive coefficient value than other factors, indicating its relatively high level of significance. In addition, the higher polishing level (thread & polishing) would result in the higher surface hardness. Moreover, the large negative coefficient of interaction term between the hook forming temperature and the plating time indicated the strong influence of the interaction on hardness. The experimental results showed that hardness was high for lower hook forming temperature (room temperature or 30°C) and long plating time (80 min) and the hardness would be further increased if the work piece was better polished. This was consistent with the general forming theory that cold forming will produce high surface hardness due to induced strain on the surface (strain hardening)¹⁰ and is in agreement with several reports that longer plating time results in thicker coating and higher hardness¹¹.

Effect of the three factors on weight loss

Key factors influencing the weight loss of the hook were determined by ANOVA. The model *p*-value of 0.007 implied the model was significant at the level of significance 0.05. Also, the lack of fit *p*-value of 0.9439 was not significant relative to the pure error, indicating that the data set is fitted well with the model. The analysis results indicated that the effects

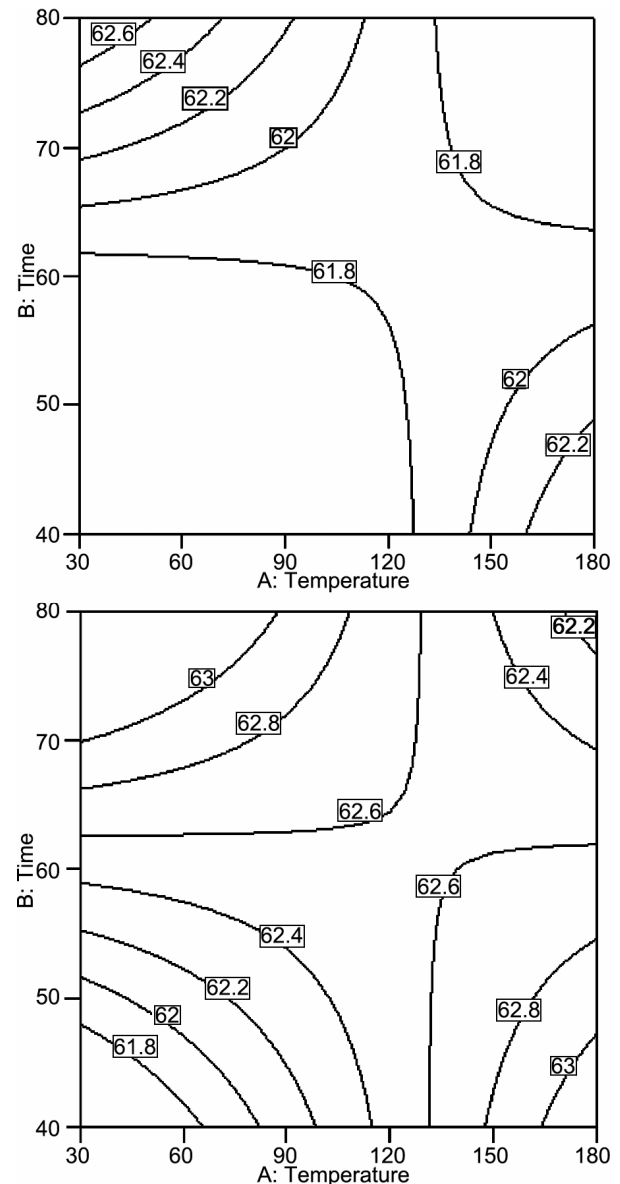


Fig. 5 – Contour plots for hardness by holding (a) thread constant and (b) thread & polishing constant

Table 3 – ANOVA for weight loss after conducting wear resistance testing on the fishing net-weaving machine with sliding distance of 72,000 m

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	1.506×10^{-7}	5	3.011×10^{-8}	4.43	0.0070
A-Temperature	3.643×10^{-9}	1	3.643×10^{-9}	0.54	0.4725
B-Time	4.332×10^{-8}	1	4.332×10^{-8}	6.38	0.0201
C-Surface polishing	9.846×10^{-10}	1	9.846×10^{-10}	0.14	0.7074
BC	3.475×10^{-8}	1	3.475×10^{-8}	5.12	0.0350
A ²	6.785×10^{-8}	1	6.785×10^{-8}	9.99	0.0049
Residual	1.358×10^{-7}	20	6.792×10^{-9}		
Lack of fit	4.800×10^{-8}	12	4.000×10^{-9}	0.36	0.9439
Pure error	8.784×10^{-8}	8	1.098×10^{-8}		
Cor Total	2.864×10^{-7}	25			

of all factors and interactions among them on the weight losses of the hook after wear testing with sliding distances of 18000, 36000 and 54000 m were not statistically significant at the level of significance 0.05. Thus, the hook forming temperature, the plating time of hard chrome, and surface preparation conditions did not affect the wear of the hook when the sliding distance was less than 54000 m. However, when the sliding distance was increased to 72000 m, the results of ANOVA as given in Table 3 revealed that the plating time (factor B) as well as the interaction between the plating time (factor B) and the polishing condition (factor C) became important effects at the level of significance 0.05. The regression model based on ANOVA gave the relationship between the predicted weight loss value and all factors as Eq. (2):

$$\begin{aligned} \text{weight loss} = & 2.426 \times 10^{-4} + 1.509 \times 10^{-5} A + 5.203 \times 10^{-5} B \\ & + 6.154 \times 10^{-6} C - 4.661 \times 10^{-5} BC - 6.924 \times 10^{-5} A^2 \\ & \dots (2) \end{aligned}$$

The contour plots representing the regression equation are shown in Fig. 6. From the contour plots, the weight loss of the hook with only thread condition decreased as the plating time reduced at a fixed hook forming temperature (Fig. 6 (a)). In contrast, the weight loss of the hook with thread & polishing condition was almost independent of the plating time (Fig. 6(b)).

Optimal manufacturing condition

The optimal manufacturing condition is determined by RSM coupled with desirability function^{13,14}. At the optimal condition for a minimum weight loss, the hook forming temperature (factor A), plating time (factor B), and polishing condition (factor C) were 30°C, 80 min,

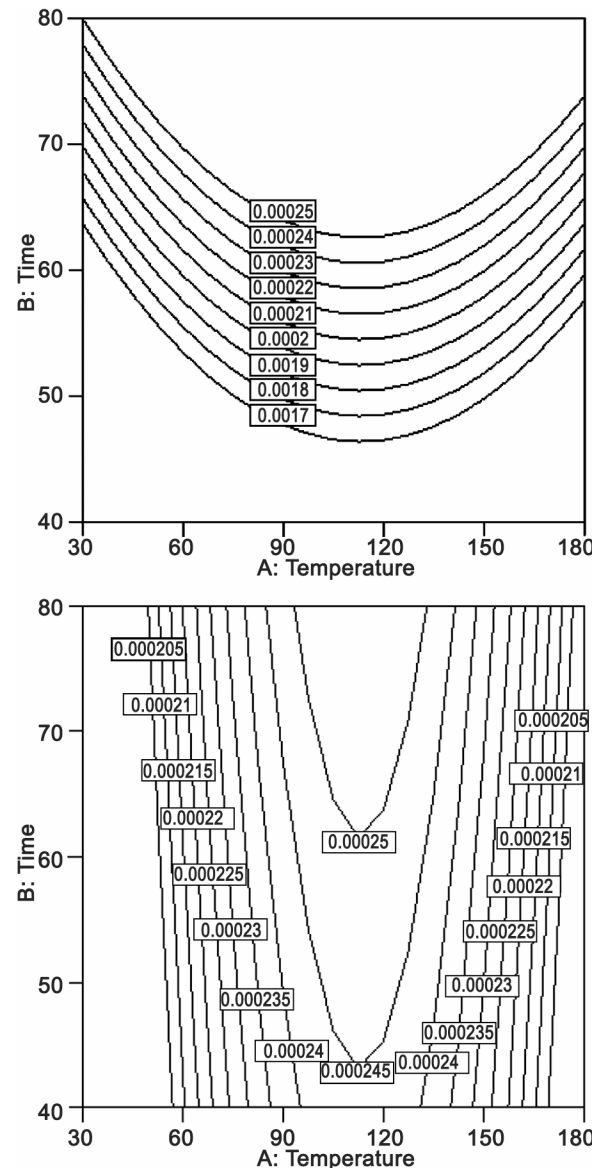


Fig. 6 – Contour plots for weight loss by holding (a) thread constant and (b) thread & polishing constant

and thread & polishing, respectively. The result confirmed that lower hook forming temperature, long plating time, and fine polishing resulted in an optimum wear resistance. This result was consistent with the preceding analysis that wear resistance was improved with low forming temperature due to increased hardness induced by strain and fine polishing due to better surface smoothness while the long plating time was selected to maximize allowable weight loss due to the increase thickness, which were in accordance with other reports^{6,7,10}.

Scanning electron microscopic images in Fig. 7 (a) and (b) illustrate wears of the hook tested with sliding

distance of approximately 100000 m. The hook was produced using a non-optimal condition with a hard chrome plating time of 60 min, a lower hook forming temperature of 30°C, and thread polishing condition, which was considered as a conventional condition for hook manufacturing. The wear surface was smooth and the material removal was unidirectional indicating abrasive wear mechanism. Many cracks were seen on sliding edges, signifying the fracture wear mechanism, which was believed to occur when the wear extended beyond the plated hard chrome layer.

Figure 8 shows high-magnification SEM images of hook surface produced with non-optimal

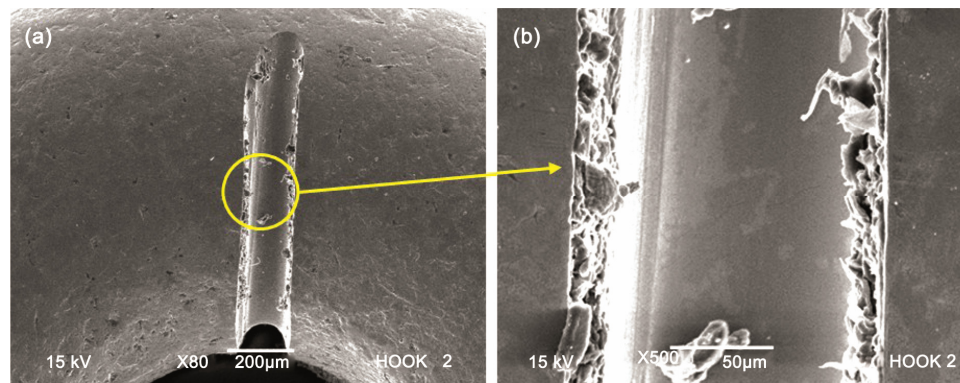


Fig. 7 – SEM micrographs of lower hook surface after wear resistance test with sliding distances of approximately 100000 m

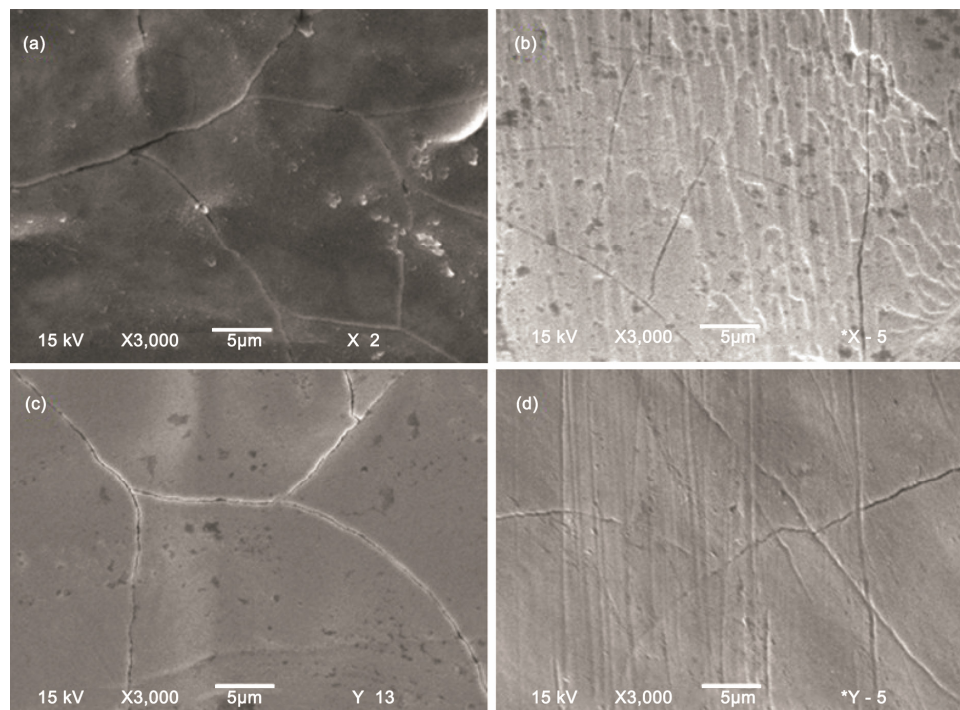


Fig. 8 – SEM micrographs of a conventional lower hook surface (a) before and (b) after wear test with the sliding distance of 72000 m and SEM micrographs of an optimized lower hook surface (c) before and (d) after wear test with the sliding distance of 72000 m

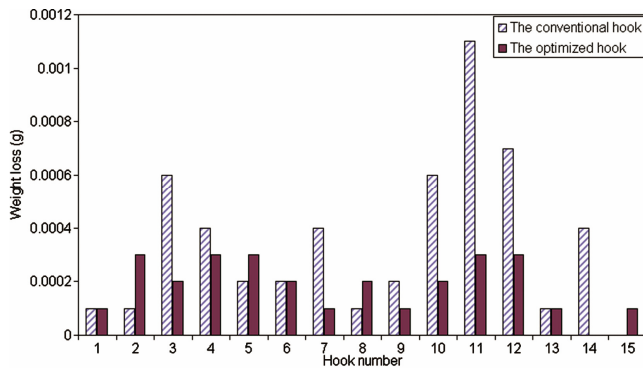


Fig. 9 – Weight loss values of lower hooks made with the conventional and optimized hard chrome process

(conventional) and optimal conditions before and after the wear test with a sliding distance of 72000 m. It was apparent that the wear surface of the hook produced at the optimal condition was considerably smoother than that produced at the non-optimal conditions. Figure 9 shows a comparison of the weight loss of the hook produced at non-optimal and optimal condition. It was obvious that the average weight loss of the hooks manufactured at optimal condition was significantly lower than that of those made at non-optimal condition. Therefore, the wear and life time of the hook were effectively improved by means of designed experiments and RSM. The methods were potentially useful for improving wear resistance other products, which would eventually lead to lower operating cost and better end-product quality.

Conclusions

In conclusions, three manufacturing factors of hard-chrome plated lower hooks including hook forming temperature, plating time, and polishing condition were studied and optimized for minimum wear by means of experimental design and RSM. It was found that the polishing condition and the interaction between hook forming temperature and plating time significantly affected the hardness of hooks. In addition, the hardness was high for lower hook forming temperature and long plating time. The hardness would be further increased if the work piece was better polished. It was observed statistical insignificance of the studied factors for the wear tests

with sliding distances up to 54000 long. The plating time as well as the interaction between the plating time and polishing condition became important when the sliding distance was increased to 72000 long. The hook forming temperature of 30°C, plating time of 80 min, and thread & polishing condition were considered as the optimal manufacturing condition by RSM coupled with desirability function. The optimal manufacturing condition was proven to give lower weight loss and surface wear compared with those produced with non-optimal conditions.

Acknowledgments

The authors would like to thank to a fishing net manufacturing company located in Khon Kaen, Thailand for its support in the wear experiments on a fishing net-weaving machine. The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant No. RSA 5980025 for their funding of this research.

References

- 1 Sahin Y, *Mater Des*, 27 (2006) 455-460.
- 2 Babu J S S, Kang C G & Kim H H, *Mater Des*, 32 (2011) 3920-3925.
- 3 El-Tayeb N S M, Yap T C, Venkatesh V C & Brevern P V, *Mater Des*, 30 (2009) 4023-4034.
- 4 Filippov M A, Belozeroval T A, Blinov V M, Kostina M A, Val'kov E V, *Metal Sci. Heat Treat*, 48 (2006) 170-174.
- 5 Okonkwo P C, Kelly G, Rolfe B F & Pereira M P, *Wear*, 282-283 (2012) 22-30.
- 6 Albers A, Savio D, Lorentz B, *Tribology System*, Gottingen (2010).
- 7 Kubiak K J, Liskiewicz T W & Mathia T G, *Tribol Int*, 44 (2011) 1427-1432.
- 8 Lin N, Xie F, Yang H, Tien W & Wang H, *Appl Surf Sci*, 258 (2012) 4960-4970.
- 9 Lee J W, *Appl Surf Sci*, 244 (2005) 248-251.
- 10 Bolelli G, Lusvarghi L & Barletta M, *Wear*, 267 (2009) 944-953.
- 11 Bayramoglu M, Onat B & Geren N, *J Mater Process Technol*, 203 (2008) 277-286.
- 12 Myers R H & Montgomery D C, *Response surface methodology process and product optimization using designed experiments*, 2nd Ed., (Wiley, New York), 2002.
- 13 Deringer G & Suich R, *J Qual Technol*, 12 (1980) 214-219.
- 14 Montgomery D C, *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed, (Wiley, New York), (2001).

Factors Influencing Hardness of a Coating Material for Coating a Machine Component

Charnnarong Saikaew

Department of Industrial Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002 Thailand

charn_sa@kku.ac.th

Keywords: TiN, fishing net-weaving machine, contour plot, design of experiments

Abstract. This work investigated the influences of DC current, pressure and N_2 to Ar gas flow rate on hardness of a TiN hard coating material for coating a fishing net-weaving machine component of a fishing net-weaving machine, namely upper hook. The target of this study was to maximize the hardness of TiN coated upper hook in order to maximize the corresponding wear resistance. Three process factors including DC current, operating pressure and N_2 to Ar flow rate ratio were simultaneously investigated using the factorial design with replicates at the center point of the three factors method. Analysis of variance was used to investigate the effect of the three factors on the hardness of the TiN coated upper hook and the contour plots based on empirical model were plotted to obtain an appropriate operating condition of the statistically significant process factors with maximizing hardness value leading to the wear resistance of the upper hook. The results showed that the operating pressure and the N_2 to Ar flow rate ratio and interaction among the three process factors significantly affected the average hardness at the level of significance of 0.05. Finally, an appropriate operating condition of the significant process factors was obtained at the higher levels of the operating pressure and the N_2 to Ar flow rate ratio.

Introduction

A fishing-net weaving machine is used to produce a quality fishing net. A fishing-net weaving machine uses two types of hook called upper and lower hooks to achieve net weaving operation. The hooks have been frequently replaced because of rapid dry sliding wear occurred at non-lubricated contact between the hooks and high-tension nets during weaving operation. The costs of the hooks contribute a high fishing net production cost. Hence surface quality of the hooks needs to be improved by coating.

Titanium nitride (TiN) is one of the most widely used hard coating ceramic materials in various industries such as machining, transportation and other tribological applications [1]. This coating material has high Vickers hardness of 18-21 GPa, high modulus of elasticity of 250-450 GPa, good wear and corrosion resistance. TiN has a cubic structure of NaCl type [2]. It has been employed as wear resistant coating for cutting tools and dies. It also has been applied to machine components in automotive industry and other industries [3-5]. The ordinary techniques for TiN coating are physical vapor depositions (PVD) consisting of sputtering, filtered cathodic arc and electron beam evaporation and chemical vapor deposition (CVD) [6]. Sputtering is the most widely used technique because of well-controlled process and high quality thin film coating. TiN is typically produced by reactive sputtering, in which sputtered Ti atoms are reacted with nitrogen ions to form TiN molecules [7]. Oblique angle deposition (OAD) or glancing angle deposition (GLAD) technique is a modified coating technique, in which substrate is tilted at an angle greater than 70° with respect to the normal of coating direction and rotated at an appropriate speed [8].

The influences of the coating process factors such as pressure, temperature, gas flow rate ratios on coating behaviors, growth of TiN, the microstructural, mechanical and tribological properties have been reported in the previous research works [9,10]. Nevertheless, it is a good opportunity to formulate a relationship between the coating process factors and hardness of TiN coated on the fishing-net weaving machine component. Fig. 1 illustrates a fishing net-weaving machine with inset of the machine component namely, the upper hook.

This work aimed to investigate the effects of DC current, operating pressure and N_2 to Ar flow rate ratio on average hardness in coating TiN on a fishing-net weaving machine component by OAD technique using full factorial design couple with carrying out the experiments at the center point of the three process factors and to obtain an appropriate operating condition of the statistically significant factors with high hardness leading to wear resistance improvement of the machine component.

Materials and experimental procedures

The workpiece material, cast stainless steel, was made by the lost wax casting process and was machined by turning and milling operations. Chemical composition of the cast stainless steel included 62.28% Fe, 21.99% Cr, 6.91% Ni, 3.12% Cu, 2.2% Si, 1.94% Mn and 1.56% Al. A vibratory finishing machine with mixed ball burnishing media in different sizes ranging from 5 to 8 mm was used for surface finishing. The oblique angle coating system consisted of a high vacuum chamber equipped with a 3" target magnetron gun, 400 W DC power supply 600 W radio frequency generator and a turbomolecular pump. The titanium nitride was coated on the upper hooks by reactive sputtering of pure titanium target under a mixture of argon (Ar) and nitrogen (N₂) gases. The rotation speed and oblique angle of the oblique angle coating system were fixed at 45 rpm and 70°, respectively.



Fig. 1 A fishing net-weaving machine with inset of the upper hooks

In this study, a seven-step approach involved planning and carrying out the experiments was described as follows:

1. *Setting the objective:* The main objective of this research study was to investigate the influence of coating processes including DC current, operating pressure and N₂ to Ar flow rate ratio on average surface hardness and to determine an appropriate operating condition of the significant process factors.
2. *Identifying the important process factors:* In this research work, there were three process factors consisting of DC current range of 0.35-0.45 A, operating pressure range of 50-100 Pa and N₂ to Ar flow rate ratio range of 0.5-1.5.
3. *Developing of the design matrix:* The 2³ full factorial design plus center point consisting of 8 factorial runs and 4 replicate runs at the center point.
4. *Performing hardness testing:* The hardness of the TiN coated upper hook was measured by a micro hardness testing machine (Galileo, Microscan OD) based on the full factorial design with center point.
5. *Recording the response:* The hardness of the coated upper hook was measured at three different positions on each sample for each experimental run.
6. *Analyzing the results:* Analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the data set of hardness by Minitab[®] software package and Design Expert[®] [11, 12] for investigating the effect of the three process factors on average hardness.
7. *Determining an appropriate operating condition:* The contour plots were used to obtain an appropriate operating condition of the statistically significant process factors with maximizing hardness value in order to improve the wear resistance of the machine component.

Results and discussion

Model adequacy checking is used to perform analysis of residuals for the primary diagnostic tool of ANOVA [13]. The residuals for the 2^3 factor factorial model plus center point are defined from the difference between the observed response (y_{ijk}) and the fitted response when DC current is at the i^{th} level, operating pressure is at the j^{th} level and N_2 to Ar flow rate ratio k^{th} level. The probability plot shows the data points, fitted line of the data points and associated confidence intervals (C.I.) based on parameters estimated from the data sets [11,13]. Fig. 2 depicts normality assumption of the hardness data set and model adequacy checking of the residuals. Fig. 2(a) illustrates the probability plot of the hardness data set. The probability plot indicates that the plotted points of the complete data set of hardness roughly form a straight line and fall within the 95% confidence interval. This confirmed that normal probability distribution fitted the data set of the hardness values well. Fig. 2(b) shows that values of residuals lie well along the linear line, approving good model adequacy, while Fig. 2(c) exhibits the validity of the independence assumption of model. The plot of these residuals versus time sequence of data collection is useful in detecting a correlation among the residuals, confirming no reason to suspect any violation of the independence. Fig. 2(d) depicts high randomness against the fitted values, suggesting good constant variance. These tests confirmed that the 2^3 factor factorial model plus center point design model is effective for investigating the influence of DC current, operating pressure and N_2 to Ar flow rate ratio on hardness using ANOVA.

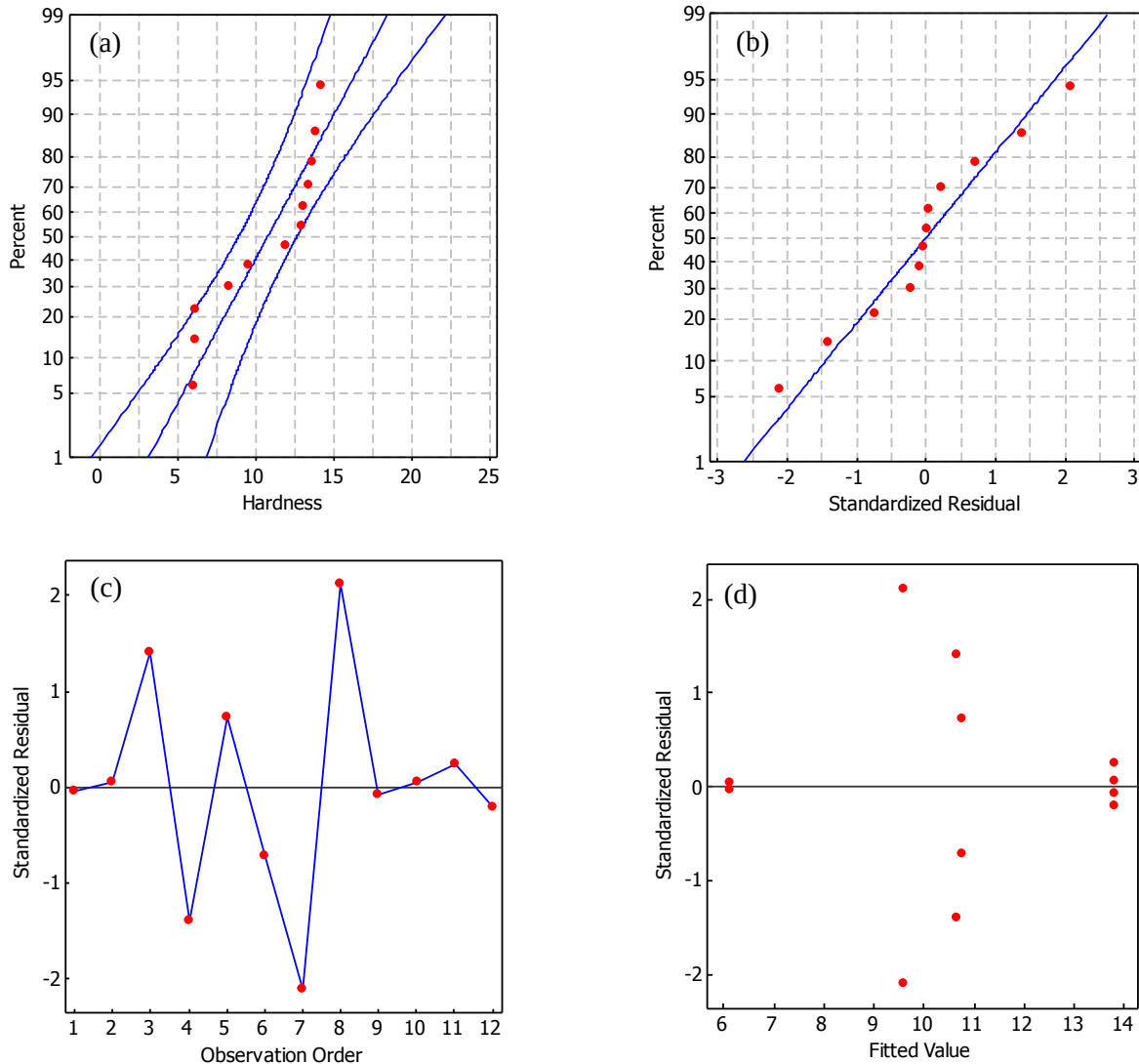


Fig. 2 (a) Probability plot of the hardness data set (b) normal probability plot of the residuals for the data of hardness (c) plot of residuals versus run order and (d) plot of residuals versus fitted value for the data of hardness

The ANOVA for hardness of the TiN coated machine component is summarized in Table 1. The p -values less than 0.05 indicated model terms were statistically significant. According to the p -value of the model, operating pressure and N_2 to Ar flow rate ratio and interaction among the three process factors significantly affected the average hardness at the level of significance of 0.05. The curvature F -value of 491.02 implied there was statistically significant curvature in the design space (as measured by difference between the average hardness value carried out at the center points and that at the factorial points). There was only 0.01% chance that a curvature F -value was very large due to noise from the coating process and the hardness measurement. The lack of fit F value of 0.044 implied that the lack of fit was not statistically significant relative to the pure error. There was a very high chance (95.12%) that a lack of fit F -value was extremely small. Non-statistically significant lack of fit was good for the model fitting to the hardness data set. Furthermore, the model also indicated high coefficient of determination (R^2) of 0.9933 which defines as the ratio of the explained variation to the total variation and is a measure of the degree of fit. It indicates the variation of data and possesses a value within the range from 0 to 1, where higher is better. The adjusted R^2 excludes statistically insignificant factors. The adjusted R^2 of 0.9831 was in reasonable agreement in which the difference between the R^2 and the adjusted R^2 was extremely small. It was noticeable that the model was adequate in predicting the behavior of the hardness of the TiN coated upper hook.

Table 1 ANOVA for hardness

Source	Sum of squares	df	Mean square	F -value	p -value
Model	64.80	6	10.80	98.12	0.0003
Pressure (B)	5.61	1	5.61	50.96	0.0020
N_2 to Ar (C)	6.42	1	6.42	58.33	0.0016
AB	2.57	1	2.57	23.35	0.0850
AC	10.03	1	10.03	91.11	0.0007
BC	15.97	1	15.97	145.06	0.0003
ABC	24.21	1	24.21	219.89	0.0001
Curvature	54.05	1	54.05	491.02	< 0.0001
Error	0.44	4	0.11		
Lack of fit	0.00065	1	0.00065	0.0044	0.9512
Pure error	0.44	3	0.15		
Total	119.30	11			
$R^2 = 0.9933$	$Adj.R^2 = 0.9831$				

Hence the experimental results were fitted to a linear and interaction model. The following expression was obtained in terms of coded factors:

$$H = 9.29 + 0.84B + 0.9C + 0.57AB + 1.12AC - 1.41BC + 1.74ABC \quad (1)$$

where H denoted hardness of the TiN coated upper hook, A represented DC current, B was operating pressure and C denoted N_2 to Ar flow rate ratio.

The contour plot is an effective tool to examine the behavior of a response on the graphical plot in terms of two factors illustrated as X-axis and Y-axis. The contour plots were generated by the model expressed in Eq. (1) and used to investigate whether the upper hooks could improve the surface hardness and lead to wear resistance during fishing-net weaving operation. Only two process factors were chosen for any given contour plot. Fig. 3 exhibits the contour plots of the hardness in terms of DC current and pressure, DC current and N_2 to Ar, and pressure and N_2 to Ar.

Rather than choosing these arbitrarily, make use of a perturbation plot illustrated in Fig. 3(d). The perturbation plot shows the effects of changing each factor while holding other factors constant. A steep slope or curvature in the resulting trace illustrates sensitivity of the response to that factor [13]. According to the perturbation plot, Factors B (pressure) and C (N_2 to Ar flow rate ratio) showed the most dramatic impact on the hardness whereas factor A (DC current) illustrated linear and paralleled to the X-axis. This plot indicated relatively influential factors B (pressure) and C (N_2 to Ar flow rate ratio) which made a good choice for the axes on the more relevant contour plot.

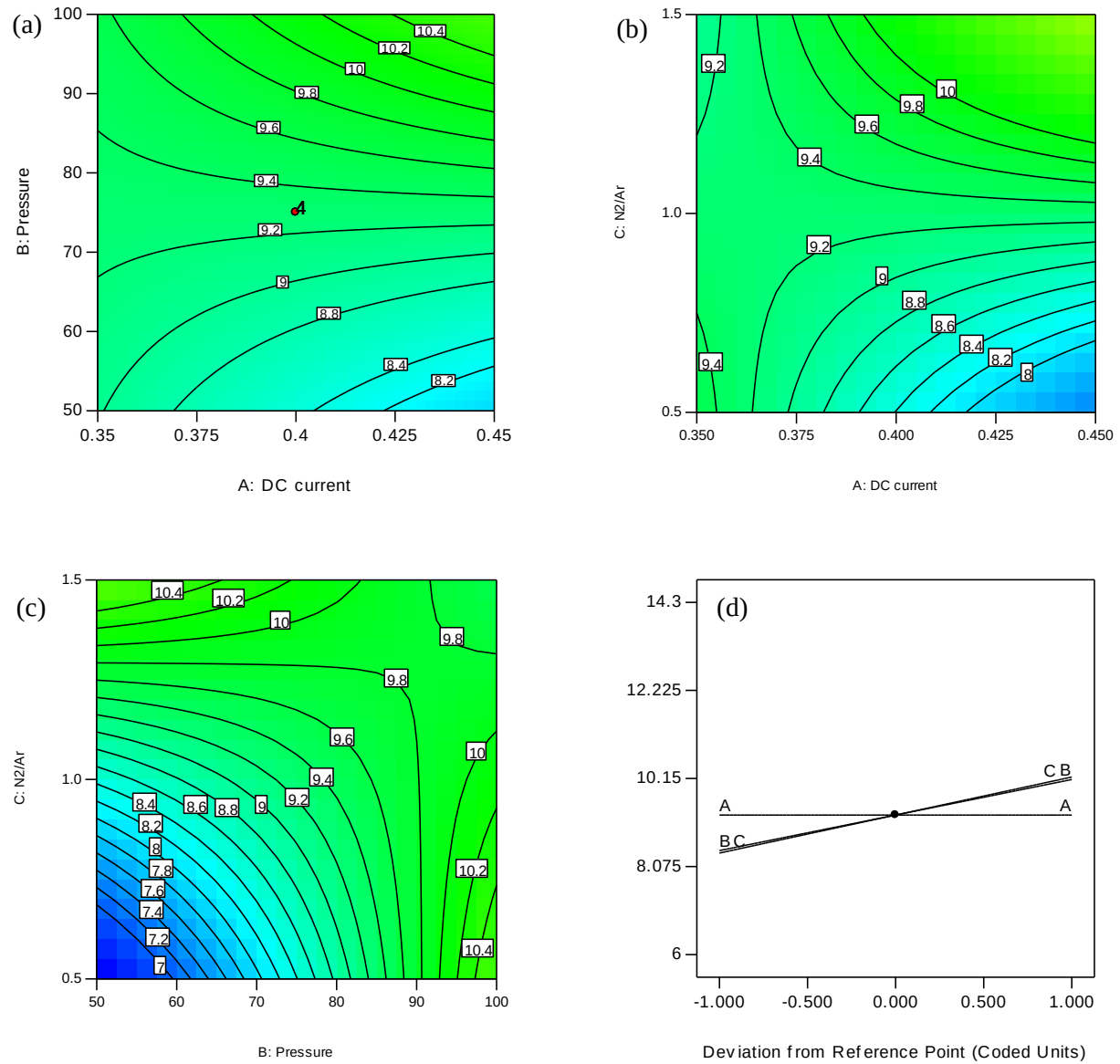


Fig. 3 Contour plots of (a) DC current and pressure (b) DC current and N₂ to Ar and (c) pressure and N₂ to Ar and (d) perturbation plot of the hardness

Fig. 4 illustrates the contour plots of the hardness in terms of pressure and N₂ to Ar by keeping DC current at 0.35 A and 0.45 A, respectively. By keeping DC current at 0.35 A, Fig. 4(a) shows that hardness was higher in the regions of either low pressure and high N₂ to Ar or high pressure and low N₂ to Ar. However, by keeping DC current at 0.45 A, Fig. 4(b) illustrates that the amount of hardness increased with increasing levels of pressure and N₂ to Ar. This indicated that hardness can be increased if the operating condition has been performed at higher levels of pressure and N₂ to Ar.

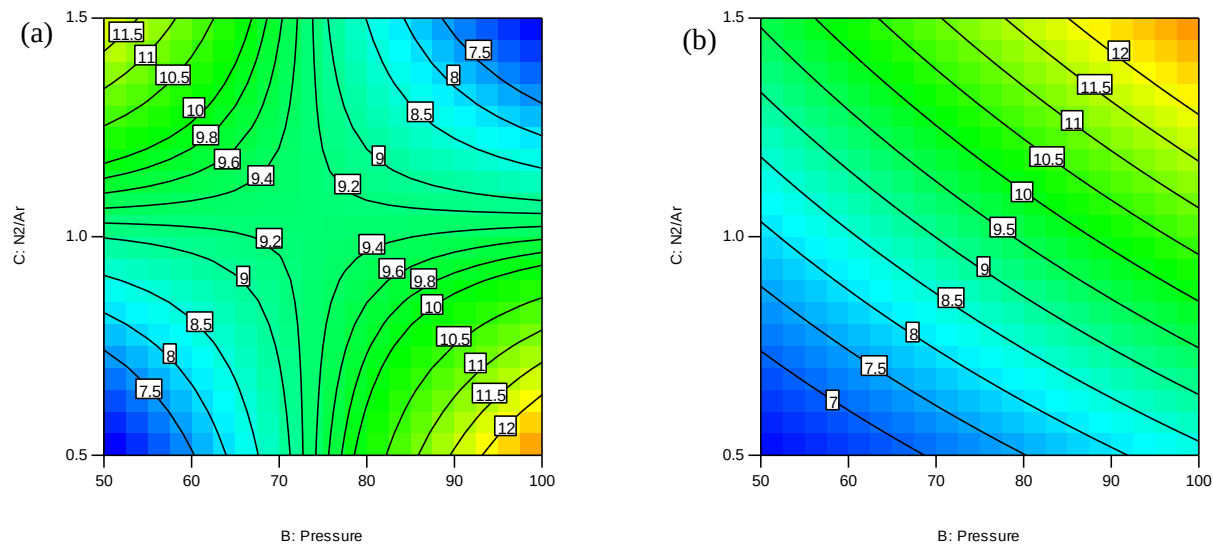


Fig. 4 Contour plots of pressure and N₂ to Ar by keeping DC current at (a) 0.35 A and (b) 0.45 A

Conclusion

This research work investigated the influences of direct current, operating pressure and N₂ to Ar flow rate ratio on average surface hardness and to determine an appropriate operating condition of the significant process factors for hard coating of TiN on a fishing-net weaving machine component for fishing-net industry. The 2³ factor factorial plus center point designed experiments were employed to carry out the hardness experiments of the TiN coatings. Analysis of variance and contour plots based on empirical model were successfully used to evaluate the effects of the three factors on average hardness and to obtain an optimal operating condition of the statistically significant factors. The results showed that the hardness increased if the operating condition has been performed at higher levels of pressure and N₂ to Ar. This operating condition should be recommended to the fishing-net manufacturers for preparing the process factor that produced a higher hardness leading to wear resistance of the machine component. This research work provided a contribution to wear resistance of the machine component for not only fishing-net industry but also for machining industries and other industries.

Acknowledgment

The author gratefully acknowledges the Thailand Research Fund (TRF) under the Grant No. RSA 5980025 and Khon Kaen University for the financial supports of this research.

References

- [1] A. Bahri, N. Guerhazi, K. Elleuch, M. Urgen: Wear 342-343 (2015) 77-84.
- [2] D.S. Stone, K.B. Yoder, W.D. Sproul: J. Vac. Sci. Technol. A 9 (1991) 4, 2543-2547.
- [3] J.H. Yang, M.F. Cheng, X.D. Luo, T.H. Zhang: Mater. Sci. Eng. A. 445-446 (2007) 558-562.
- [4] A. Azushima, Y. Tanno, H. Iwata, K. Aoki: Wear (2008) 1017-1022.
- [5] P. Cosemans, X. Zhu, J.P. Celis, M.V. Stappen: Surf.Coat.Technol.174-175 (2003) 416-420.
- [6] G.S.Kim, S.Y. Lee, J.H. Hahn, B.Y. Lee, J.G. Han, J.H. Lee, S.Y., Lee: Surf. Coat. Technol. 171 (2203) 83-90.
- [7] V.-H. Pham, S.-W. Yook, E.-J. Lee, Y. Li, G. Jeon, J.-J. Lee, H.-E. Kim, Y.-H Koh: J. Mater. Sci. 22 (2011) 2231-2237.
- [8] T.G. Knorr, R.W. Hoffman: Phys. Rev. 113 (1959) 1039-1046.

- [9] K.S. Mogensen: Surf.Coat.Technol. 99(1–2) (1998)140–146.
- [10] P. Hardt, M. Eckel, M. Schmidt, H. Wulff: Surf. Coat. Technol. 238 (1999) 120–121.
- [11] Minitab Inc, Ver. 16, 2010.
- [12] Stat-Ease, Inc., Ver. 7.0.0, 2005.
- [13] D.C. Montgomery *Design and Analysis of Experiments* 6th ed John Wiley & Sons New York 2001.