

TTA E-Magazine

TRIBOLOGY RESOURCES FOR INDUSTRIAL PROFESSIONALS

Friction FEA

การวิเคราะห์ทาง FEA ของแรงเสียดทาน

Tool Steels Tribology

ไทรโบโลยีของแม่พิมพ์

Tribocorrosion

การกัดกร่อนในไทรโบโลยี



CONTENT

TTA President's Message

Page 3

สาส์นจากนายกสมาคมการลื่นและการหล่อลื่นไทย

Finite Element Analysis of Frictional Contacts

Page 6

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงเสียดทานสัมผัส

Duplex Surface Treatment of Tool Steels for Semi-Dry Stamping

Page 18

การปรับพื้นผิวแบบ Duplex ของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับ Semi-Dry Stamping

Fujilloy Fine Ceramics for Wear Resistance Tools

Page 37

วัสดุเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy สำหรับการต้านทานการการลื่นของแม่พิมพ์

Tribocorrosion

Page 50

การกัดกร่อนไปโรโบลยี



TTA President's Message

สาส์นจากนายกสมาคมการสักรหรือและการหล่อสัไทย



Assoc.Prof. Siriluck Vinitchanyong (President of Thai Tribology Association)

รศ. ศิริลักขณ์ นิวิฐรรยงค์ (นายกสมาคมการสักรหรือและการหล่อสัไทย)

After the establishment and introduction of Thai Tribology Association (TTA), we have been having great feedbacks and responses from our supporters and networks. Of course, it is not possible for TTA to successfully grow without our generous sponsors who understand and support TTA in all the possible ways. I really wish that the momentum and partnerships will continue toward the sustainable growth of the Thai manufacturing industry.

This second issue of TTA E-Magazine has brought some interesting Tribology articles such as Finite Element Analysis of Frictional Contacts, Duplex Surface Treatment of Tool Steels for Semi-Dry Stamping, Fujilloy Fine Ceramics for Wear Resistance Tools, and Tribocorrosion. I wish some information from these articles will be helpful and beneficial to the manufacturing industry, particularly on tool and die materials and coatings.

Finally, I would like to wish you a merry christmas and happy new year.

หลังจากการก่อตั้งและการแนะนำสมาคมการสักรหรือและการหล่อสัไทยให้กับอุตสาหกรรมในประเทศไทยและเครือข่ายของสมาคมทีมงานของสมาคมได้รับการตอบรับและคำแนะนำเป็นอย่างดี เป็นที่แน่นอนว่าสมาคมจะไม่สามารถเติบโตได้อย่างประสบความสำเร็จถ้าขาดการสนับสนุนจากสปอนเซอร์ของสมาคมที่มีความกรุณาช่วยเหลือสมาคมในทุกๆด้าน ดิฉันหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โมเมนตัมและการทำงานร่วมกันระหว่างสมาคมกับผู้สนับสนุนจะดำเนินต่อไปเพื่อการพัฒนาการเติบโตของอุตสาหกรรมไทยอย่างยั่งยืน

ใน TTA E-Magazine ฉบับนี้จะเป็นการรวบรวมเรื่องราวที่น่าสนใจเกี่ยวกับไทรโบโลยี เช่น Finite Element Analysis of Frictional Contacts, Duplex Surface Treatment of Tool Steels for Semi-Dry Stamping, Fujilloy Fine Ceramics for Wear Resistance Tools และ Tribocorrosion ดิฉันหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลจากบทความที่ได้นำมาเสนอในฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการเลือกวัสดุแม่พิมพ์และสารเคลือบแม่พิมพ์

สุดท้ายนี้ดิฉันขออวยพรให้ทุกท่านสุขสันต์ในวันคริสต์มาสและเนื่องในโอกาสวันขึ้นปีใหม่





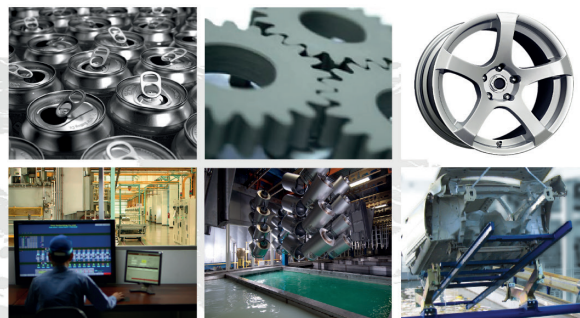
Thai Parkerizing Co., Ltd.

THAI PARKERIZING CO., LTD.

Thai Parkerizing is a leader in Surface Treatment and Heat Treatment industry. We focus in best Quality and Technology development to utilize our products and service to fulfill our customer satisfaction.

THAI PARKERIZING

We provide variety of products and service to apply on each metal surface such as iron and steel, gavanized steel, aluminum i.e. Our products are applied to many customer processes since metal upstream toward OEM (Original Equipment Manufacturer) finish goods.



CHEMICAL PRODUCTS

Conversion coating chemicals

- » Zinc phosphate coating
- » Zinc calcium phosphate coating
- » Manganese phosphate coating
- » Metal oxide coating
- » Trivalent chrome coating
- » Non-chrome coating
- » Stearate soap coating
- » Dry-in-place lubricant coating (PULS)



Rust preventive products

Depend on your requirement for rust protection

- » Solvent base type
- » Wax base type
- » Water base type
- » PIPAK (Volatile Corrosion Inhibitor Film)



Rolling oil

Applied as coolant for cold rolled steel process

- » Lubricity
- » High rolling speed



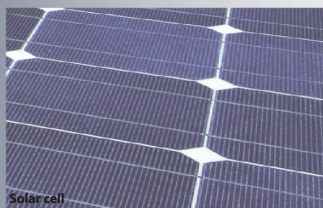
Other treatment products

- » Degreasing and cleaning chemicals
- » Hydrophilic coating on evaporator
- » Coil coating on galvanized steel (Chromate free)
- » Short-term rust preventive chemicals
- » Paint remover





THAI PARKERIZING CO., LTD.



TREATMENT SERVICE

Surface treatment

Phosphate treatment

- » Zinc phosphate coating
- » Manganese phosphate coating
- » Aluminum treatment
- » Trivalent chrome coating
- » Zinc phosphate and soap lubricant



Pallube treatment (Solid lubrication treatment)

- » Molybdenum disulfide (MoS_2)
- » Teflon (PTFE)



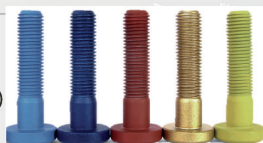
Kanigen® (Nikel electroless plating)

- » Ni-P alloy coating
- » Ni-P-B alloy coating
- » Ni coating with PTFE
- » Ni-Co-W-P alloy coating



DELTA-MKS®

- » Zinc aluminium flakes
- » Small coating thickness (5-20 μm)
- » Cathodic corrosion protection
- » No hydrogen embrittlement



Heat treatment

Gas heat treatment

- » Gas carburizing
- » Gas carbonitriding
- » Gas soft nitriding
- » Quenching and tempering



ISONITE® (Salt Bath Soft Nitriding)

- » Quench-Polish-Quench
- » Surface hardness/
Wear resistance
- » Corrosion resistance



Shot peening

- » Fatigue strength
- » Modify metal surface



PVD (Physical Vapor Deposition)

- » TiN » TiC
- » CrN » TiAlN
- » DLC (Diamond Like Carbon)



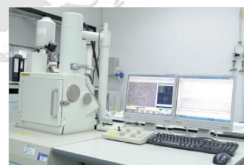
SERVICE LABORATORY

Surface and metallurgical analysis

- » Microstructure and chemical composition
- » Mapping and depth profile analysis
- » Wear and friction test
- » Corrosion test and paint evaluation

Environment analysis

- » Hazardous substance analysis (Pb, Cd and Cr^{6+})
- » Waste water analysis (pH, BOD, COD, TDS, SS, Heavy metal, Oil & Grease and Cyanide)



Chemical analysis

- » Organic and inorganic analysis
- » Qualitative and quantitative analysis

Zinc phosphate standard panel

- » Verify corrosion and paint evaluation



Finite Element Analysis of Frictional Contacts

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงเสียดทานสัมผัส

Written by Assoc. Prof. Surasith Piyasin (Khon Kaen University)
Translated by Mr. Pichitpong Pongsaranun (Khon Kaen University)

เขียนโดย รศ.ดร. สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์ (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
แปลโดย นายพิชิตพงศ์ พงษ์สรานันท์ (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)

INTRODUCTION

Various methods have been developed for the solution of contact problems using the finite element method. A comprehensive review of these is given by Pascoe et al (1990). Finite element algorithms for the solution of elastic contact problems usually have two stages of solution. The first involves the calculation of the area over the contact and the determination of the zones of frictional sticking and slipping within this area. In the second stage, these contact conditions are imposed on the finite element model. In some algorithms these two stages may be combined. In general, conditions of contact are a function of the applied loads, and this renders the problems inherently non-linear. The problem is usually 'linearised' either by applying the load step by step incrementally, or by using some form of iterative solution method, or by a combination of the two.

The method used to determine the area of contact, and the zones of stick and slip are generally similar for all algorithms. Sticking contact initially is assumed to take place over the maximum possible contact area. Then, within either an iterative loop or an incremental loading procedure, the normal and tangential force at the contact nodes are evaluated. It is assumed that negative normal force at a node indicates loss of contact, while a tangential force greater than the normal force multiplied by the friction coefficient indicates slippage. The equations governing contact at these nodes are modified to impose these conditions and the next increment or iteration is executed.

บทนำ

การพัฒนาวิธีการสำหรับการแก้ปัญหาพื้นผิวสัมผัส โดยการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากศึกษาของ Pascoe et al (1990) ขั้นตอนทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการแก้ปัญหาคำนวณการยึดเหนี่ยวใช้สองขั้นตอนหลักในการแก้ปัญหา ขั้นตอนแรกการคำนวณของพื้นที่ผิวสัมผัสและการกำหนดแรงเสียดทานเริ่มต้นกับการเลื่อนไถลของพื้นผิว ขั้นตอนที่สองเงื่อนไขการสัมผัสจะถูกกำหนดในการรูปแบบทางไฟไนต์เอลิเมนต์และในบางขั้นตอนอาจจะรวมทั้งสองขั้นตอน โดยทั่วไปเงื่อนไขของการสัมผัสเป็นการควบคุมโหลดและการแสดงผลจะเป็นในลักษณะ Non-Linear และปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นจะเป็นเชิงเส้น แบบใดแบบหนึ่ง โดยการเพิ่มโหลดหรือการทดลองซ้ำหรือการรวมทั้งสองอย่าง

วิธีการกำหนดพื้นที่บริเวณผิวสัมผัสและบริเวณ Stick และ Slip โดยทั่วไปจะมีอยู่หลายวิธีที่คล้ายกัน เริ่มแรกของการ Sticking Contact มีพื้นผิวสัมผัสที่เป็นไปได้มากที่สุด จากนั้นเมื่อมีการเคลื่อนที่หรือการเพิ่มโหลดจะสามารถหาแรงกดและแรงดึงจากบริเวณผิวสัมผัสได้ ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นแรงกดที่โหนดสามารถแสดงให้เห็นการสูญเสียจากการสัมผัส ขณะที่แรงดึงมากกว่าแรงกดจะบ่งชี้การลื่นไถลของพื้นผิวที่มีแรงเสียดทาน สมการการสัมผัสของโหนดจะถูกปรับปรุงโดยการกำหนดเงื่อนไขสำหรับการคำนวณใน Increment หรือ Iteration ต่อไป



There are several methods for imposing the contact conditions upon the finite element solution. These include 'penalty', 'Lagrange multiplier', 'flexibility' and 'the transformation matrix.' Pascoe et al (1990) should be referred to for a full description of these methods. Only the first method, which is that which is used by ANSYS will be discussed here.

PENALTY METHODS

For 'penalty methods', the 'gap element' is the most common method of imposing the contact conditions. The method involves the use of special gap elements joining the meshes of the two bodies together over the area of 'potential' contact. These elements may be in form of lines (2-D) or area (3-D) elements. During periods in the application to gradually increased the load when the meshes are not in contact, these elements are given very low stiffness and hence have negligible effect on the deformation of the finite element meshes. However, when the contact is identified, these contact elements are given a much higher stiffness which acts to prevent mesh overlap and apply the relevant contact interfacial forces. The method is iterative with an 'intermediate' value of stiffness selected, which is necessary to avoid matrix instability which can occur if the stiffness is too high, and also to avoid a too slow procedure of convergence if the stiffness is too low. Contact is identified when the forces within the contact elements are compressive, indicating that nodal overlap has occurred. A consequence of 'tied' nodes together with contact elements is that equal and opposite contact forces are transmitted across the connected nodes. It is therefore important that approximate nodal alignment is achieved between nodes on the potential contact interface to ensure that the correct force distributions are generated between the meshes on other side of the inter-face. In addition, it is possible to apply frictional contact conditions by defining elements tangential to the contact surface, whose stiffnesses are related to the Coulomb friction coefficient.

PROCEDURE OF MAKING CONTACT IN THE ANSYS 'INITIALIZATION PROCEDURE'

'Initialisation' is one of four procedures required to initially set-up the contact nonlinear

มีอีกหลายวิธีการกำหนดเงื่อนไขของการสัมผัส ขึ้นอยู่กับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางคณิตศาสตร์โดย Pascoe et al (1990) ซึ่งถูกนำมาใช้ในโปรแกรม ANSYS

Penalty Methods

สำหรับ Penalty Methods และ ช่องว่างของเอลิเมนต์เป็นวิธีที่พบมากที่สุดของการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส วิธีการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ช่องว่างของเอลิเมนต์ร่วมกับการสร้าง Mesh ของพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีการสัมผัสกัน ซึ่งอาจจะเป็นรูปแบบของเอลิเมนต์แบบ 2 มิติหรือ 3 มิติ ในระหว่างการวิเคราะห์จะเพิ่มแรงกดเมื่อพื้นผิวยังไม่สัมผัส ซึ่งเอลิเมนต์จะมีค่าความแข็งที่ต่ำมาก จึงทำให้มีผลกระทบต่อการรูปร่างของการ Mesh ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามเมื่อการสัมผัสของเอลิเมนต์ที่มีความแข็งที่สูงมากจะทำให้ Mesh มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยากขึ้น จึงมีการประยุกต์ใช้การสัมผัสของ Interfacial Forces วิธีการทำซ้ำกับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่แน่นอนของเมทริกซ์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้หากมีค่าความแข็งที่สูงเกินไปและยังทำให้มีการลู่เข้าของข้อมูลช้าลงถ้าหามีค่าความแข็งของเอลิเมนต์ที่สูงเกินไป การสัมผัสจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสของเอลิเมนต์ที่มีการบีบอัด ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายแรงผ่านโหนดของเอลิเมนต์ที่มีการสัมผัสกัน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญในการวางตำแหน่งของเอลิเมนต์จากการ Mesh เพราะมีการกระจายแรงโดยส่งผ่านระหว่างโหนดต่อโหนด จึงมีผลต่อความถูกต้องของข้อมูล และเงื่อนไขของการเสียดทานโดยการกำหนดแรงดัดของเอลิเมนต์ที่มีความแข็งจะมีความเกี่ยวข้องกับ Coulomb Friction Coefficient

ขั้นตอนติดตั้งเริ่มต้นของการสัมผัสใน ANSYS

ขั้นตอนติดตั้งเริ่มต้น เป็นหนึ่งในสี่ขั้นตอนที่มีความจำเป็นในการแก้ปัญหาการสัมผัสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (ANSYS) ก่อนที่จะอธิบายขั้นตอนนี้มีความคิดเห็นบางส่วนที่อธิบายถึงธรรมชาติในความไม่เป็นเชิงเส้น การสัมผัสที่ไม่เป็นเชิง



arity problem in ANSYS Finite Element Software. Before this procedure is described, some comments are provided here about the nature of the non-linearity.

Contact nonlinearity occurs when some parts of two (or more) components come into or out of contact with each other. This is also called the 'deformation process.' Contact nonlinearity also occurs when two components slide relative to one another. The reason why contact is nonlinear is that because (to repeat the point) one or both of the following are unknown,

- The contacting area(s)
- The transmission force in both normal and tangential direction

To solve and get a reasonable solution from the non-linear contact problem and as already been mentioned, the contact stiffness ('KN') must be established and so as to be acceptable to the program. A higher value of 'KN' will be lead to ill-conditioning but a lower value may lead to convergence difficulties.

In the ANSYS user's manual, it is recommend that the suitable formula for deciding on an initial value for 'KN', is found from

$$'KN' = f * E$$

where

f is a factor normally between 0.1 and 10

E is the Young's modulus of contacting material

In case of two bodies, the smaller value is suggested (0.1) to provide as the 'inserted value' for 'E'.

THE PROCEDURE FOR INITIALISATION

An initialising procedure is a special form of contact nonlinearity. As in any method to solve the ANSYS program, the procedure consists of three main steps:

- Build the model
- Apply load and obtain solution
- Review the results

Building the model

This step is essentially, that of creating the

การสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสองหรือสามชิ้นนั้นมาสัมผัสกันและกัน โดยสามารถเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการเสียรูป การสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุสองชิ้นนั้นเกิดการไถลระหว่างกัน โดยสาเหตุที่การสัมผัสนั้นไม่เป็นเชิงเส้นนั้นคือหนึ่งหรือทั้งสองปัจจัยเหล่านี้นั้นไม่สามารถรู้ค่าที่เป็นจริงได้

- พื้นที่ของการสัมผัส

- การส่งผ่านแรงระหว่างแรงกดแนวตั้งฉากและแรงดึงแนวเส้นสัมผัส

การแก้ปัญหาที่เหมาะสมของการสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้นและถูกกล่าวถึง ค่าความแข็งของการสัมผัส (KN) จะต้องได้รับติดตั้งและการยอมรับของโปรแกรมวิเคราะห์ ซึ่งถ้ามีค่าความแข็งสูงเกินไปหรือต่ำเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์

ในการใช้โปรแกรม ANSYS มีสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่า KN ซึ่งพบจาก

ซึ่ง

f คือ ค่า Factor ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 10

E คือ ค่า Young's Modulus ของวัสดุที่ถูกสัมผัส

ในกรณี มีชิ้นส่วนสองชิ้นที่มีขนาดเล็ก แนะนำใช้ค่า Factor ที่ 0.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่า Young's Modulus

ขั้นตอนในการกำหนดค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นขั้นตอนสำคัญมากในการแก้ปัญหาการสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้น และในโปรแกรม ANSYS มีสามขั้นตอนหลักคือ

- การสร้างแบบจำลอง
- การใส่โหลดและวิธีการแก้ปัญหา
- การตรวจสอบผลการวิเคราะห์

การสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ในการสร้างรูปแบบ



two (or more) models unconnectedly. The reason for creation of unconnected models is because the element stiffness matrix $[K_e]$ from connected bodies would become singular and unsolvable. This is because the finite element analysis requires at least some stiffness connecting all the elements together along with sufficient displacement constraints to prevent rigid-body motion.

If the unconnected models are not created as such and the program is run, the ANSYS program will issue some 'pivot ratio' warning and finally terminate the program.

Applying the load and obtaining the solution

Due to the unconnected models, at least two sub-step loadings would normally be needed. In the first sub-step loading, the free body is moved into the touching position by using specified displacement values. When the bodies get in the touching position the displacement constraints should be removed and the next loading applied. To solve more than one sub-step loading, the multi-step solver (LS-SOLVE) needs to be applied.

Review the results

Results from a contact nonlinearity consists mainly of displacements, stresses, strains and reaction forces. These can be reviewed in POST1 (the general postprocessor) or in POST26 (the time-history postprocessor).

It is advisable to visually verify that all the connect areas are specified. Some parts of the models may be overlapping because they did not have contact specifications. To get the true scale, issue command " /DSCALE,1,1 " then plot the results.

TEST ON THE CONTACT PROBLEM USING ANSYS

In order to 'verify' the procedures used by the author for contact problems using ANSYS, some standard 'tests' on known contact problems were analyzed using ANSYS and compared with both references and also the results from Hertzian contact theory. The tests were made using firstly that of an axisymmetric flat punch on a foundation and, secondly, a cases of Hertzian contact between two cylinders with interface friction.

ของชิ้นงาน เหตุผลที่ต้องมีการสร้างแบบจำลองเพราะว่าเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ที่มีความแข็งที่มีความเป็นเอกพจน์จะแก้ปัญหาในการวิเคราะห์ไม่ได้ เพราะนี่คือกระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องมีการประกอบของการเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับข้อจำกัดของการเคลื่อนที่กับวัสดุที่ไม่เกิดการเสียรูป

ถ้าการสร้างแบบจำลองไม่ความเกี่ยวเนื่องกัน โปรแกรม ANSYS จะมีการมีการเตือนและยกเลิกกระบวนการวิเคราะห์ปัญหา

การใส่โหลดและวิธีการแก้ปัญหา

เนื่องจากรูปแบบที่ไม่เกี่ยวเนื่องกัน จะต้องมีการใส่โหลดอย่างน้อยตามขีดจำกัดของเงื่อนไขในการวิเคราะห์ในสถานการณ์ปกติ ในขั้นตอนแรกในการใส่โหลด จะต้องกำหนดตำแหน่งของการเคลื่อนที่ชิ้นงาน โดยการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน ในข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ที่จะต้องไม่กำหนดโหลดในตอนที่ยังงานมีการเคลื่อนที่ และต้องมีการกำหนดขั้นตอนย่อยของการวิเคราะห์หรือการแก้ปัญหาของการสัมผัส

การตรวจสอบผลการวิเคราะห์

ผลจากการสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้นส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย ระยะการเคลื่อนที่ Stresses Strains และแรงปฏิกิริยา ซึ่งจะมีการตรวจสอบใน POST1 (general postprocessor) หรือ ใน POST26 (time-history postprocessor)

การปัญหาในทดสอบโดยใช้ ANSYS

เพื่อตรวจสอบขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยผู้แต่งต้องการอธิบายการแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งบางการทดสอบจะใช้โปรแกรม ANSYS มาวิเคราะห์การแก้ปัญหาและเปรียบเทียบผลที่ได้จากทฤษฎี Hertzian Contact การทดสอบเริ่มแรกจะถูกสร้างพฤติกรรมแบบ Axisymmetric Flat Punch และของ Hertzian จะอธิบายในลักษณะทรงกระบอกสองชิ้นส่งผ่านแรงโดยการเสียดสีกัน

Test 1: Two-dimensional punch on a foundation

This benchmark test has been done by Olukoko et al (1993). A flat elastic punch of height H_p and half-width W_p is in contact with an elastic foundation of the same material with height H_f and half-width W_f as shown in Fig. 1. A uniform pressure magnitude σ_0 of 100 N/mm is applied on the top surface of the punch. Two dimensional plane strain analysis is performed using the following coherently dimensional data : $W_p = 10$ mm; $H_p = 20$ mm; $W_f = 4.0$ mm and $H_f = 40$ mm; modulus of elasticity, $E = 200$ MN/mm²; Poisson's ratio = 0.3 and coefficient of friction = 0.0 and 0.2.

The model has been created only in half form because of the inherent symmetry. (Fig. 2) The results from ANSYS and from Olukoko et al. (1993) are shown in Table 1.

การทดสอบ 1: Two-dimensional punch on a foundation

การทดสอบมาตรฐานโดย Olukoko et al (1993) ในลักษณะของ Flat Elastic Punch ของความสูง (H_p) และครึ่งความกว้าง (W_p) แสดงในภาพที่ 1 มีการกำหนด Pressure σ_0 ขนาด 100 N/mm บนผิวบนของ Punch โดยวิเคราะห์แบบ 2D Plane Strain: $W_p = 10$ mm; $H_p = 20$ mm; $W_f = 4.0$ mm และ $H_f = 40$ mm; Modulus of Elasticity, $E = 200$ MN/mm²; Poisson's ratio = 0.3 และ Coefficient of Friction = 0.0 และ 0.2

ในการจำลองจะสร้างแบบจำลองในลักษณะครึ่งแบบ เนื่องจากเป็นรูปร่างมีความสมมาตรกัน (ภาพที่ 2) ข้อมูลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS ของ Olukoko et al. (1993) แสดงในตารางที่ 1

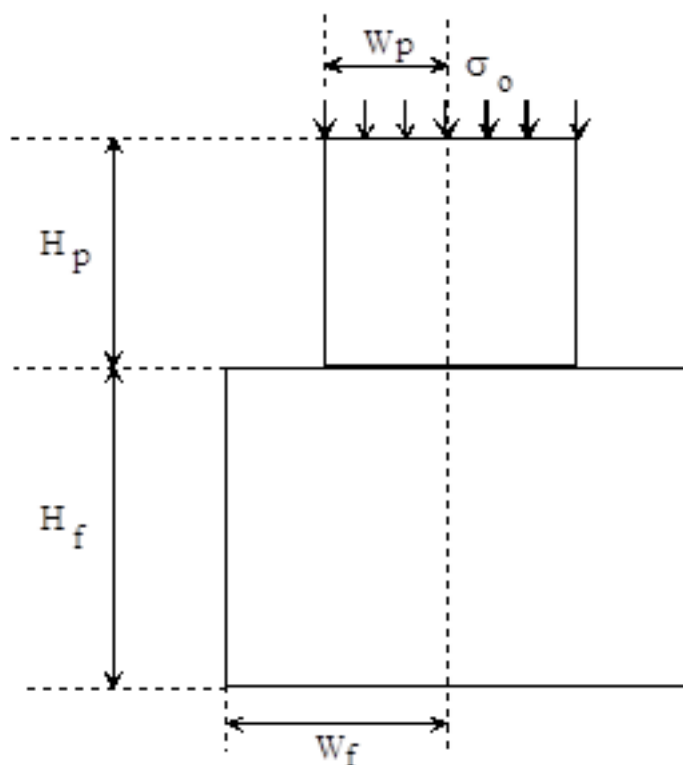


Fig. 1. An elastic punch on a foundation.

The x-coordinate is measured from the center of the contact area. The normal contact distribution is almost uniform in the central part of the contact zone with the ratio less than 1.0, while it increases thereafter and rapidly approaches an infinite magnitude towards the end of contact surface as illustrated in Fig. 3. However, the values at this end may considerably differ because of some uncertainty about the precise position of the contact point relating to some crudity of the mesh spacing. It can

พิกัดในแนวแกน X วัดจากจุดศูนย์กลางของพื้นผิวการสัมผัส จะมีสัดส่วนการกระจายของการสัมผัสอย่างกว้าง 1 ในขณะที่นั้นจะมีการเพิ่มความเร็วในปริมาณที่ไม่มีที่สิ้นสุดและในช่วงสุดท้ายแสดงในภาพที่ 3 อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากช่วงปลายของการสัมผัสนั้นอาจจะแตกต่างกันไป เนื่องจากมีความไม่แน่นอนเกี่ยวกับความแม่นยำของตำแหน่งของจุดสัมผัสที่สัมพันธ์กับความหยาบของ

be observed that there is a very good agreement between the two methods except at the similar point of the edge.

ความหยาบของพื้นที่ Mesh ซึ่งมันสามารถดูได้ว่าทั้งสองวิธีนั้นมีผลที่ใกล้เคียงกันยกเว้นที่จุดขอบ

X/w_p	Normal stress without friction		Normal stress with friction, $\mu = 0.2$	
	Oulkoko et al.	ANSYS	Oulkoko et al.	ANSYS
0.0	0.8547	0.8445	0.8223	0.8299
0.1	0.8572	0.8566	0.8248	0.8330
0.2	0.8624	0.8633	0.8297	0.8397
0.3	0.8719	0.8733	0.8386	0.8489
0.4	0.8868	0.8887	0.8592	0.8637
0.5	0.9082	0.9102	0.8745	0.8855
0.6	0.9396	0.9416	0.9073	0.9169
0.7	0.9869	0.9903	0.9587	0.9680
0.8	1.0640	1.0711	1.0480	1.0578
0.9	1.2323	1.2556	1.2465	1.2274
1.0	3.5600	1.6096	5.4930	1.4348

Table 1. Solution for elastic punch on a foundation, $\mu = 0.0$ and $\mu = 0.2$.

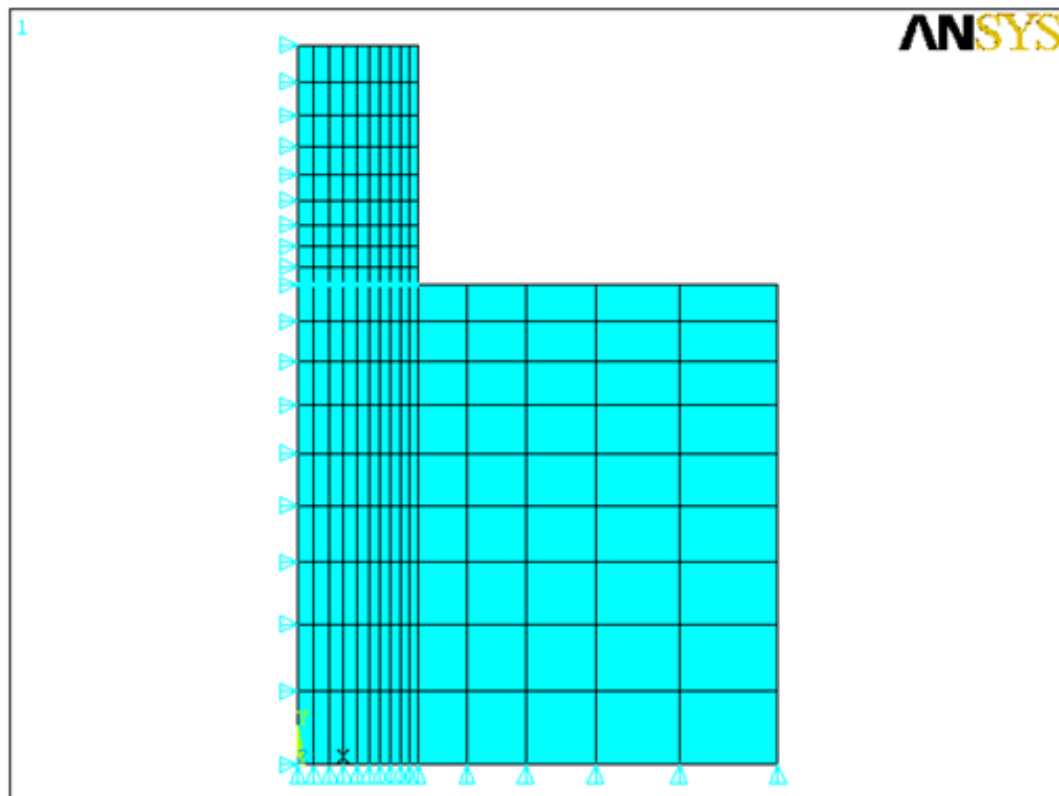


Fig. 2. Finite element model for an elastic punch on a foundation.

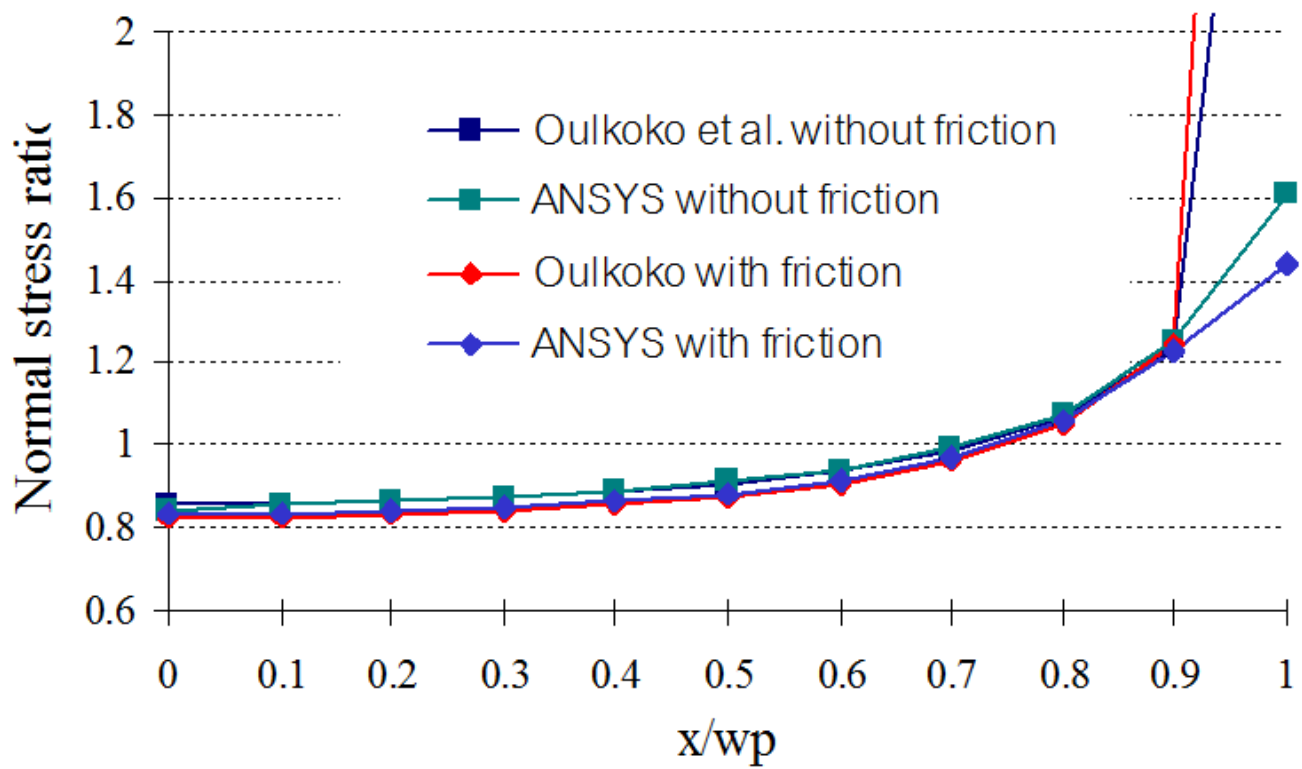


Fig. 3. Normal stress ratio distribution for an elastic punch on a foundation.

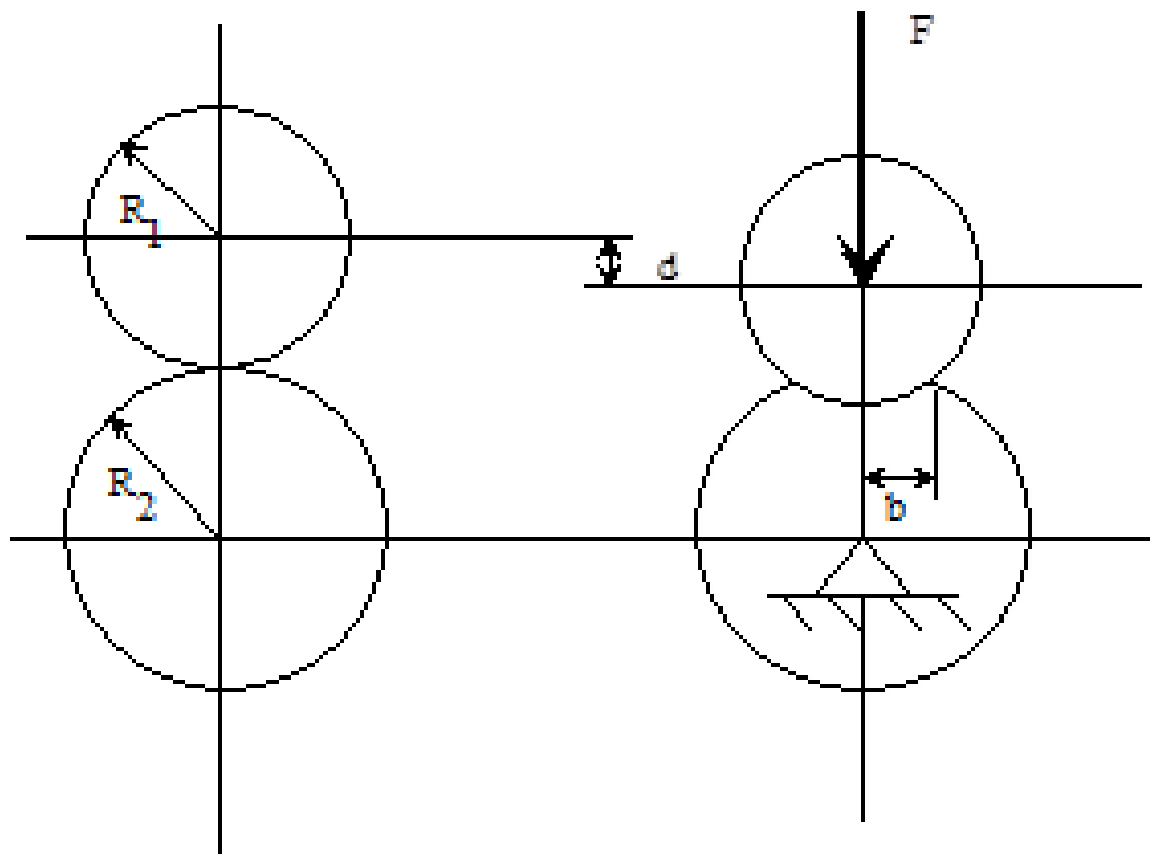


Fig. 4. Contact between two cylinders.

Test 2: Hertz contact between two cylinders

Two cylinder of radii R_1 and R_2 , in friction contact with their axes parallel to each other are pressed together with a force per unit length, F as shown in Fig. 4. The material properties of cylinder 1 are $E_1 = 30000 \text{ N/mm}^2$ and $\nu_1 = 0.25$; cylinder 2 are $E_2 = 29120 \text{ N/mm}^2$ and $\nu_2 = 0.3$. The geometric properties are: $R_1 = 10 \text{ mm}$, $R_2 = 13 \text{ mm}$, and loading $F = 3200 \text{ N/mm}$ over the thickness in the third dimension. The test will compare the results from both finite element analysis using ANSYS and Hertzian contact theory. The results required were the comparison of the half width of contact radius (b), the approach of centre (d) and the maximum contact pressure from both of the two approaches. As shown in Fig. 5, a symmetric quarter of the model has been analysed.

From Hertzian contact theory by K. L. Johnson (1985),

การทดสอบ 2: Hertz contact ระหว่างทรงกระบอก

2 อัน

ทรงกระบอก 2 อันมีรัศมี R_1 และ R_2 มีแรงเสียดทานตามแนวแกนที่ขนานกันและมีแรงกด แสดงในภาพที่ 4 ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุในทรงกระบอก 1 $R_1 = 10 \text{ mm}$, $E_1 = 30000 \text{ N/mm}^2$ และ $\nu_1 = 0.25$ และในทรงกระบอกที่ 2 $R_2 = 13 \text{ mm}$ $E_2 = 29120 \text{ N/mm}^2$ และ $\nu_2 = 0.3$ โดยมีโหลดกด $F = 3200 \text{ N/mm}$ ต่อความหนาในมิติที่ 3 โดยการทดสอบจะมีการเปรียบเทียบจากผลของการใช้ Finite Element Analysis โดยใช้ ANSYS และทฤษฎี Hertzian contact ผลที่ต้องการคือการเปรียบเทียบครึ่งความกว้างของผิวสัมผัสรัศมี การเข้าใกล้จุดศูนย์กลาง และความดันที่มากที่สุดจากทั้งสองวิธี ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ

Asymmetric Quarter ของแบบจำลอง

จากทฤษฎีของ Hertz โดย K. L. Johnson (1985)

$$b = 2 \left(\frac{FR}{\pi E^*} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$d = \frac{2F}{\pi} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \left(\ln \frac{4R_1}{b} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \left(\ln \frac{4R_2}{b} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$p_0 = \left(\frac{FE^*}{\pi R} \right)^{0.5} \quad (3)$$

where

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$



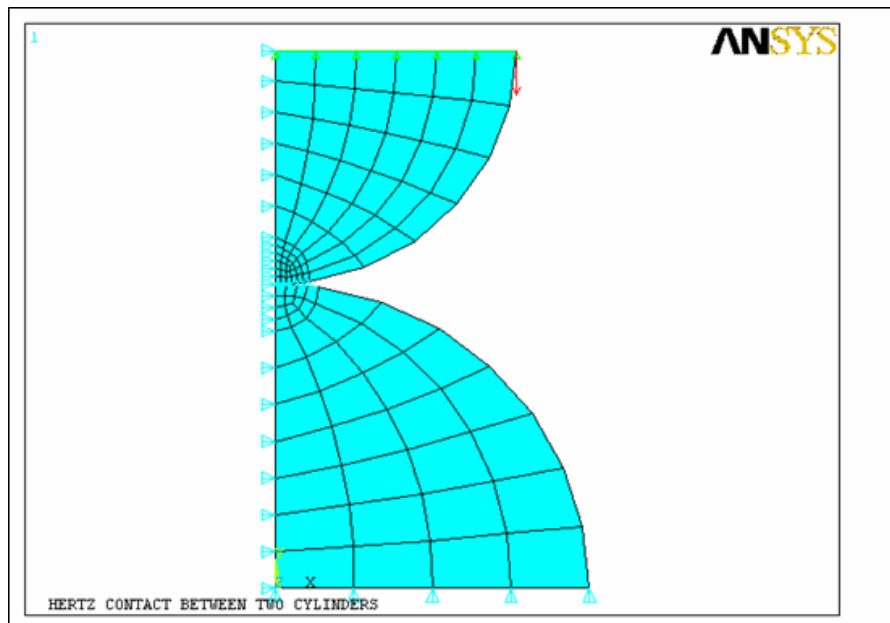


Fig. 5. Finite element model for contact of two cylinder.

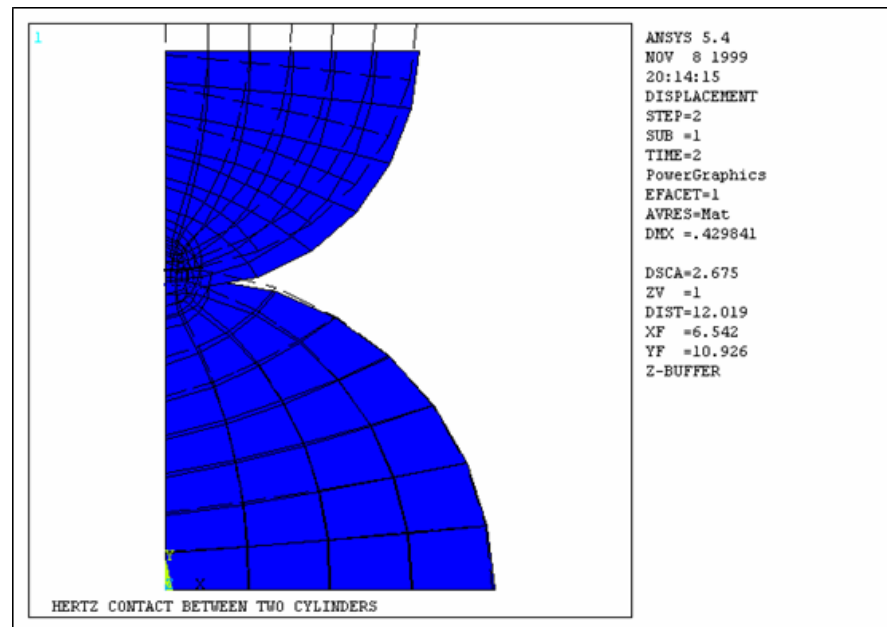


Fig. 6. Displacement plot.

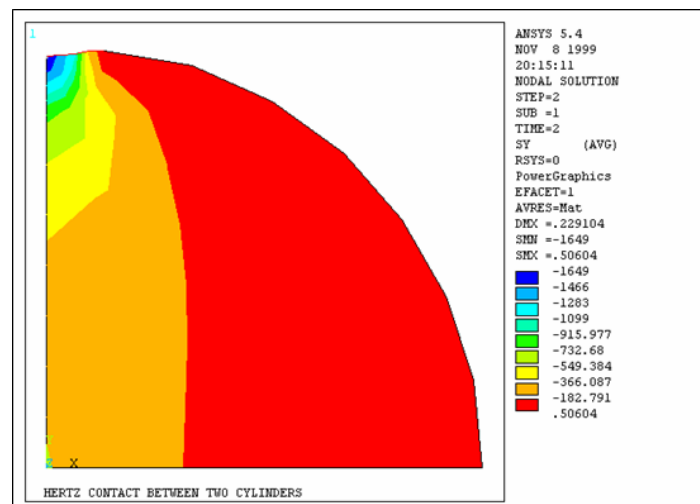


Fig. 7. Normal contact stress distribution.

There is good agreement between the results from the finite element analysis using ANSYS and the theoretical results. Fig. 6 depicts the displacement plot from ANSYS. It can be seen that the maximum displacement which can be observed from 'DMX' quoted in the graphical output of ANSYS was 0.4289 (mm.) and it moved downward along the (-)y-direction. The maximum contact pressure from ANSYS can be seen from the Fig. 7. This illustrates the contact pressure distribution. The maximum value can be observe from 'SMN' as quoted and which is -1649.2 (N/mm²). The ANSYS results show a small percentage discrepancy from the theoretical values as shown in Table 2. Table 2 shows a comparison between the results from the finite element analysis using ANSYS and Hertzian theory.

ผลลัพธ์ระหว่างทั้งวิธีการใช้ Finite Element Analysis โดยใช้ ANSYS และการใช้ทฤษฎีนั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกัน รูปที่ 6 แสดงถึง Displacement Plot จาก ANSYS โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า Maximum Displacement ที่ได้จาก 'DMX' ของการเอาข้อมูลจากกราฟของ ANSYS คือ 0.4289 mm ซึ่งขยับลงทางแนวแกน (-)y ความดันสูงสุดจาก ANSYS นั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของความดัน โดยค่าสูงสุดสามารถหาได้จากค่า 'SMN' คือ -1649.2 (N/mm²) ซึ่งผลจาก ANSYS นั้นแสดงความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากทฤษฎี ตารางที่ 2 นั้นเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก Finite Element Analysis โดยใช้ ANSYS กับ ทฤษฎีของ Hertz

Analysis	Theory	ANSYS	Discrepancy, %
d, mm.	-0.4181	-0.4289	2.6
b, mm.	1.20	1.16	3.3
p _o , N/mm. ²	1698.06	1649.20	2.9

Table 2. Results: comparison of Hertz contact between two cylinders.

SUMMARY OF THE BENCHMARK TESTS

The analysis of the Olukoko (1993) benchmark problem and Hertz contact theory indicated that the procedures of analysis within ANSYS had been correctly implemented. Although there were small discrepancies, these were indeed small and the results demonstrated that the contact problem using ANSYS could be used to calculate the stress and strain distribution with an acceptable accuracy.

บทสรุปของการทดสอบเปรียบเทียบ

การวิเคราะห์โดยใช้ปัญหาเปรียบเทียบของ Olukoko (1993) และทฤษฎีการสัมผัสของ Hertz สามารถทำได้ อย่างถูกต้องโดยการใช้ ANSYS ถึงแม้ว่าจะมีการคลาดเคลื่อนแต่ก็เพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าการวิเคราะห์ปัญหาการสัมผัสโดยใช้ ANSYS นั้นสามารถทำได้ เพื่อวิเคราะห์หาการกระจายตัวของ Stress และ Strain ภายในความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้



REFERENCES

1. Hill, D.A., Nowell, D. and Sackfield, A., Mechanics of Elastic Contacts, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
2. Johnson, K. L., Contact Mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
3. Olukoko, O.A.; Becker, A.A; Fenner, R.T; Three Benchmark Examples for Frictional Contact Modelling using Finite Element and Boundary Element Methods, Journal of Strain Analysis, Vol. 28, No. 4, 1993, page 293-301.
4. Pascoe, S. K., Contact Stress Analysis Using Finite Element Methods, PhD. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Liverpool, 1990.
5. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, 1970.



AKEBONO

BRAKE EXPERTS



Duplex Surface Treatment of Tool Steels for Semi-Dry Stamping

การปรับพื้นผิวแบบ Duplex ของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับ Semi-Dry Stamping

Written by Tatsuhiko Aizawa, Yoshio Sugita, Hiroshi Morita (Shibaura Institute of Technology, Japan)
Translated by Pramote Koowattanasuchat (Khon Kaen University)

เขียนโดย Tatsuhiko Aizawa, Yoshio Sugita, Hiroshi Morita (Shibaura Institute of Technology, Japan)
แปลโดย ปราโมทย์ คุ้มบนสุชาติ (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)

ABSTRACT

Most of tool steel dies were usually surface treated by the duplex coating, where the tailored coating was deposited onto the prehardened die surface. High density plasma nitriding was employed to preharden the SKD11 dies. Then, the nano-laminated DLC coating was deposited with the chromium based inter-layers. In the former, both RF- and DC-plasmas were independently generated to accommodate high-density plasma state. Without mechanical matching between input and out powers, automatic frequency control around 2 MHz led to stable plasma nitriding. In the latter, the RF-sputter was utilized to coat the DLC nano-laminate, which was composed of two sub-layers with different mass density. Direct control of bias voltage and pressure enables us to vary the mass density and hydrogen content. First, the mechanical properties and micro-structure were analyzed both for the prehardened SKD11 and the nano-laminated DLC-coating. The tribological performance was compared to the DLC nano-laminated SKD11 specimens with and without prehardening. Significant difference in the tribological performance revealed that the prehardening by plasma nitriding was indispensable in the duplex method. The transfer stamping system was employed as a metal-forming simulator to investigate the formability of brass sheet in semi-dry stamping by using the series of the duplexed dies. No defects or loss of surface quality were seen on the brass book even after continuous transfer-stamping for 100,000 shots under the minimum quantity lubrication condition.

บทคัดย่อ

แม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือส่วนใหญ่ ใช้วิธีการปรับพื้นผิวโดยวิธีการ Duplex โดยการใส่สารเคลือบบนพื้นผิวแม่พิมพ์ที่ชุบแข็งแล้ว และ Plasma Nitriding ที่ความหนาแน่นสูงก็ถูกนำมาเพื่อชุบแข็ง แม่พิมพ์ SKD11 ส่วนการเคลือบ DLC นาโนลามิเนตไว้ที่ Chromium ตาม Inter-layers ในอดีตทั้ง RF-และDC-Plasmas ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สะดวกต่อสถานะ Plasmas ที่มีความหนาแน่นสูง การควบคุมความถี่อัตโนมัติจะอยู่ประมาณ 2 MHz ซึ่งทำให้ Plasma Nitriding คงที่ โดยไม่มีการจับคู่เครื่องกล ระหว่าง Input และ Out Powers ภายหลัง RF-Sputter ถูกใช้ในการเคลือบ DLC นาโนลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยสองชั้นย่อยที่มีความหนาแน่นมวลที่ต่างกัน การควบคุมโดยตรงของแรงดัน Bias และความดันช่วยให้ได้ความหนาแน่นของมวลและความจุไฮโดรเจนแตกต่างกันไป ก่อนที่คุณสมบัติทางกลและ Micro-Structure ถูกวิเคราะห์ ทั้งสำหรับชุบแข็ง SKD11 และ DLC เคลือบนาโนลามิเนต ผลการดำเนินงานทางด้านโทรโบลยี ถูกเทียบกับตัวอย่าง DLC นาโนเคลือบ SKD11 ที่มีและไม่มีชุบแข็ง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางโทรโบลยีเผยว่า การชุบแข็งโดยไนไตรด์พลาสมานั้น ขาดไม่ได้ในวิธี Duplex Method การถ่ายโอน Stamping System ถูกนำมาใช้จำลองการขึ้นรูปโลหะเพื่อตรวจสอบการขึ้นรูปของแผ่นทองเหลืองปั๊มกึ่งแห้งโดยใช้ชุดของแม่พิมพ์ Duplexed ไม่พบข้อบกพร่องหรือการสูญเสียคุณภาพผิวที่เห็นในตะขทองเหลือง แม้หลังจากการ Transfer-Stamping 100,000 ช็อต ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นปริมาณขั้นต่ำ



INTRODUCTION

Most of tools and dies are subjected to severe loading and straining; their tool-life might be shortened without surface treatment including the coating and pre-hardening. In the coated tools and molds, the substrate material hardness as well as the engineering endurance of coatings must be taken into account in applications. Hard coating on the soft substrate is easy to be fractured by the plastic deformation of substrate. The duplex coating method provides a solution to preharden the substrate materials and to mechanically support the hard coating [1]; e.g. plasma nitriding and PVD (Physical Vapor Deposition) in one process [2].

Among several approaches of this duplex coating, the plasma nitriding is often selected as one of the most reliable prehardening methods. In fact, the huge plasma nitriding facilities work in Germany for various industrial applications [3]. Compared to the conventional gas nitriding or heat treatments, the processing temperature is much lowered with keeping high quality of surface conditions and geometry. This success is basically supported by DC-pulse controlled plasma technology. On the other hand, there are many selections as a coating procedure for the duplex method. Among them, DLC (diamond like carbon) coating is frequently utilized in the variety of applications [4]. Since its nano-structure is characterized by the local graphitic substructure (sp²), the local tetragonal substructure (sp³) and the hydrogen content (H), its mechanical properties are controllable by changing these combination of sp²-sp³-H contents. In the literature, for an example, the DLC coating or amorphous carbon (a-C) without hydrogen content is symbolized by ta-C, called a hydrogen free DLC and utilized for protective coating of end-milling tools [5].

The authors have developed the high density plasma nitriding system to preharden various kinds of tool steels and stainless steels [1, 6-8]. Since the RF-power and the DC-bias are independently controlled in wide range, the holding temperature can be much lowered to be free from the formation of fragile, white layers on the surface of nitrided steels. In addition, various devices to intensify the plasma state can be equipped to enhance the plasma nitriding process even in the low holding

บทคัดย่อ

แม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือส่วนใหญ่ที่อาจจะได้รับโหลดและความเครียดสูง ทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์อาจจะสั้นลงโดยไม่รวมถึงการเคลือบรักษาพื้นผิวและก่อนชุบแข็ง การเคลือบแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงวัสดุพื้นผิวเช่นเดียวกับความทนทานด้านวิศวกรรมของการเคลือบจะต้องนำมาพิจารณาในการใช้งาน การเคลือบแข็งบนพื้นผิวที่อ่อนนุ่มของพื้นผิวเป็นเรื่องง่ายที่จะหักโดยเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก วิธีการเคลือบ Duplex เป็นวิธีการแก้ Preharden พื้นผิววัสดุและกลไกสนับสนุนการเคลือบแข็ง [1] ไนไตรต์ เช่น พลาสมาและ PVD (Physical Vapor Deposition) ในหนึ่งกระบวนการ [2]

ในบรรดาหลายวิธีของการเคลือบ Duplex นี้ไนไตรต์พลาสมา มักจะถูกเลือกให้เป็นหนึ่งในวิธีการที่น่าเชื่อถือที่สุด Prehardening ในความเป็นจริงสิ่งอำนวยความสะดวกไนไตรต์พลาสมาขนาดใหญ่ที่ทำงานในประเทศเยอรมนีสำหรับงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ [3] เมื่อเทียบกับก๊าซไนไตรด์ธรรมดาหรือการรักษาความร้อน การประมวลผลอุณหภูมิจะลดลงมากกับการรักษาที่มีคุณภาพสูงของสภาพพื้นผิวและรูปทรงเรขาคณิต ความสำเร็จนี้ได้รับการสนับสนุนโดยทั่วไปโดย DC-Pulse ควบคุมเทคโนโลยีพลาสมา ในทางกลับกันเป็นขั้นตอนการเคลือบที่มีการเลือกมากที่สุดสำหรับวิธี Duplex ในหมู่พวกเคลือบ DLC (Diamond Like Carbon) ถูกนำมาใช้บ่อยในความหลากหลายของการใช้งาน [4] ตั้งแต่โครงสร้างนาโนที่เป็นลักษณะโครงสร้าง Local Graphitic (SP²) ซึ่งเป็นโครงสร้าง Local Tetragonal (SP³) และไฮโดรเจน (H) สมบัติเชิงกลที่มีความสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนการรวมกันของ Sp²-Sp³-H เหล่านี้ ในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับตัวอย่างเคลือบ DLC หรือ Amorphous Carbon (a-C) โดยไม่มีไฮโดรเจน หรือที่เรียกว่าไฮโดรเจนฟรี DLC และใช้ในการเคลือบป้องกันของหยุดกัดเครื่องมือ [5]

ผู้เขียนบทความนี้ได้มีการพัฒนากระบวนการพลาสมาไนไตรต์ความหนาแน่นสูงที่จะชุบแข็ง หลายชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและเหล็กสแตนเลส [1, 6-8] เนื่องจากพลังงาน RF และ DC-Bias จะควบคุมได้อย่างอิสระในช่วงกว้างของอุณหภูมิการถือครองจะลดลงมากที่จะเป็นอิสระจากการกีดกันของความเปราะบางชั้นสีขาวบนพื้นผิวของเหล็กไนไตรต์ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ต่างๆที่จะกระชับสถานะพลาสมาที่สามารถติดตั้งเพื่อเพิ่มกระบวนการไนไตรต์พลา



temperature [9-10]. In parallel with the above research and development on the prehardening method, the nano-laminated DLC coating method was invented as one of non-traditional DLC coatings [11-12]. This nano-laminate DLC-coated WC (Co) has superior tribological properties to various ceramic coatings [13]; e.g. low frictional state by $\mu = 0.10$ to 0.15 was preserved with little deviation in the long-distance sliding test.

In the present paper, a new duplex method is proposed by combination of the nano-laminated DLC coating with the high density RF-DC plasma nitriding. First, the high density plasma nitriding system as well as the nano-lamination method of DLC coatings are stated with comments on their characteristic features. Two tribological methods are employed: the ball-on-disc method and the semi-dry transfer stamping. In the former, low friction under high stress state is attained even by the long-distance sliding test. In the latter, semi-dry transfer stamping with six steps is used as a metal forming simulator to demonstrate the engineering endurance of the duplex-treated die sets. Success in continuous stamping up to 100, 000 shots without any defects or loss of quality in brass hooks proves that this duplexed tools and dies are responsible for semi-dry stamping in practice. Owing to significant reduction of lubricating oil consumption, this semi-dry stamping by the present duplexed tools has a role to green manufacturing.

สม่ำเสมอในอุณหภูมิต่ำ [9-10] ในทางเดียวกันการวิจัยดังกล่าวข้างต้นและการพัฒนาวิธีชุบแข็งที่วิธีการเคลือบ DLC นาโนลามิเนตถูกสร้างขึ้นเป็นหนึ่งในสารเคลือบ DLC ที่ไม่ใช่แบบดั้งเดิม [11-12] นาโนลามิเนตนี้เคลือบ DLC WC (Co) มีคุณสมบัติทางโทรโบลยีเหนือกว่าการเคลือบเซรามิกอื่นๆ [13] เช่นสถานะเสียดทานต่ำโดย $\mu = 0.10-0.15$ ได้รับการเก็บรักษาไว้ด้วยการเบี่ยงเบนเล็กน้อย ในระยะทางยาวเลื่อนการทดสอบ

ในปัจจุบันของงานนี้ วิธีการ Duplex ใหม่จะถูกเสนอโดยการรวมกันของการเคลือบ DLC นาโนลามิเนตที่มีความหนาแน่นสูง RF-DC ในไตรด์พลาสมา ครั้งแรกที่มีความหนาแน่นสูงระบบพลาสมาไนไตรด์เช่นเดียวกับวิธีการเคลือบนาโนเคลือบ DLC โดยมีการแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับลักษณะวิธีการทางโทรโบลยีของสองวิธีคือ Ball-On-Disc และ Semi-Dry Transfer Stamping ในส่วนของวิธีแรก แรงเสียดทานต่ำภายใต้สภาวะความเครียดสูงจะสามารถทำได้โดยการทดสอบเลื่อนทางไกล ในส่วนของวิธีที่สองนั้นมีความซับซ้อนจะใช้เป็นโลหะขึ้นรูปจำลองแสดงให้เห็นถึงความทนทานทางวิศวกรรมของชุดแม่พิมพ์ Duplex ความสำเร็จในการปั๊มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 100, 000 ช็อต โดยไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ หรือการสูญเสียของคุณภาพในตะของทองเหลืองพิสูจน์ให้เห็นว่าแม่พิมพ์ Duplex นั้นสามารถใช้ในการทำ Semi-Dry Stamping ในทางปฏิบัติเนื่องจากการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของการใช้น้ำมันในการทำ Semi-Dry Stamping การใช้แม่พิมพ์ Duplex ในปัจจุบันจึงมีบทบาทใน Green Manufacturing

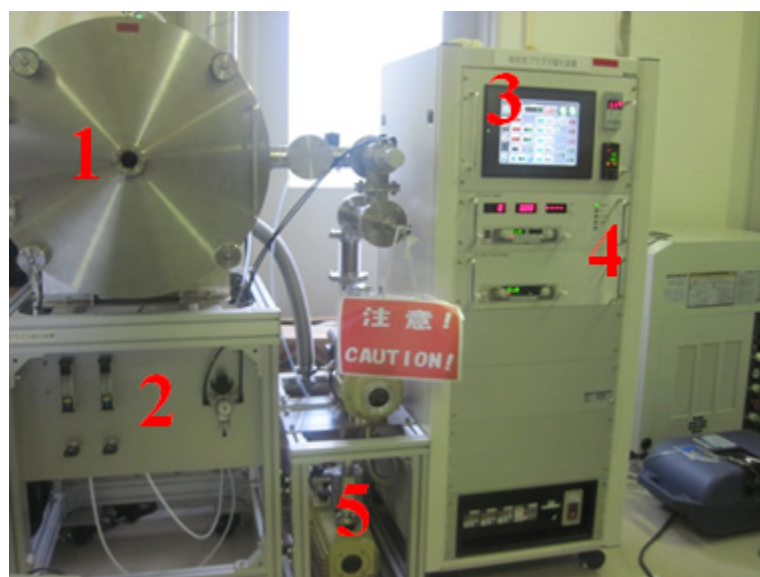


Fig. 1. High density plasma nitriding system: (1) Vacuum chamber, (2) Gas-flow controller, (3) Control-panel, (4) RF/DC power generator, and (5) Evacuation system.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

Both the high density plasma nitriding and the RF-sputtering systems are utilized to make pre-hardening and nano-laminated DLC coating on the SKD11 substrate, respectively.

High density plasma nitriding

In the present plasma nitriding system, both RF- and DC-plasmas are generated by RF and DC power supplies, independently. As shown in Fig. 1, RF-plasma is ignited by dipole electrode, while DC-plasma is driven by DC-bias on the cathode plate. The generated plasma has symmetric configuration in the electricity field since the vacuum chamber is electrically neutral. There is no mechanical matching box; matching between input and output powers is automatically maintained by frequency control around 2 MHz. In addition, the focused nitrogen plasma flux can be irradiated onto the samples by using the magnetic lens. Nitrogen plasma is first utilized for pre-sputtering the samples; mixed gas of nitrogen and hydrogen is used in the plasma nitriding. The flow rate ratio in the mixed gas affects the species of ions and radicals. In particular, the yield of NH-radicals in the generated species increases with reducing the ratio of the hydrogen flow rate to the nitrogen one. In fact, after Ref. [1], the measured intensity of NH-radicals by the emissive light spectroscopy reaches to 25-30 % of the maximum intensity of N_2^+ ion as shown in Fig. 2. This measured spectrum proves that high yield of NH-radicals as well as activated nitrogen atoms are available in the present plasma nitriding.

กระบวนการทำการทดลอง

วิธีการทดลองทั้งไนไตรด์พลาสมาความหนาแน่นสูง และระบบ RF-Sputtering ถูกนำมาใช้เพื่อการชุบแข็งและการเคลือบ DLC นาโนมิเนต บนผิว SKD11 ตามลำดับ

High density plasma nitriding

ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาไนไตรด์ ทั้ง RF-Plasma และ DC-Plasma จะถูกสร้างโดย RF และ DC อุปกรณ์ไฟฟ้าอิสระ ดังแสดงในรูป 1 RF-Plasma ถูกจุดขึ้นโดยขั้วอิเล็กโทรด ในขณะที่ DC-Plasma ถูกขับเคลื่อนโดย DC-Bias บนแผ่นแคโทด พลาสมาที่สร้างมีการกำหนดค่าส่วนในด้านการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ห้องสุญญากาศเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีการจับคู่กล่องเครื่องกล การจับคู่ระหว่างพลังงานเข้าและส่งออกจะยังคงอยู่โดยอัตโนมัติโดยการควบคุมความถี่ประมาณ 2 MHz นอกจากนี้พลาสมาที่เน้นไนโตรเจนสามารถฉายรังสีไปยังกลุ่มตัวอย่างโดยใช้เลนส์แม่เหล็ก พลาสมาไนโตรเจนถูกนำมาใช้กับชิ้นส่วนตัวอย่างก่อนในการทำ Sputtering ก๊าซผสมของไนโตรเจนและไฮโดรเจนที่ใช้ในไนไตรด์พลาสมา อัตราส่วนอัตราการไหลในก๊าซผสมมีผลต่อชนิดของไอออนและอนุมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลผลิตของ NH-อนุมูลชนิดที่สร้างขึ้นเพิ่มขึ้นกับการลดอัตราส่วนของอัตราการไหลของไฮโดรเจนไนโตรเจน ในความเป็นจริงแล้วจากหลักฐานที่อ้างอิง [1] การวัดความเข้มของอนุมูล-NH โดย Emissive Light Spectroscopy ถึง 25-30% ของความเข้มสูงสุดของ N_2^+ ไอออนดังแสดงในรูป 2 การวัดสเปกตรัมนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าอัตราผลเกิดขึ้นที่สูงของ NH-อนุมูลเช่นเดียวกับอะตอมไนโตรเจนเปิดใช้งานที่มีอยู่ในปัจจุบันไนไตรด์พลาสมา

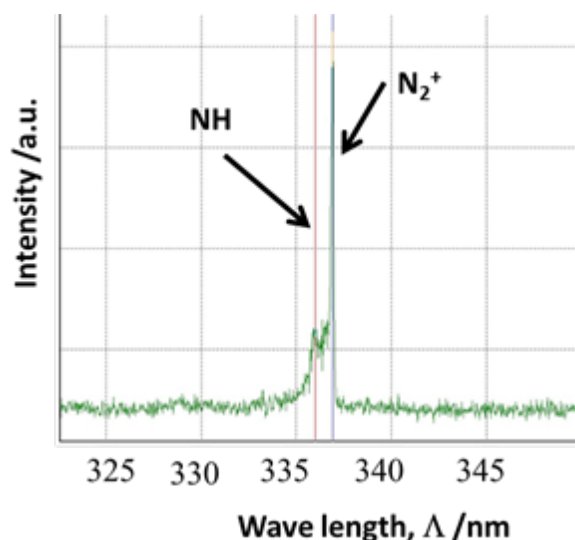


Fig. 2. A typical emissive light spectrum measured by the spectroscopy in the narrow range of wave lengths to describe the population of generated species in the high density plasmas.

Nano-laminated DLC coating

DLC (diamond like carbon) coating has been widely utilized in practice. Among the huge variety of DLC coatings, the nano-laminated DLC coating is employed for the deposited film by the present duplex coating. This coating is structured by the mutual stacking of high and low density DLC films with the nano-meter thickness. The typical nano-structure of nano-laminated DLC coating is depicted in Fig. 3.

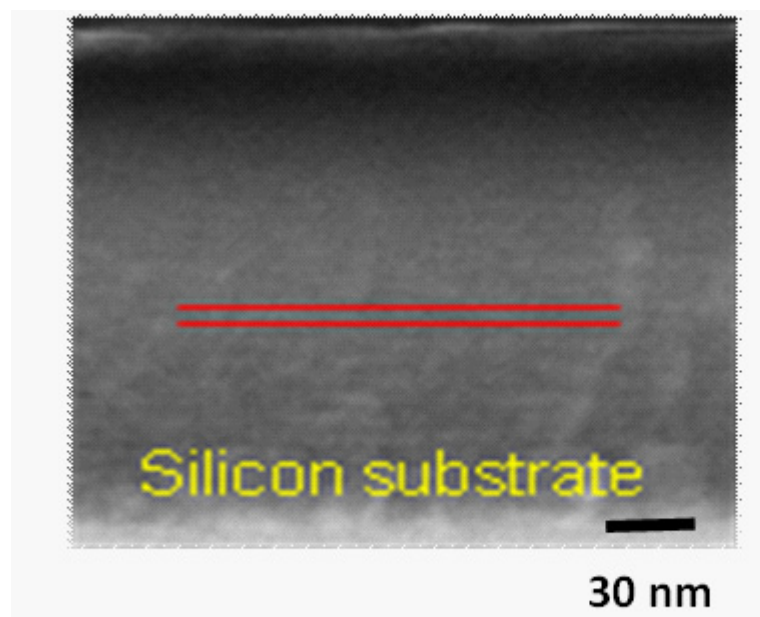


Fig. 3. The cross-sectional view of the nano-laminated DLC coating on the substrate by the sputtering process.

The bilayer thickness is 10 nm. One nano-laminate of DLC coating is composed of white and black sub-layers. The white sublayer corresponds to the higher density amorphous carbon film; the black one, the lower density amorphous carbon. Under the optimum range of sputtering, this difference of mass density for amorphous carbon coatings is controllable by the bias voltage. In addition, the hydrogen content in each sublayer is also controllable by the pressure.

This nano-laminated amorphous coating has superior features to single-layered DLC films, as precisely stated in Ref. [14]. The normal DLC film is hard but has little ductility to arrest the straight cracking through the thickness once the chipping or the surface defects occur in their usage; the substrate materials often suffer from fatal cracking or damage. In the nano-laminated coating, the initial cracking is retarded by isolation of micro-cracking in each sub-layer. Furthermore, these micro-cracks are difficult to be combined to form a macro-

Nano-laminated DLC coating

การเคลือบ DLC (Diamond Like Carbon) ได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลายในการปฏิบัติ ท้ามกลางความหลากหลายของการเคลือบ DLC การเคลือบ DLC นานาไมเนต ถูกนำมาสำหรับกับสารเคลือบ Duplex ในปัจจุบัน การเคลือบนี้มีโครงสร้างโดยซ้อนร่วมนกันของความหนาแน่นสูงและ DLC ฟิล์ม ที่มีความหนาแน่นนาโนเมตร โครงสร้างนาโนทั่วไปของการเคลือบ DLC นาโนเคลือบนั้นแสดงในรูปที่ 3

ความหนา Bilayer 10 นาโนเมตร หนึ่งนาโนเคลือบลามิเนตของ DLC ประกอบด้วยชั้นย่อยสีขาวและดำ Sublayer สีขาวสอดคล้องกับความหนาแน่นสูงกว่าฟิล์ม Amorphous คาร์บอน ซึ่งมีสีดำและความหนาแน่นต่ำกว่า Amorphous คาร์บอน ภายใต้ช่วงที่เหมาะสมของสปีดเตอร์ ความแตกต่างของความหนาแน่นของมวลสำหรับเคลือบ Amorphous คาร์บอนนี้สามารถควบคุมได้โดยแรงดันไฟฟ้า Bias นอกจากนี้ไฮโดรเจนแต่ละ Sublayer นี้ยังสามารถควบคุมได้โดยความดัน

สารเคลือบ Amorphous นาโนลามิเนต มีคุณสมบัติที่เหนือกว่า DLC ฟิล์มชั้นเดียวตามที่ระบุไว้แม่นยำในเอกสารอ้างอิง [14] ฟิล์ม DLC ปกติแล้วแข็งแต่มีความเหนียวน้อยในการจับกุมการแตกตรงผ่านความหนาเมื่อบิ่นหรือของเสียที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวในการใช้งาน วัสดุพื้นผิวมักจะเกิดจากการแตกร้าวหรือความเสียหายร้ายแรง ในการเคลือบนาโนเคลือบที่แตกเริ่มต้นจะถูกชะลอโดยแยก Micro-Cracking ในแต่ละชั้นย่อย นอกจากนี้ Micro-Cracking เหล่านี้ยังไม่สามารถรวมกันมารวมกันเพื่อที่จะเป็น Macro-Cracking ซึ่งจะส่งผลในแขนงของ

crack. This results in the significant branching of cracks to arrest the cracking process and be free from total failure of coating.

Besides for the above improvement of toughness, its hardness is controllable by reducing the bilayer thickness (ΔL) in nano-lamination and by varying the ratio of high and low density sub-layer thickness in the nano-laminate. As depicted in Fig. 4, the measured hardness becomes 33 GPa when $\Delta L = 10$ nm and the ratio of the white sublayer thickness to the black sublayer one is 35:35. Remembering the normal DLC coating hardness ranges from 15 to 25 GPa, significantly high hardness is attained by this nano-lamination. When reducing this ΔL from 10 to 5 nm, the hardness increases from 33 GPa up to 52 GPa. In addition, the hardness can be tuned by changing the sub-layer ratio.

รอยแตกอย่างมีนัยสำคัญในการตรวจจับกระบวนการแตกและปลอดจากการเสียหายทั้งหมดของการเคลือบ

นอกจากนี้การปรับปรุงดังกล่าวข้างต้นของความเหนียว การควบคุมความแข็งแรงสามารถทำได้ได้โดยการลดความหนาของ Bilayer (ΔL) ใน Nano-Lamination และทำให้อัตราส่วนของความหนาแน่นสูงและต่ำความหนาของชั้นย่อยในนาโนลามิเนตแตกต่างกันไป ในรูปที่ 4 ความแข็งที่วัดได้คือ 33 GPa เมื่อ $\Delta L = 10$ nm และอัตราส่วนของความหนา Sublayer สีขาวกับสีดำคือ 35:35 ปกติแล้วช่วงความแข็งแรงของสารเคลือบ DLC ปกติคือ 15-25 GPa ความแข็งแรงสูงอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถทำได้ใช้ Nano-Lamination นี้ เมื่อลด ΔL จาก 10 nm เป็น 5 nm ความแข็งจะเพิ่มขึ้นจาก 33 GPa ถึง 52 GPa นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วน Sublayer

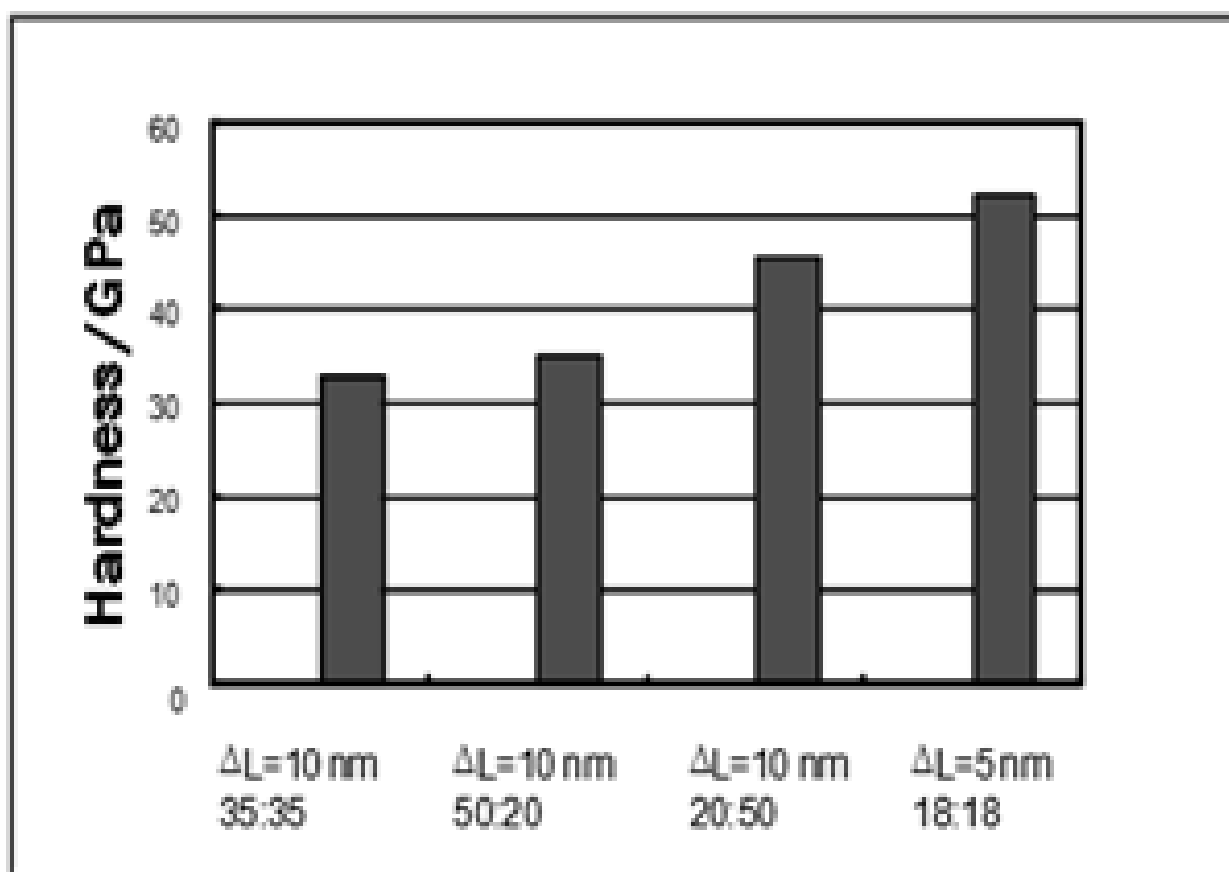


Fig. 4. The cross-sectional view of the nano-laminated DLC coating on the substrate by the sputtering process.

Ball-on-disc tribo-testing

The ball-on-disc tribo-testing system (CSM Instruments, Co., Ltd.) was employed to measure the transient of friction coefficient under high pressure condition. SUJ2-ball with the diameter of 6 mm was used as a counter material. The applied load was constant, 10 N, and, the sliding velocity, 150 mm/s.

Ball-on-disc tribo-testing

กระบวนการ ball-on-disc tribo-testing (CSM Instruments, Co., Ltd.) ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขความดันสูงชั่วคราว SUJ2-ball ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. ถูกนำมาใช้เป็น วัสดุ Counter โหลดที่คงเป็นค่าคงที่ 10 N และความเร็วสไลด์ 150 มิลลิเมตร/วินาที

Semi-dry transfer stamping

The six-step transfer stamping system (Shimamura Metals, Co. Ltd.) was employed as a metal forming simulator to demonstrate that the duplex-coated SKD11 dies should have sufficient engineering endurance even in semi-dry condition. Figure 5 depicted the outlook of transfer stamping machine with the fly-wheel. The brass sheet was fed from the left-hand side and first sheared to a circular blank. This blank was transferred to the drawing steps from the first to the fifth. In finishing, the neck was formed onto the side surface to yield the brass-hook. The low viscosity oil or drying oil was dropped once in every 10 shot.

In measurement, the whole intermediate products such as the brass blank and drawn cups were picked up to make surface observation by microscope.

Semi-dry transfer stamping

กระบวนการ transfer stamping หกขั้นตอน (Shimamura Metals, Co. Ltd.) ถูกนำมาใช้เป็นการจำลองการขึ้นรูปโลหะเพื่อแสดงให้เห็นว่า แม่พิมพ์ Duplex-Coated SKD11 ควรจะมีความทนทานทางวิศวกรรมเพียงพอแม้จะอยู่ในสภาพกึ่งแห้ง รูปที่ 5 ภาพมุมมองของการถ่ายโอนเครื่องปั๊มที่มีล้อช่วย แผ่นทองเหลืองถูกป้อนจากด้านซ้ายมือและถูกตัดเป็นแผ่นวงกลม แผ่นนี้ถูกถ่ายโอนไปยังขั้นตอน Drawqing ตั้งแต่ขั้นตอนที่หนึ่งถึงห้า ในการปรับละเอียดท้ายสุดจะเป็นการขึ้นรูปส่วนคอจากพื้นผิวด้านข้างเพื่อให้เป็นตะขอทองเหลือง น้ำมันความหนืดหรือน้ำมันอบแห้งที่จะถูกหยดลงไปครั้งใน ทุก ๆ 10 ช็อต

ในการวัดคุณภาพ ชิ้นส่วน เช่น แผ่นทองเหลืองและ Drawn Cup จะถูกนำมาตรวจพื้นผิวจากการสังเกตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

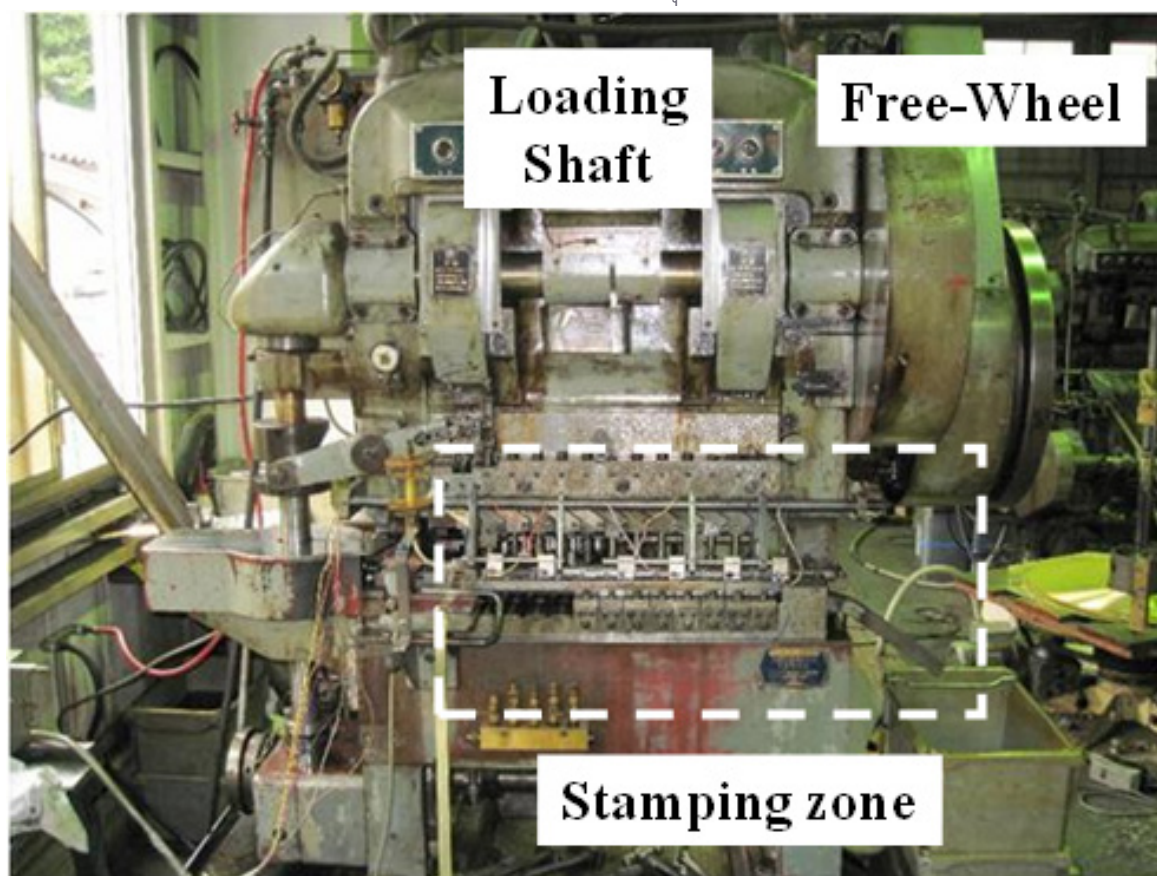


Fig. 5. Semi-dry transfer stamping system as a metal forming simulator.

EXPERIMENTAL RESULTS

Material and mechanical characterization of the nitrided SKD11 is first performed before two tribological tests. At first, the ball-on-disc method is employed to describe the low frictional state of duplexed SKD11 substrate in long distance sliding condition. In second, the metal forming simulator is used to prove the

ผลการทดลอง

คุณสมบัติทางวัสดุและทางกลของแม่พิมพ์ SKD11 ไนไตรต์ จะถูกทดสอบก่อน การทดสอบทางโทรโบลยีทั้งสองวิธี ในวิธีแรก ball-on-disc จะใช้ในการอธิบายสถานะความเสียดทานต่ำของพื้นผิว แม่พิมพ์ SKD11 Duplex ในระยะทางยาวสภาพเลื่อน ส่วนวิธีที่สองเป็นการจำลองการขึ้นรูปโลหะที่ใช้ในการ

engineering endurance of this duplex coating in practice.

Nitrided SKD-11 substrates

After pre-sputtering for 900 s, SKD-11 sample with $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ was plasma-nitrided at 200 Pa and 753 K (or 480 °C) for 14.4 ks under the mixture gases of nitrogen and hydrogen with the ratio of 7 to 3. Both RF-voltage and DC-bias were kept constant by 200 V and -500 V, respectively. Figure 6 shows a typical cross-section of this prehardened SKD11 specimen. The nitrided layer thickness is 40 μm . No white layers are seen on this surface.

Using the micro-Vickers testing with 1N, its hardness was measured at five points. The average hardness was 1070 HV with the deviation of 20 HV. This high hardness originates from fine chromium nitride (CrN) precipitation in the SKD-11 matrix as well as the solid solution of nitrogen atoms in the matrix. Its XRD profile is shown in Fig. 7. Formation of CrN with less population of Fe_4N and Fe_2N is recognized in the matrix. This implies that SKD-11 sample is nitrided without formation of brittle, white layers.

Nitrided SKD-11 substrates

หลังจากที่ Pre-sputtering เป็นเวลา 900 วินาที แม่พิมพ์ SKD-11 ตัวอย่างมีขนาด $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ ถูกพลาสมาไนไตรด์ที่ 200 Pa และ 753 K (หรือ 480 องศาเซลเซียส) สำหรับ 14.4 ks ภายใต้ก๊าซส่วนผสมของไนโตรเจนและไฮโดรเจนที่มีอัตราส่วนของ 7 ต่อ 3 ทั้ง RF-Voltage และ DC-Bias ที่ถูกเก็บไว้อย่างต่อเนื่องโดย 200 V และ -500 V ตามลำดับ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นรูปภาพโดยทั่วไปของส่วนตัดตัวอย่างแม่พิมพ์ SKD11 นี้ที่ชุบแข็งแล้ว ความหนาของชั้นไนไตรด์ 40 μm ไม่มีชั้นสีขาวจะเห็นบนพื้นผิวนี้

การทดสอบไมโครวิกเกอร์ด้วยแรงกด 1 N นั้นความแข็งของแม่พิมพ์จะวัดที่ห้าจุด โดยมีความแข็งเฉลี่ยคือ 1,070 HV และมีค่าเบี่ยงเบน 20 HV ความแข็งสูงที่ได้มาจากการตกตะกอนไนไตรโครเมียมละเอียด (CrN) ในเมทริกซ์ SKD-11 และการตกตะกอนของอะตอมไนโตรเจนในเมทริกซ์ รูป XRD ของแม่พิมพ์นั้นแสดงในรูป ที่ 7 มีการก่อตัวของ CrN โดยมี Fe_4N และ Fe_2N น้อยกว่า ซึ่งแสดงว่าแม่พิมพ์ SKD-11 เป็นการไนไตรด์โดยไม่มีการก่อตัวของชั้นสีขาวที่เปราะ

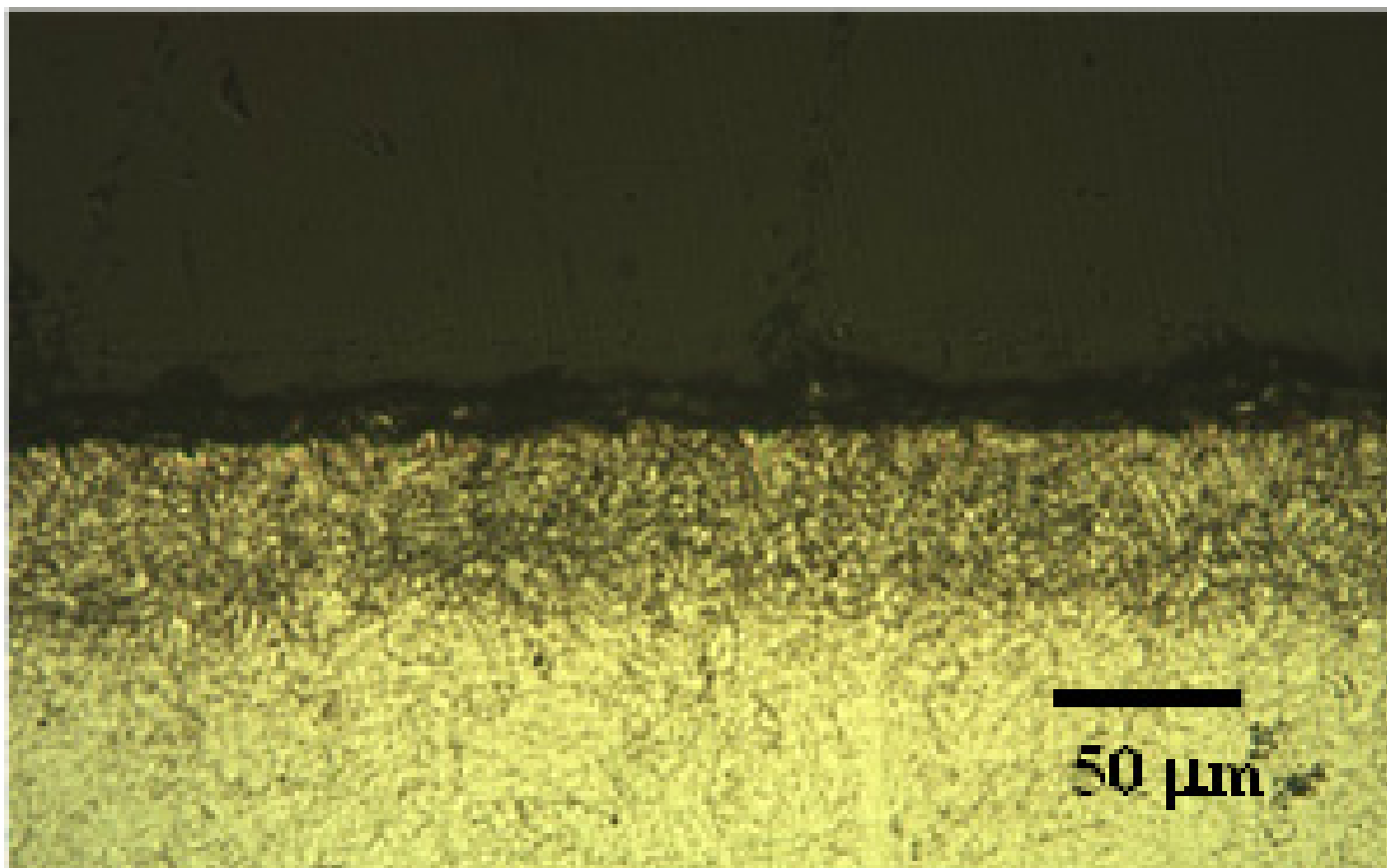


Fig. 6. Cross-sectional view of plasma nitrided SKD11 specimen.

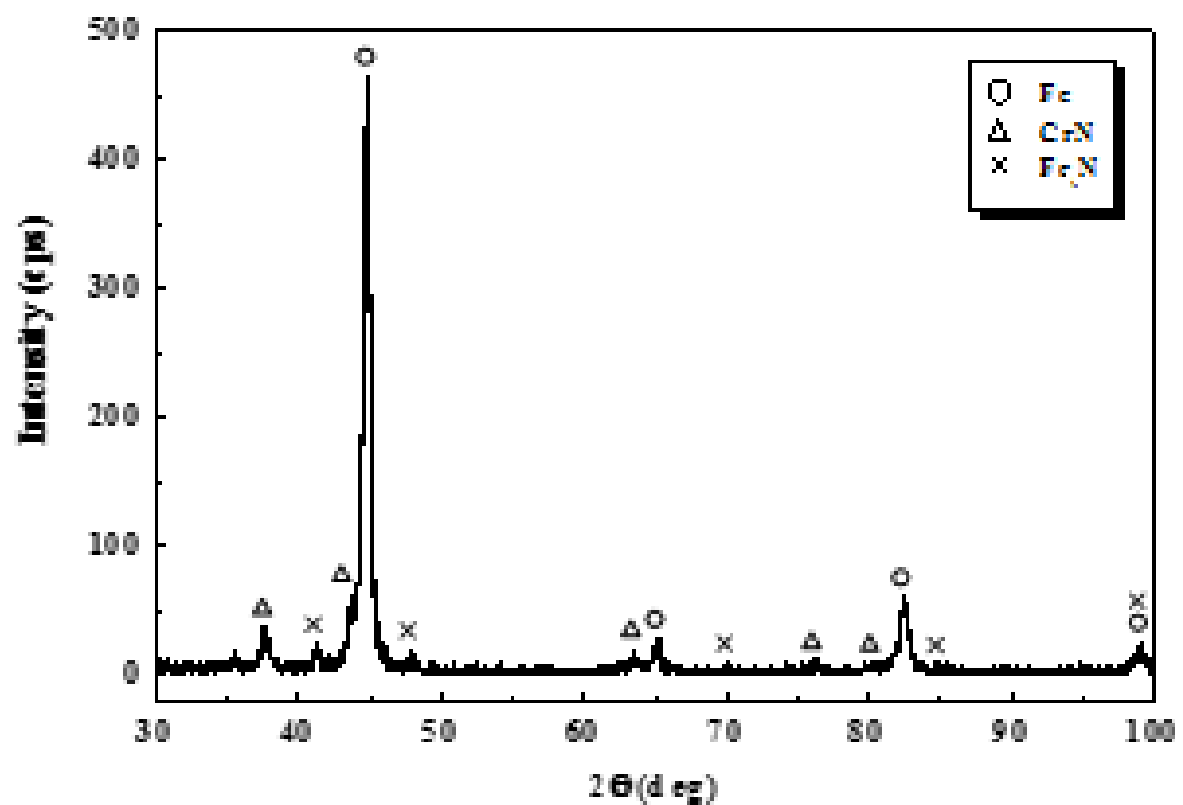


Fig. 7. XRD diagram of plasma nitrided SKD11 specimen.

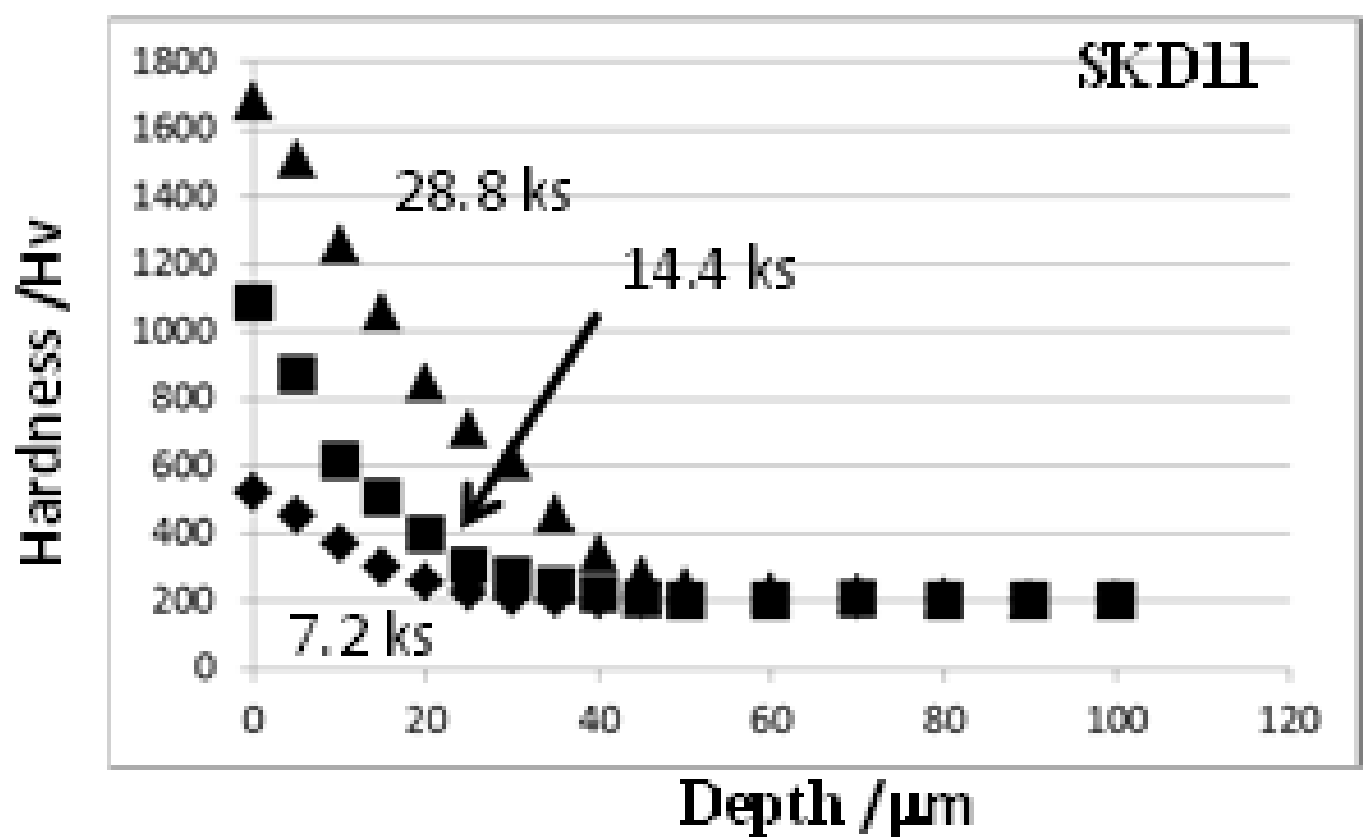


Fig. 8. Variation of hardness profile with time during the plasma nitriding.

The nitriding processing time is varied by 7.2, 14.4 and 28.8 ks to describe the change of hardness depth profile with time. As shown in Fig. 8, the surface hardness monotonically increases from 530 Hv for 7.2 ks to 1680 Hv for 28.8 ks. In general, the surface hardness (H) increases but the nitrided layer (E) decreases with increasing the chromium contents in the Fe-Cr alloy system [8]; e.g. in case of the DC-plasma nitriding at 773 K for 57.6 ks, H = 1100 Hv and E = 150 μ m for Fe-8Cr, and, H = 1200 Hv and E = 100 μ m for Fe-13Cr, respectively. Since H = 1680 Hv and E = 60 μ m by the present plasma nitriding at 753 K for 28.8 ks, this prehardening has sufficient capacity to support the coated layer in the present duplex coating.

Ball-on-disc tribo-testing

The nano-laminated DLC coating was RF-sputtered at P = 0.5 Pa in ambient temperature onto the SKD11 specimen with the diameter of 25 mm and the thickness of 5 mm. The bias voltage (VB) was pulsewise controlled in the program; e.g. in case of nano-lamination with $\Delta L = 10$ nm and the sublayer ratio of 35:35, VB = -200 V for 35 s in formation of the high density sublayer and VB = 0 V for 35 s in formation of low density sublayer, respectively, in the pulse width of 70 s. Before DLC-coating, the metallic chromium was deposited as the bottom interlayer onto the SKD11 specimen and followed by the transient interlayer of CrN for matching with the main layer of nano-laminated DLC coating.

When the prehardened layer by the plasma nitriding is absent, the hard counter material seizes with the nano-laminated coating in two seconds after starting. This is because the raw SKD-11 substrate makes plastic deformation by indentation of the hard counter ball and both are adhesive at the moment.

On the other hand, the original SKD-11 specimen was plasma nitrided at 753 K at 200 Pa for 14.4 ks. Under the same coating conditions as stated in the above, the nano-laminated DLC was coated onto this prehardened SKD-11 specimen. Figure 9 depicts the time variation of measured friction coefficient under the same condition as stated in 2.3. Except for the initial running out period, the friction coefficient becomes constant by $\mu = 0.15$ with less deviation in time. In order to investigate the

พิสูจน์ความทนทานด้านวิศวกรรมของสารเคลือบผิว Duplex ในทางปฏิบัติ เวลาสำหรับการทำไนไตรด์จะถูกปรับจาก 7.2 14.4 และ 28.8 ks เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความแข็งกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8 ความแข็งผิวเพิ่มขึ้นจาก 530 HV สำหรับ 7.2 ks 1680 HV สำหรับ 28.8 ks ซึ่งความแข็งผิว (H) เพิ่มขึ้น แต่ชั้นไนไตรด์ (E) ลดลงด้วยการเพิ่มโครเมียมในระบบผสม Fe-Cr [8] เช่นในกรณีของไนไตรด์ DC-Plasma ที่ 773 K สำหรับ 57.6 ks H = 1100 HV และ E = 150 μ m สำหรับ Fe-8Cr และ H = 1200 HV และ E = 100 μ m สำหรับ Fe-13Cr ตามลำดับ ตั้งแต่ H = 1680 HV และ E = 60 μ m โดยการทำไนไตรด์พลาสมาที่ 753 K สำหรับ 28.8 ks Prehardening นี้มีสามาถที่จะสนับสนุนชั้นเคลือบในการเคลือบ Duplex ในปัจจุบัน

Ball-on-disc tribo-testing

การเคลือบ DLC นาโนลามิเนต ถูก RF-Sputtered ที่ P = 0.5 Pa ในอุณหภูมิปกติบนชิ้นงาน SKD11 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร Bias Voltage (VB) ถูกควบคุมแบบ Pulsewise ในโปรแกรม เช่นในกรณีของ Nano-Lamination ด้วย $\Delta L = 10$ nm และอัตราของ Sublayer 35:35 ที่ VB = -200 V เป็นเวลา 35 วินาที ในการก่อตัวของ Sublayer ความหนาแน่นสูง และ VB = 0 V เป็นเวลา 35 วินาที ในการก่อตัวของความหนาแน่นต่ำ Sublayer ตามลำดับ ในความกว้างของคลื่น 70 วินาที ก่อนการเคลือบ DLC โลหะโครเมียมถูกวางเป็น Interlayer ด้านล่าง ชิ้นงาน SKD11 และตามด้วย Transient Interlayer ของ CrN สำหรับการจับคู่กับชั้นหลักของการเคลือบ DLC Nano-Lamination

เมื่อชั้นที่ขูดแข็งแล้วโดยไนไตรด์พลาสมาไม่มี วัสดุ Counter ที่แข็งจะมีการจับสารเคลือบนาโนลามิเนตในสองวินาทีหลังจากเริ่มต้น เนื่องจากวัสดุตั้งต้น SKD-11 จะถูกทำให้เสียรูปพลาสติกโดยการกดของวัสดุ Counter ที่แข็ง และวัสดุทั้งสองมีการยึดติดกัน

ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงาน SKD-11 เริ่มต้นที่ไนไตรด์พลาสมาที่ 753 K ที่ 200 Pa 14.4 ks ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบเช่นเดียวกับที่ระบุไว้ในข้างต้น DLC Nano-Lamination ถูกเคลือบลงบนชิ้นงาน SKD-11 รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเวลาของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกับที่ระบุไว้ใน 2.3 ยกเว้นช่วง Running out ตอนแรก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะคงที่โดย $\mu = 0.15$ ซึ่งมีการเบี่ยงเบนเวลาน้อย เพื่อที่จะตรวจสอบความน่าเชื่อถือของคุณสมบัติทางโทรโบโลยีของชิ้นงานตัวอย่าง แมพิมพ์ Duplexed SKD11 ได้ถูกเตรียมและทดสอบใน ball-

reliability of this tribological property among specimens, two duplexed SKD11 specimens were prepared and subjected to ball-on-disc testing. As compared in Fig. 9, both transients of friction coefficient are equal to each other; the measured tribological property is characteristic to this duplexed SKD11.

With comparison to the tribological behavior of the nano-laminated WC (Co), the time history of friction coefficient in Fig. 9 is nearly the same even by using the prehardened SKD11 instead of WC (Co).

on-disc จากรูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่าๆ กัน ซึ่งคุณสมบัติทางโทรโบลยีที่วัดได้นั้นถือว่าเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของแม่พิมพ์ SKD11 Duplexed นี้

จากการเปรียบเทียบกับพฤติกรรมทางโทรโบลยีของ Nano-Laminated WC (Co) แม่พิมพ์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเวลาในรูปที่ 9 นั้นคล้ายคลึงกันแม้แต่การใช้กับแม่พิมพ์ Prehardened SKD11 แทนที่แม่พิมพ์ WC (Co)

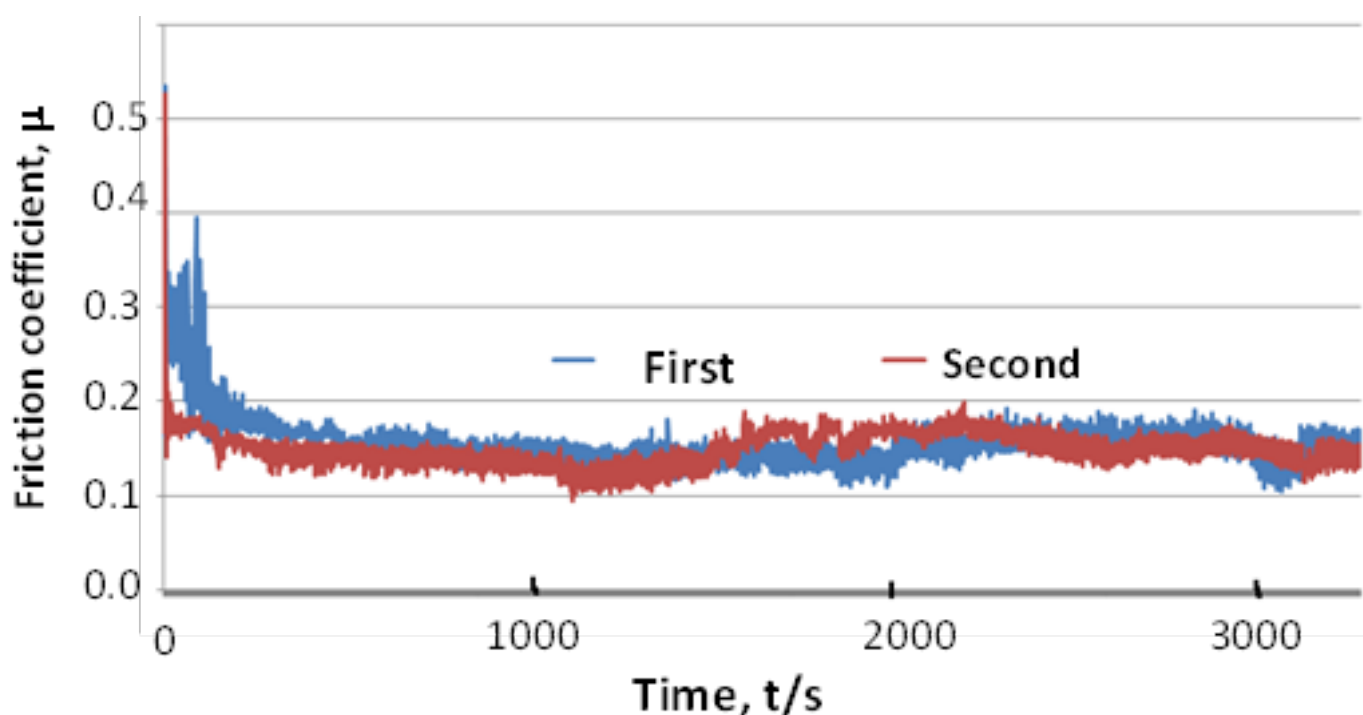


Fig. 9. Variation of the friction coefficient with time for the duplexed SKD11 substrates.

Transfer-stamping in semi-dry condition

The transfer stamping process is composed of the drawing, the ironing and the shearing steps, each of which requires for a pair of die and punch with the different diameters and clearances. Hence, the initial brass sheet is subjected to various reduction in thickness and straining.

In this metal-forming simulation, the whole dies and punches were duplex-coated by the common procedure. After plasma nitriding of SKD11 dies and punches for prehardening up to 1500 Hv for surface hardness, the metal chromium bottom layer was coated and followed by the graded chromium nitride coating as an interlayer. Then, they were nano-laminate-DLC coated by $\Delta L = 10$ nm up to 100 bilayers; finally, the normal DLC coating

Transfer-stamping in semi-dry condition

กระบวนการ Transfer stamping นั้นประกอบไปด้วย Drawing Ironing และ Shearing โดยแต่ละขั้นตอนต้องใช้อุปกรณ์ Die และ Punch ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและ Clearance ที่แตกต่างกัน ดังนั้นแผ่นทองเหลืองจึงอยู่ภายใต้การการลดความหนาและความเครียดที่แตกต่างกัน

ในการจำลองขึ้นรูปโลหะ Die และ Punch ทั้งหมดจะเคลือบ Duplex โดยขั้นตอนปกติ หลังจากทำไนไตรด์พลาสมาของ SKD11 Die และ Punches สำหรับการ Prehardening ถึง 1500 HV สำหรับความแข็งชั้นผิว โดยมีชั้นล่างที่เป็นโลหะโครเมียมถูกเคลือบและตามด้วยการเคลือบโครเมียมไนไตรด์ส่วนที่เป็น Interlayer จากนั้นก็เคลือบ DLC นาโนลามิเนต โดย $\Delta L = 10$ nm ถึง 100 bilayers ในที่สุดการเคลือบ DLC ปกติจะเคลือบ DLC Nano-Lamination เป็นตัวเคลือบบน

is coated onto this nano-laminated DLC as a top coat.

Figure 10 depicts the series of dies and punches to be used from the initial blanking step to the final drawing steps. Besides for the initial blanking dies and punches, the diameter of drawing die-holes and punch is reduced in step-by-step with consideration of reduction in brass sheet thickness. With aid of the developed coating technique [15], the nano-laminate DLC is coated into the depth of die holes even when the die-hole diameter is less than 5 mm.

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นชุดของ Die และ Punch จากขั้นตอน blanking เริ่มต้นไปยังขั้นตอน Drawing สุดท้าย นอกจากการ blanking เริ่มต้นของ Die และ Punch ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Drawing Die และ Punch จะลดลงในแต่ละขั้นตอน โดยมีการพิจารณาในการลดความหนาของแผ่นทองเหลือง จากการพัฒนาเทคนิคการเคลือบ [15] DLC Nano-Lamination จะถูกเคลือบลงไปในความลึกของ die แม้กระทั่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Die น้อยกว่า 5 มม.

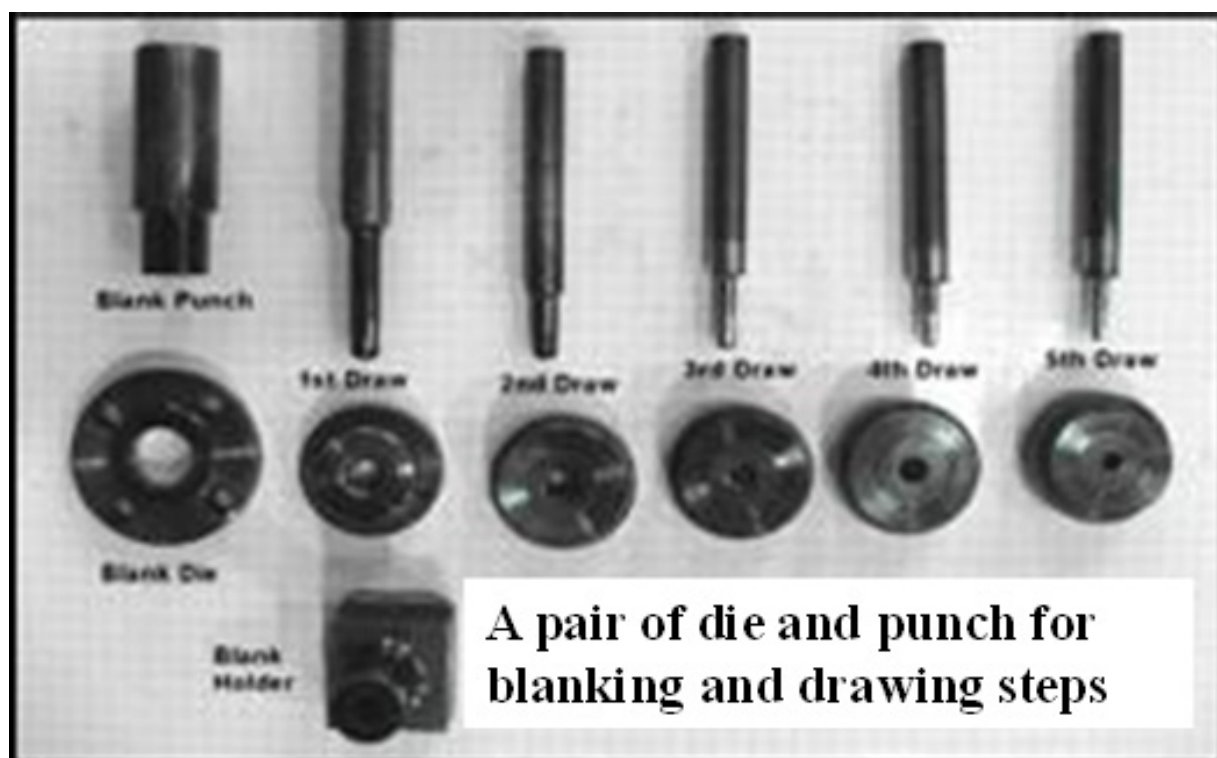


Fig. 10. A series of punches and dies for this semi-dry transfer stamping.

Figure 11 shows the series of brass products from the brass blank to the final shape of hook through the drawn brass cups. During the fine blanking step, the punch and die corners are subjected to high stress and friction by shearing the brass sheet. In the following deep-drawing steps, the brass cup diameter as well as the sheet thickness are gradually reduced and followed by the neck-formation step. When $N = 600$, no galling or adhesion are observed on the brass blank and cup surfaces in any transient step of this semi-dry transfer stamping.

The product quality of brass hooks is determined by their metallic shining on their head and neck. Even without the failure in brass-cup shaping or the fatal galling during the

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงชุดของผลิตภัณฑ์ทองเหลืองจากแผ่นทองเหลืองไปจนถึงรูปตะขอผ่านการดึงลากขั้นรูป ในระหว่างขั้นตอน Blanking Die และ Punch จะอยู่ในสภาวะที่ต้องเจอกับความเครียดและแรงเสียดทานสูงจากการตัดแผ่นทองเหลือง ในขั้นตอนต่อไปของการขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถ้วยทองเหลืองและความหนาของแผ่นจะลดลงเรื่อยๆ และตามด้วยขั้นตอนการขึ้นรูปคอ เมื่อ $N = 600$ ไม่มีการยึดเกาะของผิววัสดุบนแผ่นทองเหลืองและพื้นผิวของถ้วยในขั้นตอนใดๆของ Semi-Dry Transfer Stamping

คุณภาพของตะขอทองเหลืองจะสามารถดูได้จากการส่องแสงของโลหะบนส่วนหัวและส่วนคอของตะขอ แม้ว่าจะไม่มีควมเสียหายในการขึ้นรูปถ้วยทองเหลืองหรือการยึดติดของวัสดุในระหว่างชุดของขั้นตอนการขึ้นรูป ส่วนคอและพื้นผิวของตะขอ

series of steps, the neck and head surfaces of brass hook often roughen themselves and lose their metallic shining once the brass work surface experiences locally a metallic contact with the SKD11 substrates. In other words, the appearance of metallic shining surfaces for brass-hook neck and head after stamping proves that the smooth surface quality of dies and punches should be preserved in the transfer process to form the neck and bottom surfaces in the final product. Figure 12 shows the final brass-hook after continuously transfer stamping up to 100,000 shots. This highly qualified brass-hook is just a proof that the present duplexed dies and punches have sufficient engineering endurance under the minimum quantity lubrication condition in practice.

ทองเหลืองมักจะขัดกับตัวเองและสูญเสียการส่องแสงของโลหะเมื่อพื้นผิวของทอง

ทองเหลืองไปโดนกับพื้นผิวของแม่พิมพ์ SKD11 หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า ลักษณะของพื้นผิวโลหะส่องแสงสำหรับตะขอทองเหลืองส่วนคอและส่วนหัวสามารถพิสูจน์ได้ว่าคุณภาพของพื้นผิวของ Dies และ Punches น่าจะได้รับการปกป้องในกระบวนการขึ้นรูปเพื่อที่จะทำผิวส่วนคอและส่วนหัวในผลิตภัณฑ์ในกระบวนการสุดท้าย รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงตะขอทองเหลืองสุดท้ายหลังจากขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง 100,000 ครั้ง ตะขอทองเหลืองที่มีคุณภาพสูงแบบนี้เป็นหลักฐานว่าแม่พิมพ์ Duplex Die และ Punch มีความอดทนทางวิศวกรรมที่เพียงพอภายใต้สภาพการหล่อลื่นในการปฏิบัติ

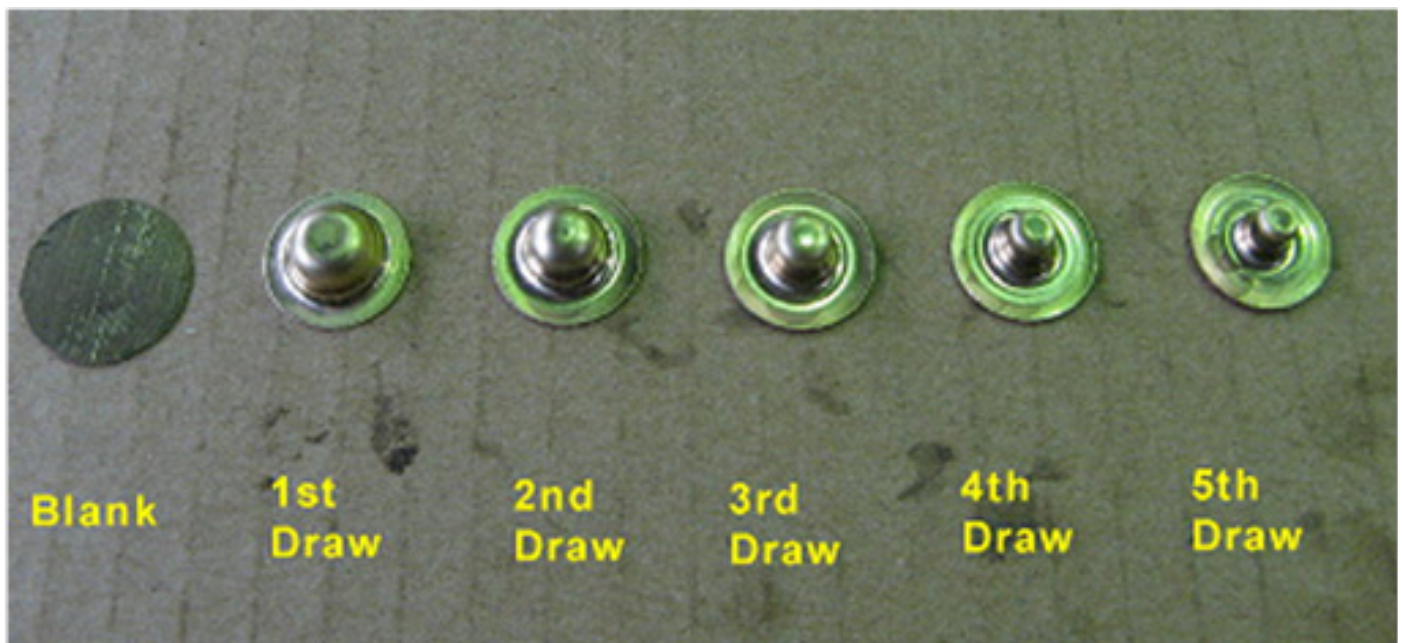


Fig. 11. Variation of brass-hook shapes through the transfer stamping at N = 600.



Fig. 12. A final shape of brass-hook after continuously transfer stamping up to N = 100,000.

DISCUSSIONS

Hardness profile design in the duplex coating

Significant difference in the tribological performance with and without prehardening process reveals that the hardness profile design is needed to accommodate the engineering durability enough to make dry or semi-dry manufacturing. As summarized in Fig. 13, three parameters are controllable to design the hardness depth profile across the treated or modified surface layer: i.e. the hardness of matrix (H_M), the surface hardness of prehardened layer (H_P) and the hardness of coating (H_C). In the present duplex coating, H_M is tunable from 200 Hv for normally grained SKD11 to 600 Hv for fine grained SKD11 to be stated in this section. H_P is also controllable from 800 Hv to 2000 Hv by increasing the volume fraction of precipitate nitrides, refining the precipitate nitride size or by increasing the concentration of solid solution nitrogen atoms in the matrix. In the nano-lamination, H_C is varied from 2000 Hv to 5000 Hv by reduction of bi-layer thickness and by increasing the sublayer ratio. The applied stress distribution is determined by severity of metal forming steps and strength of work materials. For each application, the duplexed coating must be optimized in order that the applied stress distribution should be sufficiently lower than its hardness depth profile.

DISCUSSIONS

Hardness profile design in the duplex coating

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการปฏิบัติงาน Tribology ที่มีและไม่มี Prehardening เผยให้เห็นว่าขั้นตอนการออกแบบรายละเอียดความแข็งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับความทนทานวิศวกรรมพอที่จะทำให้การผลิตแห้งหรือกึ่งแห้ง ดังที่สรุปไว้ในรูป 13 สามพารามิเตอร์สามารถควบคุมการออกแบบรายละเอียดเชิงลึกความแข็งทั่วชั้นผิวได้รับการรักษาหรือการปรับเปลี่ยน: คือความแข็งของเมทริกซ์ (H_M) ที่แข็งผิวของชั้นที่ชุบแข็งแล้ว (H_P) และความแข็งของสารเคลือบผิว (H_C) ในการเคลือบเพล็กซ์ในปัจจุบันคือ H_M นั้นสามารถปรับจาก 200 Hv สำหรับเม็ดเล็กละเอียดปกติ SKD11 เป็น 600 Hv สำหรับ SKD11 ที่จะระบุไว้ใน Section นี้ นอกจากนี้ H_P ยังสามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 800 Hv ถึง 2000 Hv โดยการเพิ่มส่วนปริมาณของไนโตรเจนก่อนการปรับแต่งขนาดไนโตรดัดตะกอน หรือโดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายของแข็งอะตอมไนโตรเจนในเมทริกซ์ ในนาโนเคลือบ H_C จะแตกต่างกันจาก 2000 Hv ถึง 5000 Hv จากการลดลงของความหนาของ Bilayer และโดยการเพิ่มอัตราส่วน Sublayer การกระจายความเครียดนำไปใช้จะถูกกำหนดโดยความรุนแรงของขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะและความแข็งแรงของวัสดุที่ทำงาน สำหรับการใช้งานในแต่ละเคลือบ Duplexed จะต้องปรับเพื่อให้การกระจายความเครียดนำมาใช้ควรจะเป็นพอที่ต่ำกว่ารายละเอียดเชิงลึกของความแข็ง

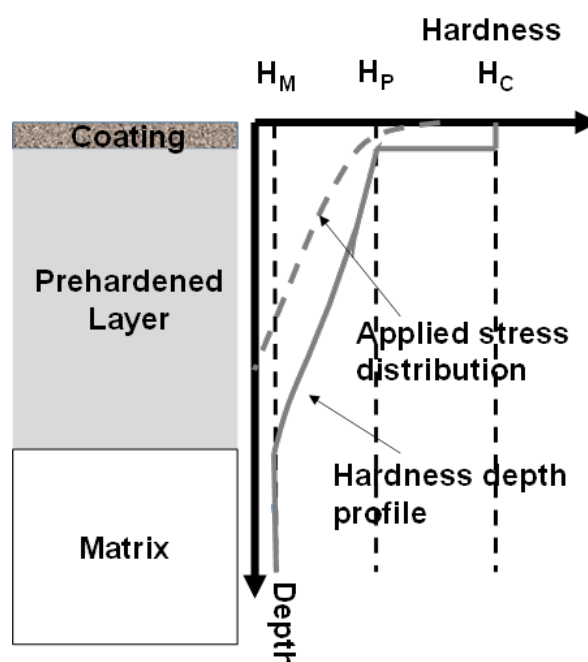


Fig. 13. Hardness profile design in the duplex coating.



Crystal size effect on the hardness of nitrided SKD11

In the tool-life design of prehardened SKD11 or Fe-Cr steel tools, the strength of mother substrate is an important factor. After the hole-petch relation between the strength and the crystalline size of steels [1], the strength of mother substrates is improved by reduction of crystalline size. The mechanically alloyed Fe-12Cr steels are employed to simulate the fine-grained SKD11 substrate; i.e. the average grain size is reduced to 0.1 μm after sintering. Figure 14 depicts the increase of surface hardness before nitriding and after nitriding for 7.2 ks, 14.4 ks and 28.8 ks. The original SKD11 matrix hardness is enhanced by this grain size reduction from 200 Hv in Fig. 8 to 600 Hv in Fig. 14. Using the difference of hardness (ΔH) before and after nitriding for 14.4ks, the grain size reduction effect on the nitriding is considered; i.e. $\Delta H = 870$ Hv for the normal SKD11, and, $\Delta H = 850$ Hv for the fine SKD11. There is a little change between two SKD11 substrates.

This comparison of the surface hardness between two SKD11 substrates reveals that the SKD11 matrix hardness is increased by grain size reduction but that the prehardening process by plasma nitriding is insensitive to the grains sizes. As indicated in Fig. 14, the hardness of fine-grained SKD11, nitrided for 28.8 ks, is retarded to be 1500 Hv; further experimental validation is scheduled in future.

Crystal size effect on the hardness of nitrided SKD11

ในการออกแบบอายุการใช้งานแม่พิมพ์ชุบแข็งแล้ว SKD11 หรือ แม่พิมพ์ Fe-Cr ความแข็งแรงของพื้นผิวแม่เป็นปัจจัยสำคัญ หลังจากที่มีความสัมพันธ์ Hole-Petch ระหว่างความแข็งแรงและขนาดผลึกของเหล็ก [1] ความแข็งแรงของพื้นผิวจะดีขึ้นโดยการลดลงของขนาดผลึกเหล็ก Alloyed Fe-12Cr ที่ใช้ในการจำลองพื้นผิว SKD11 ละเอียด อาทิเช่น ขนาดของเกรนเฉลี่ยจะลดลงถึง 0.1 μm หลังจากการเผา รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความแข็งพื้นผิวก่อนและหลังไนไตรด์ไนไตรต์ 7.2 สำหรับ ks 14.4 ks และ 28.8 ks เมทริกซ์ SKD11 เดิมแข็งจะเพิ่มขึ้นโดยการลดขนาดของเกรนจาก 200 Hv ในรูป 8-600 Hv ในรูป 14 การใช้ความแตกต่างของความแข็ง (ΔH) ก่อนและหลังไนไตรด์สำหรับ 14.4 ks ผลการลดขนาดของเกรนบนไนไตรด์ที่มีการพิจารณา เช่น $\Delta H = 870$ Hv สำหรับ SKD11 ปกติและ $\Delta H = 850$ Hv สำหรับ SKD11 ดี มีการเปลี่ยนแปลงเล็ก ๆ น้อย ๆ ระหว่างสอง SKD11 พื้นผิว

การเปรียบเทียบความแข็งแรงผิวระหว่างสองSKD11 พื้นผิวนี้แสดงให้เห็นว่ามีความแข็ง SKD11 เมทริกซ์จะเพิ่มขึ้นจากการลดขนาดของเกรน แต่ที่กระบวนการ Prehardening โดยไนไตรด์พลาสมานั้นไม่ตอบสนองต่อขนาดเกรน ตามที่ระบุไว้ในรูป 14 ความแข็งของ SKD11 ละเอียด ไนไตรต์สำหรับ 28.8 ks เป็นไปได้ที่จะเป็น 1500 Hv ซึ่งจะต้องดำเนินการทดสอบต่อไปในอนาคต

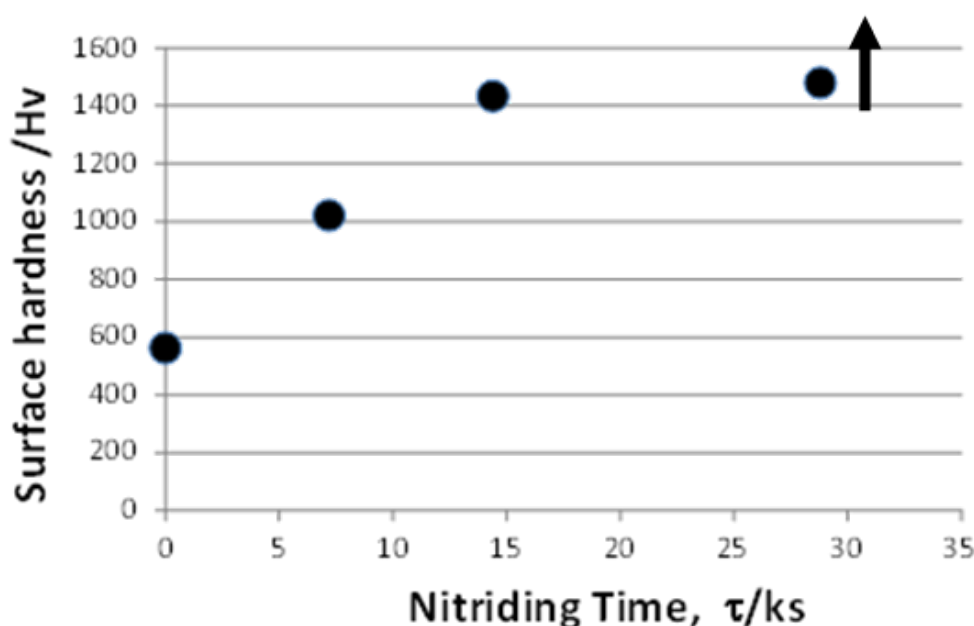


Fig. 14. Variation of the surface hardness with the plasma nitriding time.

Green manufacturing index

Use of the duplex-coated tools and dies enables us to change the practical operation in stamping from the oil-dirt processing to green manufacturing. Figure 15 compares the transfer-stamping stage before and after use of the duplex coated tools and dies. This significant improvement of circumstance in practical stamping operations proves that the semi-dry metal forming with use of the duplex-coated tools and dies should be responsible for the green manufacturing.

Let us count the savings in usage of lubricating oils and in tooling life cost as a green manufacturing index. Table 1 compares the used lubricating oil consumption as well as the number of continuous transfer-stamping shots before and after employing the duplexed tools. The amount of lubricating oils necessary for nearly same stamping operation is much reduced from 30 litter to 0.33 litter. In addition, only high viscosity oils were available for lubrication in the previous stamping even with use of the WC (Co) dies and tools. On the other hand, the duplexed dies and punches work under the sparse supply of low viscosity oils.

Green manufacturing index

การใช้เพล็กซ์เคลือบแม่พิมพ์จะช่วยให้เราสามารถเปลี่ยนการดำเนินการปฏิบัติในการ Stamping จากกระบวนการที่เปื้อนไปด้วยน้ำมันมาเป็น Green Manufacturing รูปที่ 15 เปรียบเทียบขั้นตอนการถ่ายโอนปั๊มก่อนและหลังการใช้เพล็กซ์เคลือบแม่พิมพ์ โดยจะสังเกตเห็นการปรับปรุงที่สำคัญของสภาพแวดล้อมในการดำเนินงานปั๊ม ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าการใช้ Duplex-Coated สำหรับแม่พิมพ์ใน Semi-Dry Metal Forming ในจะเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้เกิด Green Manufacturing

ถ้าเรานับการลดการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นและค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ เป็นดัชนี Green Manufacturing ตารางที่ 1 เปรียบเทียบที่ใช้ในการใช้น้ำมัน จำนวน Shot ของแม่พิมพ์ก่อนและหลังการเคลือบด้วย Duplex การใช้ น้ำมันจะลดลงจาก 30 ลิตร มาเป็น 0.33 ลิตร นอกจากนี้ น้ำมันมีความหนืดสูงเท่านั้นสามารถใช้ได้กับการหล่อลื่นในปั๊มก่อนหน้านี้แม้จะมีการใช้งานของแม่พิมพ์ WC (Co) ในทางตรงกันข้ามแม่พิมพ์ และ Punches เคลือบ Duplex สามารถทำงานภายใต้การใช้น้ำมันความหนืดต่ำในปริมาณที่ไม่มาก

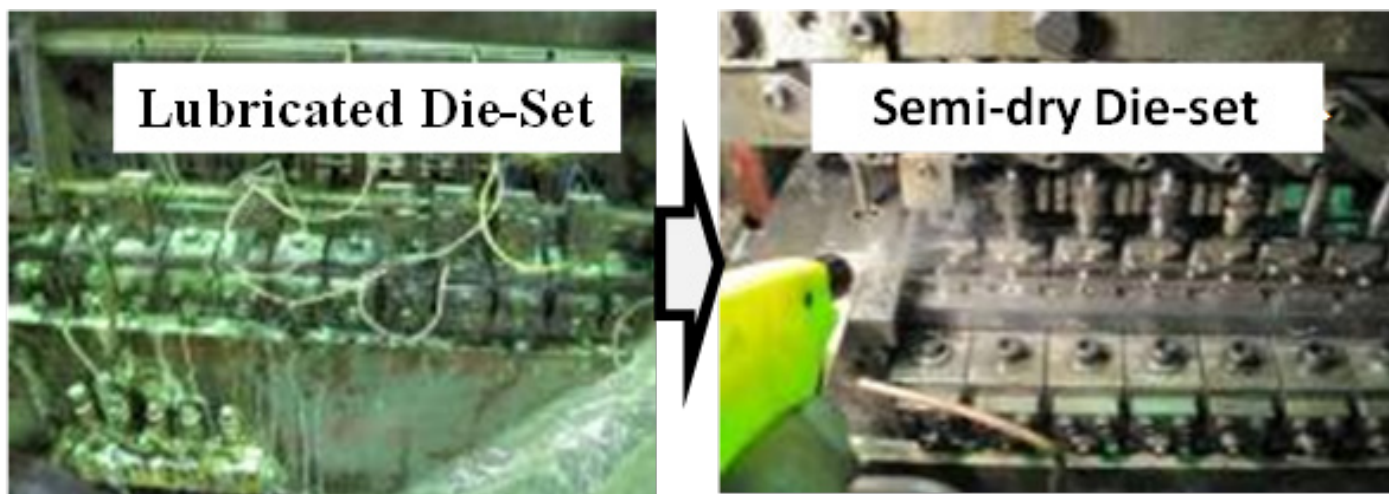


Fig. 15. Change of circumstance around the transfer stamper by use of the duplexed tools and dies.

CONCLUSION

A new duplex coating is proposed to combine the prehardening via the high density plasma nitriding with the nano-laminate DLC-coating for tool-life extension of SKD11 dies and punches in semi-dry stamping. The former process in this duplex coating is characterized by prehardening in high surface hardness and with thick nitrided layer; e.g. the surface hardness reaches to 1070 Hv and the nitrided layer thickness of 40 μm in depth

CONCLUSION

การเคลือบ Duplex ใหม่ที่นำเสนอได้รวม Prehardening ผ่านพลาสมาไนไตรด์ความหนาแน่นสูงกับการเคลือบนาโนลามิเนต DLC สำหรับการขยายอายุการใช้งานแม่พิมพ์และ Punch SKD11 ใน Semi-Dry Stamping กระบวนการการเคลือบแบบแรกมีเอกลักษณ์เฉพาะด้วย Prehardening ในความแข็งผิวสูงและมีไนไตรด์ชั้นหนา เช่น ความแข็งผิวถึง 1070 Hv และความหนาของชั้นไนไตรด์



Table 1. Comparison of transfer stamping processes when using the WC (Co) dies and tools under lubrication and the duplex coated SKD11 dies and tools under semi-dry condition.

Item	Lubricated WC (Co) dies and punches	Semi-dry Duplex-coated SKD11 dies and punches
Number of shots	96,000	100,000
Lubricating oils	High viscosity oil	Low viscosity oil
Oil consumption per day per stamper	30 liters	0.333 liters

even by plasma nitriding for 14.4 ks or four hours at 753 K (or 480 °C). The latter process has preferable features to the duplex coating; toughening against the crack penetration via the nano-lamination, and, surface hardness tuning. The surface hardness is controllable from 30 GPa to 53 GPa by varying the bilayer thickness of nano-laminates and the ratio of higher and lower density DLC sublayers. The ball-on-disc testing reveals that low friction state is preserved for long-distance sliding under high loading condition; e.g. the friction coefficient is kept constant by 0.15 for 540 m by 10 N. The semi-dry transfer stamping is employed as a metal forming simulator to demonstrate that the engineering durability in stamping is preserved even in semi-dry condition by using the duplex-coated dies and punches. The brass sheet is sheared into a blank, deep-drawn in step-by-step and necked to a metallic-shining brass hook. Even after continuously transfer-stamping for 100,000 shots, there is no scratches on the duplex-coated tool surfaces to preserve high surface quality on the finished surface of brass hook. The amount of used lubricating oils is reduced from 30 liters to 0.333 liters by this duplex-coating; emission from stamping operation site is significantly reduced. Furthermore, the tool-life extension by the present method results in less consumption of tooling materials; in particular, tooling cost is much reduced without use of WC (Co).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to Mr. S. Kurozumi, Mr. M. Yoshida and Mr. M. Shimamura (Shimamura Metals, Co. Ltd.) for their help in transfer stamping experiments. This study is financially supported in part by MITI-project.

รต์ 40 μm ในเชิงลึกได้โดยไนไตรด์พลาสมา 14.4 ks หรือสี่ชั่วโมง ที่ 753 K (หรือ 480 °C) กระบวนการเคลือบแบบหลังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าที่จะเคลือบ Duplex ซึ่งมีความทนทานกับการเจาะแตกผ่านนาโนเคลือบและการปรับแต่งพื้นผิวแข็ง ความแข็งผิวสามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 30 GPa ถึง 53 GPa โดยการเปลี่ยนแปลงความหนา Bilayer ของลามีเนตนาโนและอัตราการใช้สูงขึ้นและลด ความหนาแน่น DLC Sublayers การทดสอบ Ball-on-Disc แสดงให้เห็นว่าสถานะแรงเสียดทานต่ำสามารถทนได้สำหรับระยะทางยาวเลื่อนภายใต้เงื่อนไขการโหลดสูง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นจะคงที่อย่างต่อเนื่องที่ 0.15 สำหรับ 540 ม. สำหรับ 10 N Semi-Dry Transfer Stamping ได้นำเสนอเพื่อแสดงให้เห็นว่ามีความทนทานวิศวกรรมโดยการใช้แม่พิมพ์เคลือบ Duplex โดยแผ่นทองเหลืองถูกขึ้นรูปเป็นขั้นตอนแบบคอเพื่อเป็นตะขอ หลังจากการปั๊มอย่างต่อเนื่อง 100,000 ช็อต ไม่มีรอยขีดข่วนบนพื้นผิวแม่พิมพ์ โดยปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้จะลดลงจาก 30 ลิตร เป็น 0.333 ลิตร ซึ่งช่วยลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการ Stamping อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การยืดอายุแม่พิมพ์จากวิธีการนี้ทำให้ลดการสูญเสียของแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าใช้จ่ายในการใช้แม่พิมพ์ที่ไม่ต้องต้องใช้ WC (Co)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Mr. S. Kurozumi Mr. M. Yoshida และ Mr. M. Shimamura (Shimamura Metals, Co., Ltd.) สำหรับความช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบ Stamping การศึกษารั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจาก MITI-Project



REFERENCES

- [1] T. Aizawa, Y. Sugita, High density RF-DC plasma nitriding of steels for die and mold technologies. Res. Rep. Shibaura Institute of Technology. 57-1 (2013) 1-10.
- [2] www.eifeler.com/portfolio-2/duplex-treatment (2015/6/27).
- [3] P. Gruen, PulsePlasma® in Plateg, Broacher of PlaTeg, 2008.
- [4] H.O. Pierson, Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes. William Andrew (1993) 337-355.
- [5] M. Zolgharni, B.J. Jones, R. Bulpett, A. W. Anson, J. Franks, Energy efficiency improvements in dry drilling with optimized diamond-like carbon coatings. Diamond and Related Materials, 17 (2008) 7-10.
- [6] N. Granito, H. Kuwahara, T. Aizawa, Normal and normal plasma nitriding of Fe-Cr steel alloys. J. Materials Science 37 (2002) 835-844.
- [7] T. Aizawa, Y. Sugita, High density plasma nitriding of tool and die steels. Prof. 6th SEATUC Conference (2012, Bangkok) CD-ROM.
- [8] T. Aizawa, T. Fukuda, K. Itoh, Duplex coating of AISI-316 and 420 dies for hot mold-stamping. International Steel Research (2012).
- [9] D. Santojojo, T. Aizawa, S. Muraishi, H. Morita, Micro-texturing of stainless steels via high density plasma nitriding. Proc. 9th ICOMM. (2014) 90/1 — 90/7.
- [10] T. Aizawa, Y. Sugita, Distributed plasma nitriding systems for surface treatment of miniature functional products. Proc. 10th 4M/ICOMM (2015) 113/1 — 113/8.
- [11] T. Aizawa, K. Itoh, E. Iwamura, 'Nano-laminated DLC coating for dry micro-stamping', Steel Research International, 81 (9) (2010).
- [12] T. Aizawa, H. Morita, 'Tooling life design for dry metal forming via nano-laminated DLC coating', Proc. 5th SEATUC Conference (2011, February, Hanoi) .
- [13] K. Dohda, T. Aizawa, Tribo-characterization of silicon doped and nano-structured DLC coatings by metal forming simulators. Manufacturing Letters 2 (2014) 82-85.
- [14] T. Aizawa: Advanced fracture mechanics design of diamond-like carbon coating against delamination behavior. Chapter 10. Recent Trends in Fracture Mechanics. (2011) NOVA Publishers.
- [15] T. Aizawa, H. Morita, Japan Patent by PCT with PCT/JP2012/005957 (2012).





Atomic Resolution TEM "JEOL-ARM200F Cold FEG"



Since 1949, the JEOL legacy has been one of outstanding innovation in developing instruments used to advance scientific research and technology. JEOL has 60 years of expertise in the field of electron microscopy, more than 50 years in mass spectrometry and NMR spectrometry, and more than 40 years of e-beam lithography leadership. **JEOL ASIA** and **JEOL ASEAN TECHNICAL CENTER** are willing to support your business, project and research with "Solution for Innovation" .

JEOL ASIA PTE LTD
(SINGAPORE)

2 Corporation Place 01-12 Corporation
Place, Singapore
TEL: +65 6565 9989 FAX: +65 6565 7552
MAIL: jeolasia@singnet.com.sg

**JEOL ASEAN
TECHNICAL CENTER**
(THAILAND)

MTEC building #533 Thailand Science Park
Paholyothin Rd, Klong 1, Klong Luang
Pathumtani, Thailand 12120
TEL: 02-564-7738 FAX: 02-564-7739
MAIL: mizuno@jeolasia.com.sg



Fujilloy Fine Ceramics for Wear Resistance Tools

วัสดุเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy สำหรับการต้านทานการสึกหรอของแม่พิมพ์

Written by Yuichi Fukuda, Dai Suzuki, Kazuhiko Tsuchiya and Koji Hayashi (Fuji Die Co., Ltd.)

Translated by Pramote Koowattanasuchat (Khon Kaen University)

เขียนโดย Yuichi Fukuda, Dai Suzuki, Kazuhiko Tsuchiya and Koji Hayashi (Fuji Die Co., Ltd.)
แปลโดย ปราโมทย์ คุวตบสนุชาติ (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)

INTRODUCTION

Our company Fuji Die Co., Ltd. produces and sells structural fine ceramic materials and wear resistance tools under the brand name “Fujilloy fine ceramics” since 1992. Our company also produces and sells Fujilloy WC-Co hard-metal or cemented carbide tools since 1953, Ti(C,N) base cermet since 1968, diamond and cBN grinding wheels since 1972, Cu-W electrode materials since 1983, super-tough wear-resistant high speed steels (KF2 alloys) since 1984, self-lubricating composite materials (NF metals) since 1992 and heat-resistant tungsten base alloys (brand name: FHR) since 1997. The first and sixth ones among these have been reported in the first issue of TTA E-Magazine [1].

Fujilloy fine ceramics consists of alumina, zirconia, silicon nitride, and silicon carbide. These have each distinguishing mechanical, thermal, and chemical properties. We offer appropriate Fujilloy fine ceramics and tools to our customers.

In this paper, we introduce about the properties of these four kinds of Fujilloy fine ceramics including a brief fabrication principle and their application to wear resistance tools. We hope that these contents will be helpful for our customers to choose them.

PROPERTIES OF FUJILLOY FINE CERAMICS

We provide alumina ceramics with high wear resistance and high electrical resistance (brand name: FCA10), zirconia ceramics with high strength and thermal shock resistance (FCY series, FCZ10), silicon nitride ceramics

บทนำ

บริษัท Fuji Die Co., Ltd เป็นบริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายวัสดุเซรามิกชั้นดีสมัยใหม่และวัสดุแม่พิมพ์ที่คงทนต่อการสึกหรอภายใต้เครื่องหมายการค้า “Fujilloy Fine Ceramics” ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 บริษัทได้จำหน่ายวัสดุโลหะแข็ง WC-Co หรือแม่พิมพ์ซีเมนต์คาร์ไบด์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1953 แม่พิมพ์ Ti(C,N) Base Cermet ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986 แม่พิมพ์วัสดุเพชร และ cBN วงหินขัด ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 วัสดุขั้วไฟฟ้า Cu-W ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1983 เหล็กกล้าความเร็วสูงทนทานต่อการสึกหรอ High Speed Steels (KF2 alloys) ตั้งแต่ ค.ศ. 1984 วัสดุผสมสารหล่อลื่นภายในตัว (NF Metals) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 และวัสดุทังสเตนอัลลอยทนความร้อนสูง (เครื่องหมายการค้า: FHR) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 สำหรับวัสดุลำดับแรกและลำดับที่หกนั้นได้มีการรายงานใน TTA E-Magazine ฉบับแรก [1]

เซรามิกชั้นดีของ Fujilloy ประกอบไปด้วย อลูมินาเซอโรโคเนีย ซิลิคอนไนไตรด์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล ทางความร้อน และทางเคมีของแต่ละอย่างที่แตกต่างกัน โดยทางบริษัทได้นำเสนอเซรามิกเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy และแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับลูกค้า

ในบทความนี้ทางบริษัทได้แนะนำเกี่ยวกับคุณสมบัติทั้งสี่อย่างของเซรามิกเนื้อละเอียดของ Fujilloy รวมถึงข้อดีของหลักการในการผลิตและการใช้งานสำหรับป้องกันการสึกหรอของแม่พิมพ์ ทางบริษัทหวังว่าบทความนี้จะมีประโยชน์สำหรับลูกค้าในการเลือกผลิตภัณฑ์

คุณสมบัติของเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy

ทางบริษัทมีความสามารถในการจัดหาวัสดุอลูมินาเซรามิกซึ่งมีสมบัติในการต้านทานการสึกหรอและการต้านทานไฟฟ้าที่สูง (เครื่องหมายการค้า: FCA10) เซรามิกเซอโรโคเนียที่มีความแข็งแรงสูงและมีสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (FCY series, FCZ 10) เซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่มีความแข็งแรง



with high strength, seizure and thermal shock resistances (FCS60), silicon carbide ceramics with high wear resistance, excellent high-temperature hardness, high-temperature strength and creep resistance (FCC30).

The manufacturing technologies of all these ceramics based on fine powder metallurgy or sintering process which have been developed by our company, taking into consideration the purity of raw powders, phase diagrams of the main components, sintering atmosphere, sintering temperature, heat treatment after sintering, etc. The standard properties of Fujilloy fine ceramics are shown in detail in Table 1, and SEM microstructures are shown in Fig. 1.

แรงสูง มีสมบัติในการต้านทานการยึดติดกันและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน เซรามิกซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งมีสมบัติในการต้านทานการสึกหรอ มีความสามารถในการคงแข็งสูงที่อุณหภูมิสูงยอดเยี่ยม มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูงและความสามารถในการต้านทาน Creep (FCC30)

เทคโนโลยีการผลิตของเซรามิกเหล่านี้ซึ่งมาจากกระบวนการวิธีการอัดผงหรือการเผาขึ้นได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยทางบริษัท เมื่อพิจารณาถึงผงของวัสดุบริสุทธิ์ แผนภาพเฟสของส่วนประกอบหลัก สภาพแวดล้อมของการเผา อุณหภูมิของการเผา การอบชุบหลังจากการเผาและอื่นๆ คุณสมบัติมาตรฐานของเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy นั้นแสดงในตารางที่ 1 และผลจากการส่องกล้อง SEM เพื่อดูโครงสร้างวัสดุในระดับไมโครนั้นแสดงดังรูปที่ 1

Table 1. Standard properties of Fujilloy fine ceramics.

	Alumina	Zirconia (TZP)-alumina composite ceramics		Tetragonal zirconia polycrystal (TZP)	Partially stabilized zirconia (PSZ)	Silicon nitride	Silicon carbide
Brand name	FCA10	FCY40A	FCY20A	FCY0M	FCZ10	FCS60	FCC30
Main components	Al ₂ O ₃	ZrO ₂ -Al ₂ O ₃	ZrO ₂ -Al ₂ O ₃	ZrO ₂ -(Y ₂ O ₃)	ZrO ₂ -(MgO)	Si ₃ N ₄	SiC
Color	light yellow	white	white	white	yellow	gray	black
Specific gravity	3.93	5.00	5.48	6.07	5.72	3.20	3.16
Vickers hardness (98N)	1850	1560	1410	1270	890	1380	2400
Transverse-rupture strength (MPa)	440	1670	1860	880	540	880	500
Compressive strength (MPa)	2060	3630	4120	3730	1370	2630	3980
Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	3.1	5.3	6.2	7.1	12	5.0	3.0
Young's modulus (GPa)	363	294	248	200	180	291	427
Poisson's ratio	0.229	0.279	0.290	0.310	0.330	0.274	0.160
Specific heat (J/kg · K)	1040	610	550	640	460	790	680
Thermal expansion coefficient (MK ⁻¹) RT-800°C	8.1	9.4	10.2	11.3	8.3	2.3	4.1
Thermal conductivity (W/m · K)	30	8.4	5.0	4.6	1.7	15	170
Thermal shock resistance ※ ΔT (°C)	200	475	470	250	250	600	300
Specific electrical resistivity (Ω · cm)	>10 ¹⁵	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹⁴	>3×10 ⁸

※quenched into water after heated



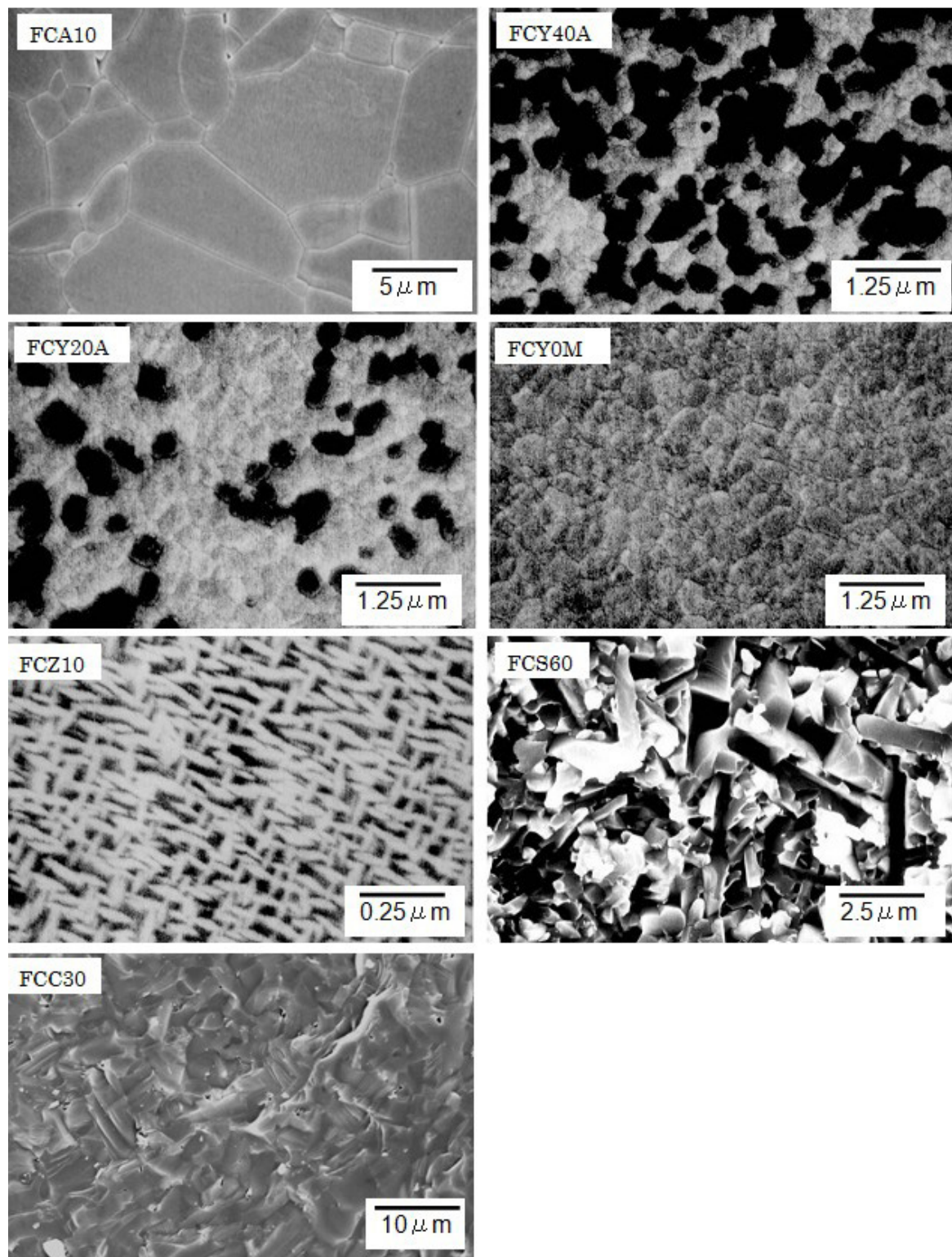


Fig. 1. SEM microstructures of Fujilloy fine ceramics. The first five photographs are microstructures of polished and etched plane. The last two are microstructures of fractured surface.

FCA10: All grains are α - Al_2O_3 (crystal structure: trigonal).

FCY40A, FCY20A: White matrix and black dispersed grains are tetragonal ZrO_2 and α - Al_2O_3 , respectively. The color of α - Al_2O_3 grains are black differing from white in FCA10. This is because the contrast in SEM microstructures is determined by the relativity of the atomic number of the other phase.

FCZ10: White acicular (circular disc plate in 3D) grains and black matrix are tetragonal and cubic ZrO_2 , respectively.

FCY0M: All grains are tetragonal ZrO_2 .

FCS60: All grains including rod-shaped and granular grains are mainly β - Si_3N_4 (hexagonal).

FCC30: Almost all grains are α - SiC (hexagonal).

Oxide-Base Ceramics

All oxide-base ceramics have commonly excellent properties of heat, oxidation, corrosion, wear and seizure resistances, and excellent electric insulation, although poor ductility and low toughness in general compared with metals, due to their chemical composition, crystal structure, and/or atomic bonding. So they are applied to tools to which metal-including and/or metallic materials, i.e., WC-Co cemented carbide and tool-steels are hardly applicable.

(1) FCA10 (alumina ceramics)

FCA10 is composed of almost pure $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (crystal structure: trigonal), and has the highest electric resistance and considerable high hardness among Fujilloy fine ceramics. FCA10 is of the lowest price because of the most cheap raw powder, no resource problem, simple sintering process, and no heat treatment. Thus, FCA10 is preferentially used to any tools, if all kinds of ceramics can be applicable. However, FCA10 has the low fracture strength (TRS), fracture toughness and thermal shock resistance, compared with almost all other ceramics as graphically shown in Fig. 2, 3 and 4, respectively.

(2) FCY40A, FCY20A (zirconia (Y-TZP)- alumina composite ceramics)

FCY40A and FCY20A which are fine-grained composite ceramics of ZrO_2 (FCY0M) and Al_2O_3 (the main component of FCA10. But, the grain size is finer as shown in Fig. 1) have higher strength by about two times than the other Fujilloy fine ceramics, as shown in Fig. 1, and higher compressive strength (Table 1). These high strengths are mainly due to the partial phase transformation of zirconia from tetragonal phase to monoclinic phase (so called “stress-induced transformation toughening mechanism”[2]), and also to the difference in thermal expansion coefficient between ZrO_2 and Al_2O_3 , which causes the generation of compressive stress in dispersed Al_2O_3 grains and tensile stress in ZrO_2 matrix. These fracture toughness (Fig. 3), thermal conductivity (Fig. 4) and hardness (Fig. 6) are medium values between those of FCA10 (Al_2O_3) and FCY0M (ZrO_2), almost obeying “mixture rule” which are reflected by their composition and microstructure.

Oxide-Base Ceramics

สำหรับออกไซด์เซรามิกทั้งหมดนั้นโดยปกติจะมีคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมในเรื่องการป้องกันความร้อน ออกซิเดชัน การกัดกร่อน การสึกหรอ การติดกันของวัสดุ และเป็นฉนวนกันไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยม แม้ว่าเป็นวัสดุมีความยืดหยุ่นที่แย่และความเหนียวต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีโครงสร้างผลึก และพันธะอะตอมของออกไซด์เซรามิก ดังนั้นออกไซด์เซรามิกจึงถูกนำมาใช้กับแม่พิมพ์ที่มีวัสดุซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะหรือวัสดุประเภทโลหะ แต่ WC-Co ซีเมนต์คาร์ไบด์และแม่พิมพ์เหล็กกล้าจะไม่ค่อยได้นำมาใช้

(1) FCA10 (alumina ceramics)

FCA 10 เป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วย $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ บริสุทธิ์ (โครงสร้างผลึก: สามเหลี่ยม) เป็นส่วนใหญ่ และมีความต้านทานต่อไฟฟ้าสูง และที่น่าสนใจคือมีความแข็งที่สุดในบรรดาเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy FCA 10 มีราคาต่ำสุดเพราะว่าใช้วัตถุดิบเป็นแบบผงซึ่งมีราคาถูก ไม่มีปัญหาด้านแหล่งทรัพยากร ใช้กระบวนการเผาแบบง่าย และไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน ดังนั้น FCA 10 ถูกใช้มากในทุกเครื่องมือหรืออุปกรณ์ถ้าเซรามิกทุกชนิดสามารถปรับใช้ได้ อย่างไรก็ตาม FCA 10 มีความแข็งแรงสูงสุดก่อนการแตกหัก (TRS) การแตกแบบเหนียว และความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิแบบฉับพลันต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกชนิดอื่นเช่นภาพที่แสดงในรูปที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

(2) FCY40A, FCY20A (zirconia (Y-TZP)- alumina composite ceramics)

FCY40A และ FCY20A ซึ่งเป็นเซรามิกผสมเกรนละเอียดของ ZrO_2 (FCY0M) และ Al_2O_3 (ส่วนประกอบหลักของ FCA10 แต่ขนาดของเกรนจะละเอียดกว่าดังแสดงดังรูปที่ 1) จะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าโดยประมาณสองเท่าของเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy อื่นๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 1 และมีความแข็งแรงของการอัดมากกว่า (ตารางที่ 1) สำหรับความแข็งแรงของวัสดุเซรามิกนั้นขึ้นกับการเปลี่ยนเฟสบางส่วนของเซอร์โคเนียจาก Tetragonal Phase ไปเป็น Monoclinic Phase (หรือเรียกว่า “Stress-Induced Transformation Toughening Mechanism [2]) และยังขึ้นกับความแตกต่างของค่าการขยายตัวตามอุณหภูมิระหว่าง ZrO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวของความเครียดแบบอัดในการแยกตัวของ Al_2O_3 เกรน และความเครียดจากแรงดึงในเมตริกของ ZrO_2 ซึ่งการแตกแบบเหนียว (รูปที่ 3) การนำพาความร้อน (รูปที่ 4), และความแข็งเป็นค่าตัวกลางระหว่าง FCA10 (Al_2O_3) และ FCY0M (ZrO_2) ซึ่งเก็บจะเชื่อได้ว่า “Mixture Rule” ซึ่งถูกสะท้อนให้เห็นถึงส่วนผสมของวัสดุและโครงสร้างระดับไมโคร

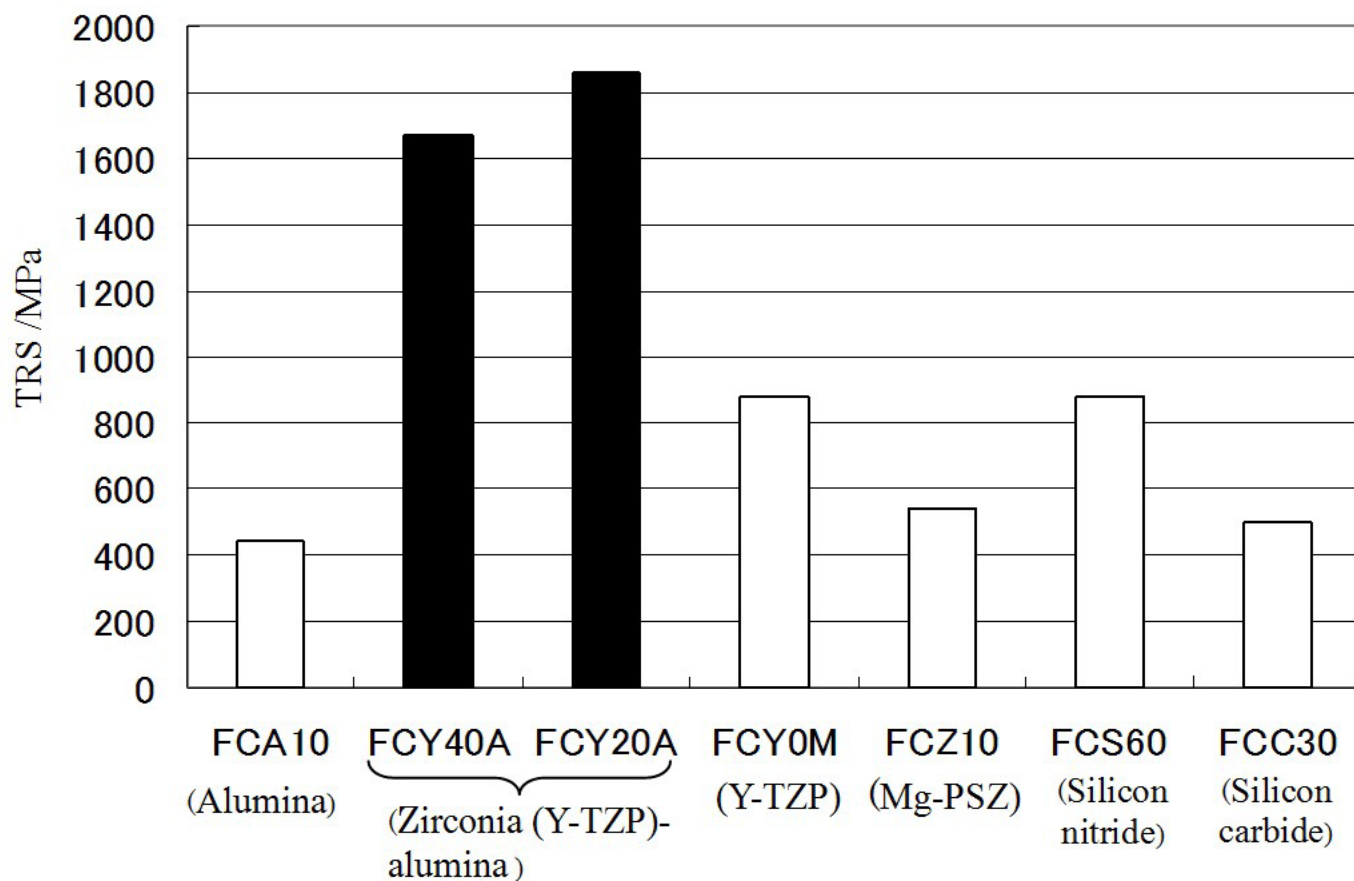


Fig. 2. Transverse-rupture strength (TRS) of Fujilloy fine ceramics.

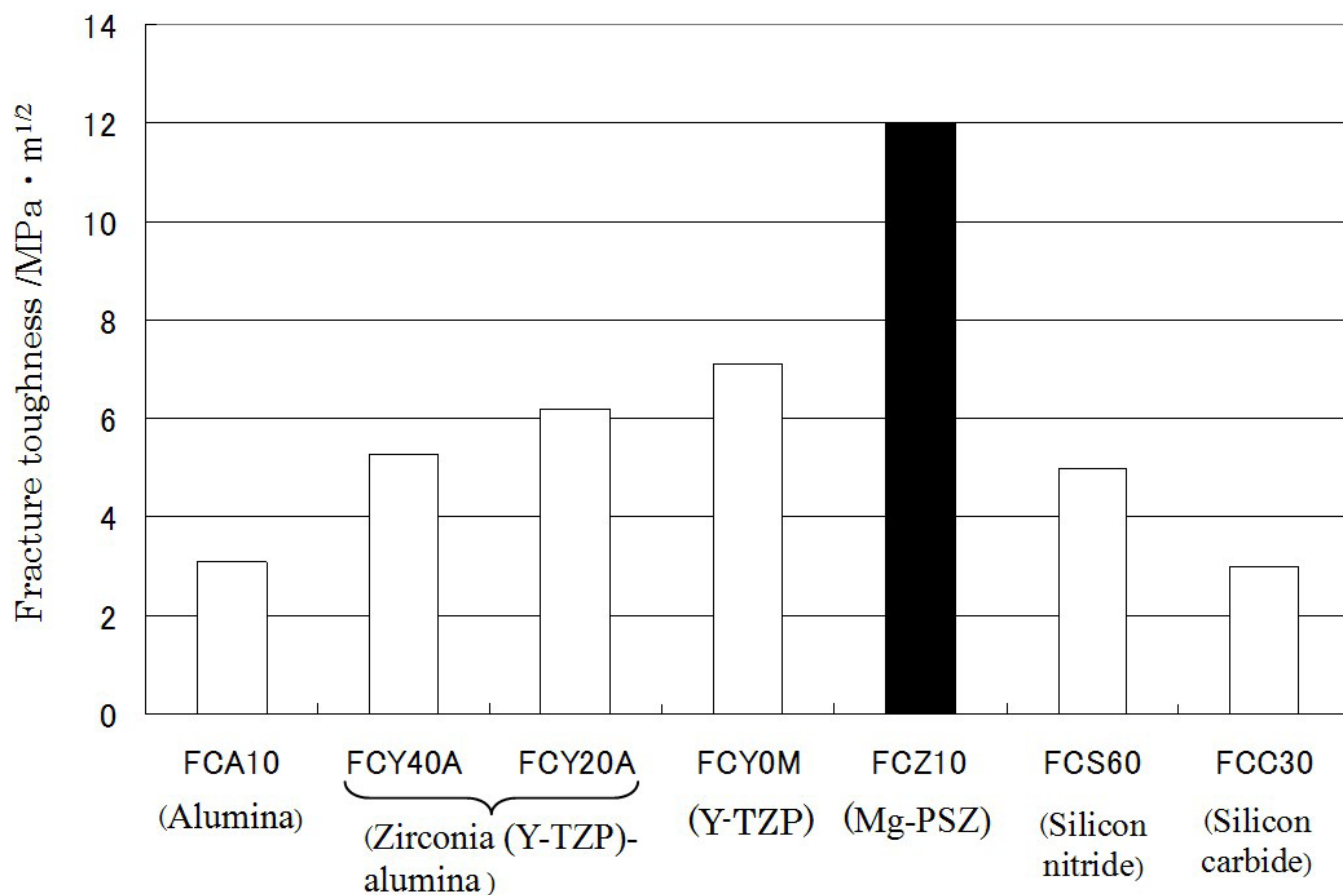


Fig. 3. Fracture toughness of Fujilloy fine ceramics. FCZ10 has the highest fracture toughness, due to a large amount of stress-induced phase transformation from tetragonal phase to monoclinic phase.

(3) FCY0M (yttria tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) ceramics)

FCY0M is the base ceramics for the above FCY40A and FCY20A together with the above Al_2O_3 as explained in the above (2) section. FCY0M has the highest fracture toughness (Fig. 3), the lowest thermal conductivity (Fig. 4), and the lowest Vickers hardness (Fig. 6) among FCA10, FCY40A, FCY20A and FCY0M.

(4) FCZ10 (magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ) ceramics)

FCZ10 is prepared by making best use of the above phase transformation toughening mechanism through adding an appropriate amount of MgO instead of Y_2O_3 in the above FCY series, and also applying an appropriate heat treatment after sintering. Thus, FCZ10 has the highest fracture toughness among ZrO_2 base ceramics as shown in Fig. 3. FCZ10 has also the lowest thermal conductivity among Fujilloy fine ceramics, as shown in Fig. 4.

(3) FCY0M (yttria tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) ceramics)

FCY0M เป็นเซรามิกพื้นฐานสำหรับ FCY40A และ FCY20A ขึ้นไปพร้อมกับ Al_2O_3 ขึ้นไปเช่นเดียวกับที่อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้ (2) FCY0M มีค่าความเหนียวของการแตกหักสูง (รูปที่ 3) มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด (รูปที่ 4) และมีค่าความแข็งวิกเกอร์ต่ำที่สุด (รูปที่ 6) ใน FCA10 FCY40A FCY20A และ FCY0M

(4) FCZ10 (magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ) ceramics)

FCZ10 จัดทำขึ้นโดยการใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟสให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้นจนถึงการเพิ่มปริมาณที่เหมาะสมของ MgO แทนที่ Y_2O_3 ใน FCY series และยังถูกนำไปใช้ในการอบด้วยความร้อนที่เหมาะสมหลังจากการเผา ดังนั้น FCZ10 จึงมีค่าการแตกหักแบบเหนียวสูงสุดในหมู่ ZrO_2 เซรามิกอย่างที่แสดงในรูปที่ 3 FCZ10 มีค่าการนำความร้อนต่ำสุดในหมู่เซรามิกชั้นดีของ Fujilloy ดังแสดงในรูปที่ 4

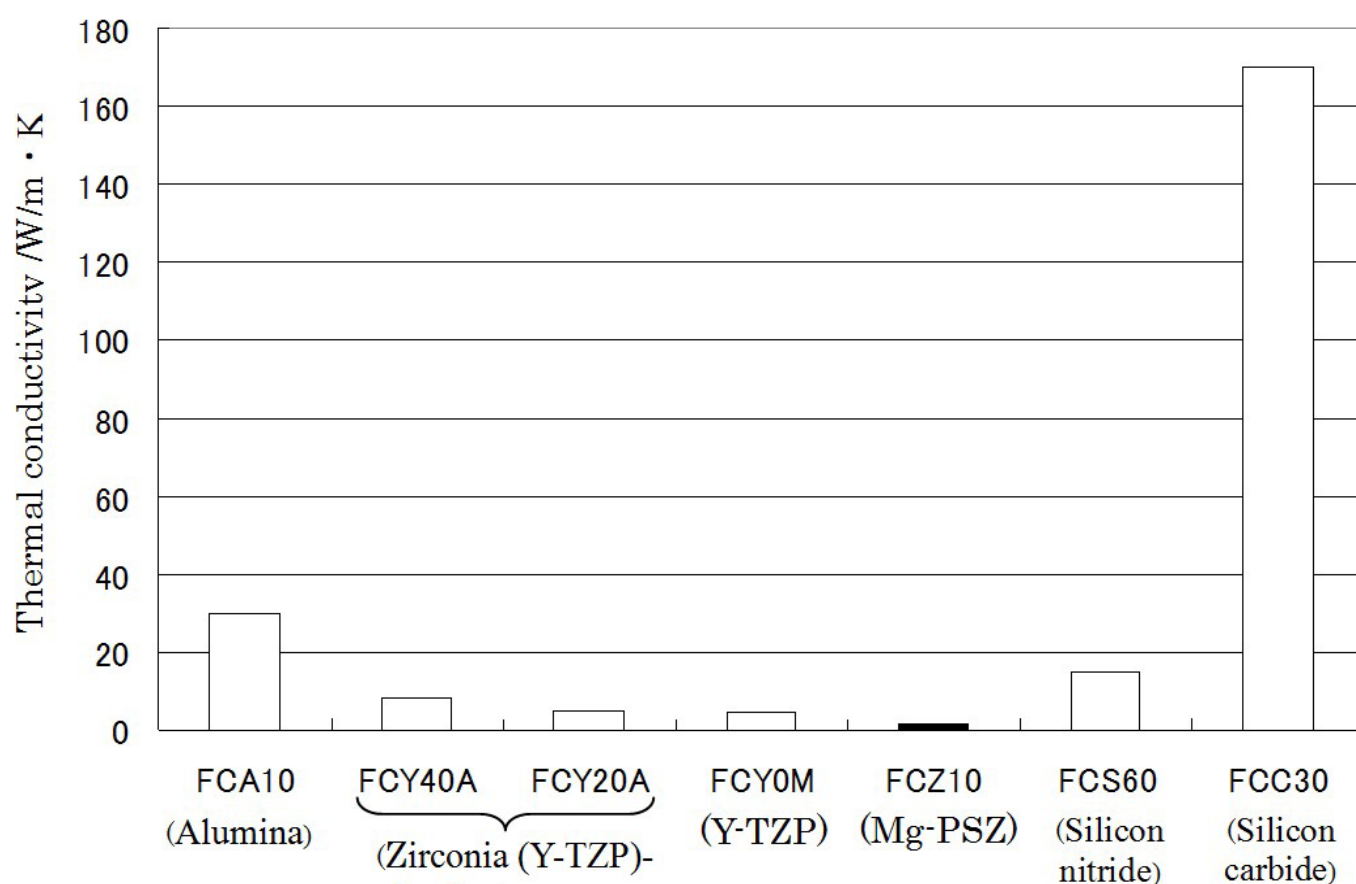


Fig. 4. Thermal conductivity of Fujilloy fine ceramics. FCZ10 has the lowest thermal conductivity.



Non-Oxide-Base Ceramics

(1) FCS60 (silicon nitride ceramics)

Silicon nitride has high hardness, low thermal expansion coefficient, high oxidation resistance, etc. Pure silicon nitride, however, has poor sinterability due to its covalent bonding differing from the oxide base ceramics with ionic bonding, and thus needs appropriate sintering aids forming liquid phase. Furthermore, there are two types of crystal structure α - Si_3N_4 and β - Si_3N_4 , crystal structure of which are both hexagonal. Our company has developed FCS60 by selecting appropriate sintering aids and appropriate Si_3N_4 powder, and also by selecting appropriate sintering condition so that microstructural defects are minimalized and rod shaped β - Si_3N_4 grains greatly develops in the microstructure for aiming whisker-reinforcing mechanism as shown in Fig. 1. These good selections bring about high fracture toughness and also high fracture strength to FCS60. FCS60 has also excellent thermal shock resistance as shown in Fig. 5 and high lubricity.

Non-Oxide-Base Ceramics

(1) FCS60 (silicon nitride ceramics)

ซิลิคอนไนไตรด์จะมีความแข็งที่ค่อนข้างสูง มีค่าการขยายตัวตามอุณหภูมิที่ต่ำ มีค่าการต้านการออกซิเดชันสูง และอื่นๆ อย่างไรก็ตามซิลิคอนไนไตรด์บริสุทธิ์ก็ยังสามารถในการเผาขึ้นเตอร์ (Sinterability) ที่ต่ำ เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ที่แตกต่างจากออกไซด์เซรามิกกับพันธะไอออน ดังนั้นจึงต้องการซินเตอร์ที่เหมาะสมในการช่วยในกระบวนการขึ้นรูปในเฟสของเหลว นอกจากนี้ซิลิคอนไนไตรด์ยังมีโครงสร้างผลึกอยู่ด้วยกันสองแบบคือ α - Si_3N_4 และ β - Si_3N_4 ซึ่งทั้งสองนั้นเป็นโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งทางบริษัทนั้นได้พัฒนา FCS60 โดยเลือกเติมซินเตอร์และผง Si_3N_4 ที่เหมาะสม และยังเลือกสภาพการเผาที่เหมาะสม ดังนั้นการผิดรูปของโครงสร้างระดับไมโครนั้นจะถูกทำให้ให้น้อยที่สุดและรูปร่างแท่งของ β - Si_3N_4 เกรนจะถูกพัฒนาไปอย่างมากในโครงสร้างระดับไมโครเพื่อที่หัวผลของกลไกเส้นใยเสริมแรงตามที่แสดงในรูปที่ 1 การเลือกที่ดีนำมาซึ่งจุดการแตกหักแบบเหนียวที่สูงขึ้นและยังทำให้จุดการแตกหักแบบเปราะที่สูงขึ้นด้วย FCS60 ยังคงมีค่าการต้านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลันสูงซึ่งแสดงในรูปที่ 5 และมีความสามารถในการหล่อลื่นที่สูงอีกด้วย

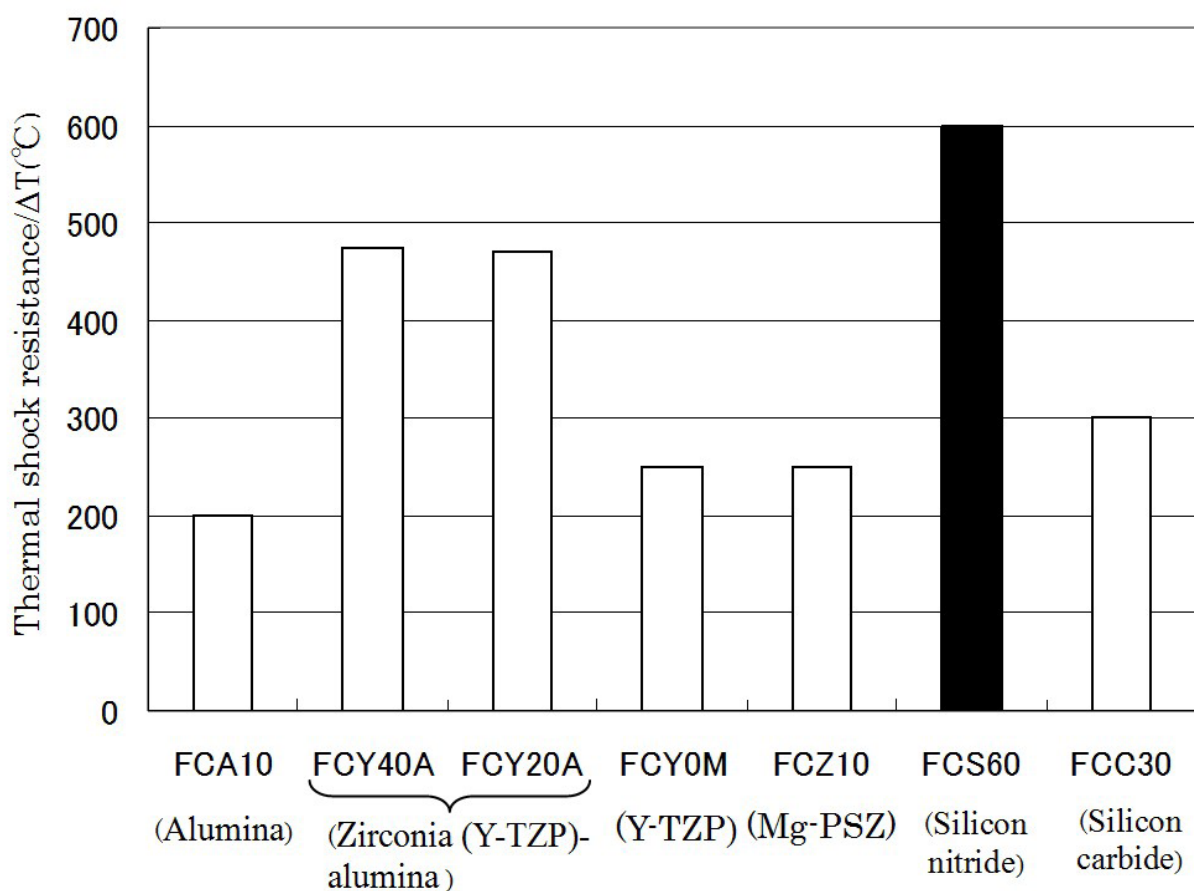


Fig. 5. Thermal shock resistance of Fujilloy fine ceramics. The thermal shock resistance shows the lowest quenching temperature at which the transverse-rupture strength of quenched specimen loses the original strength by quenching the heated specimen into water.



(2) FCC30 (silicon carbide ceramics)

SiC has excellent high hardness, oxidation resistance, high thermal conductivity, etc. SiC powder itself has poor sinterability mainly due to its covalent bonding in the same way as the above Si₃N₄. Our company developed FCC30 by adding appropriate sintering aid and sintering condition. The developed FCC30 has the following characteristics: (1) excellent wear-resistant caused by high hardness at low and high temperatures (Fig. 6), (2) high thermal conductivity (Fig. 5), (3) no deterioration of strength up to high temperature (Fig. 7), (4) excellent sliding properties under a lubrication condition using water, (5) excellent oxidation resistance.

(2) FCC30 (silicon carbide ceramics)

SiC มีค่าความแข็งที่ยอดเยี่ยม การต้านออกซิเดชัน ค่าการนำไฟฟ้า ค่าการนำความร้อนที่สูง และอื่นๆ โดยตัวผง SiC เองมีความสามารถในการเผาไหม้ที่แย่ โดยหลักนั้นเนื่องจากพันธะโควาเลนต์ในทำนองเดียวกันกับ Si₃N₄ ที่ถูกกล่าวก่อนหน้านี้ ทางบริษัทได้พัฒนา FCC30 โดยการเพิ่มขั้นตอนและสภาพการเผาที่เหมาะสม การพัฒนา FCC30 มีลักษณะพฤติกรรมดังต่อไปนี้ (1) มีความสามารถในการต้านทานความสึกกร่อนที่ยอดเยี่ยมซึ่งเกิดจากความแข็งที่สูงที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 6) (2) ค่าการนำความร้อนที่สูง (รูปที่ 4) (3) ไม่มีการเสื่อมความแข็งแรงตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (รูปที่ 7) (4) คุณสมบัติของการลื่นไถลที่ยอดเยี่ยมภายใต้สภาพที่มีน้ำเป็นสารหล่อลื่น และ (5) การต้านการเกิดออกซิเดชัน

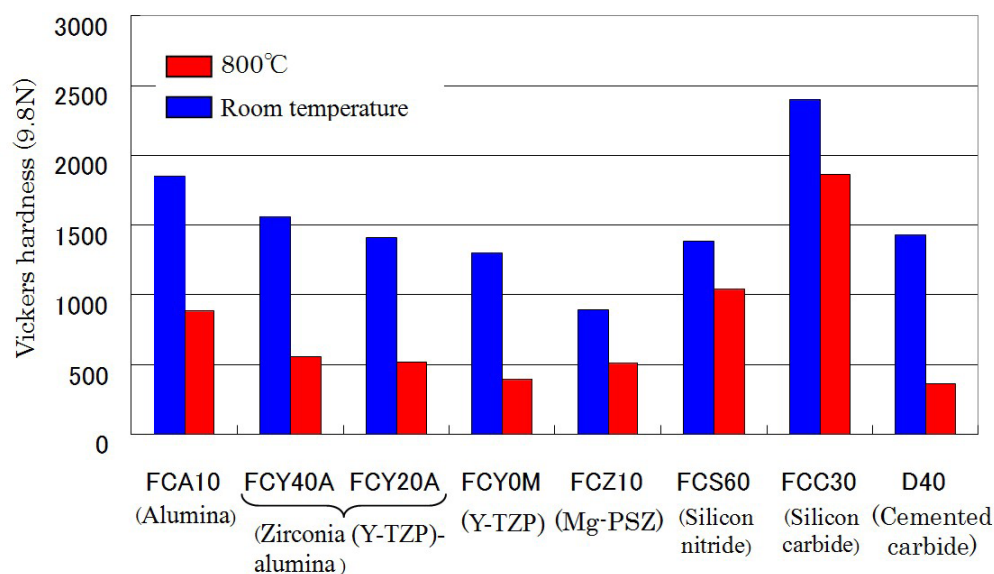


Fig. 6. Vickers hardness of Fujilloy fine ceramics at room temperature and 800 °C. FCC30 has the highest value at 800 °C as well as at room temperature, and the smallest degradation ratio.

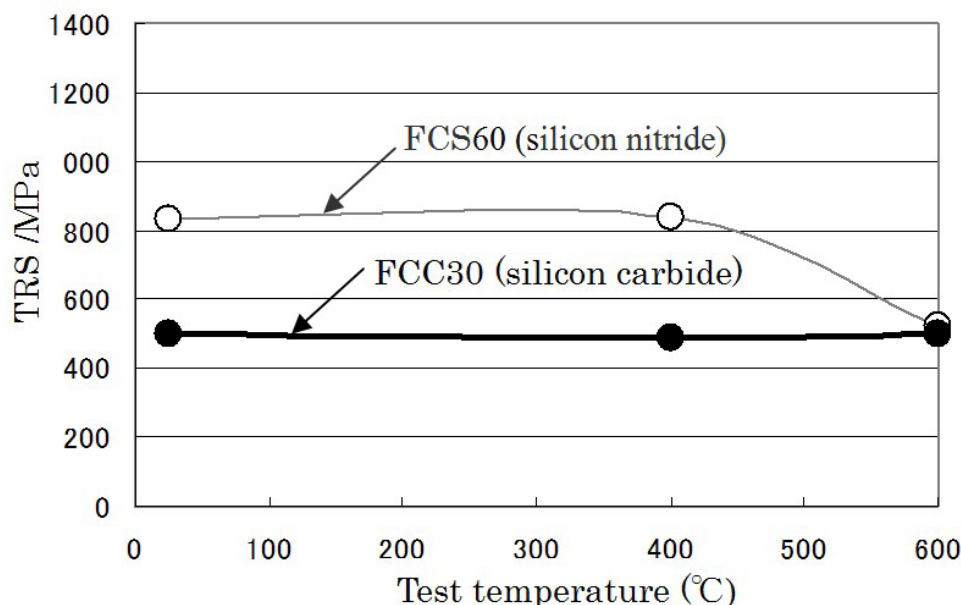


Fig. 7. High-temperature transverse-rupture strength (TRS) of Fujilloy FCS60 and FCC30. TRS of FCS60 decreased above 400 °C, but the TRS of FCC30 does not decrease at least up to 600 °C.

Product and Application Examples

The outer appearance of products and the application examples of Fujilloy fine ceramics to tools are shown in Fig. 8 and Table 2, respectively. These tools with designed shapes are fabricated by die-pressing of powder, grinding, polishing of sintered compact, etc. For drawing dies, the steel rings is generally mounted to the dies so that a large amount of compressive is given to the die.

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์และการนำไปใช้

ลักษณะภายนอกและตัวอย่างการใช้งานเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy สำหรับแม่พิมพ์ต่างๆนั้นถูกแสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 2 ตามลำดับ แม่พิมพ์เหล่านี้รวมกับการออกแบบรูปร่างถูกทำขึ้นโดยการใช้แม่พิมพ์กดอัดผงวัสดุ การบด การขัดของการเผาที่อัดแน่นรวมกัน และอื่นๆ สำหรับแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กโดยปกติจะมีแหวนเหล็กรองเพื่อเป็นตัวส่งต่อแรงอัดที่มากสู่แม่พิมพ์



Fig. 8. Product examples of Fujilloy fine ceramics for wear resistance tools (dies, rolls, pins, etc).

Table 2. General application examples of Fujilloy fine ceramics.

Brand name	Application	Demanded properties
FCA10	electric insulation parts	high electric resistance
	die for chemical material	wear and corrosion resistances
	guard block, guide	wear, corrosion, heat and oxidation resistances lowest price among ceramics for tools
FCY40A FCY20A	die and punch for copper, nib, pinch roll, guide roll, crushing roll, cold extrusion die, die for chemical material, guide	wear, seizure, oxidation and corrosion resistances high strength, high toughness
FCY0M	die and punch for copper, nib, pinch roll, guide roll, crushing roll, cold extrusion die, die for chemical material, guide	wear, seizure, oxidation and corrosion resistances high strength, high toughness lower price than FCY40A and FCY20A
FCZ10	hot extrusion die for copper alloy	heat, thermal shock, wear, seizure, oxidation and corrosion resistances high strength at high temperature
	guide for high temperature	heat, wear, oxidation and corrosion resistances high strength at high temperature
	thermal insulation	heat and oxidation resistances lowest thermal conductivity
FCS60	can-manufacturing tool	wear, seizure and corrosion resistances
	roll for hot rolling, squeeze roll	wear, heat, thermal shock and seizure resistances high strength at high temperature
	spinning roll	wear and seizure resistances
FCC30	mechanical seal	wear and corrosion resistances
	glass lens molding die	corrosion and thermal shock resistances
	tool for high temperature	heat and thermal shock resistances

FCA10 is used as high temperature electric insulating parts which needs high wear resistance and not high fracture strength, utilizing high electric resistance, high hardness, etc.

FCY40A and FCY20A are used as extrusion/drawing die and punch for copper, crushing roll for resin, which need wear, seizure, oxidation and corrosion resistances. Each of FCY40A and FCY20A is recommended, when the life time of tool is determined by wear and cracking, respectively.

FCY0M is used as guide and guide roller for the nonferrous materials which need wear, seizure, oxidation and corrosion resistances.

FCZ10 is used as hot extrusion die for copper alloy and insulation material which need heat, thermal shock, wear, seizure, oxidation, corrosion resistances, etc.

FCS60 is used as wear resistant tools such as hot-rolling, spinning roll, can-manufacturing die which need wear, heat, thermal shock, seizure resistances, etc.

FCC30 is used as sliding component such as mechanical seal, high temperature structural member and glass lens molding die which need corrosion and thermal shock resistances.

Future Market Development for Fujilloy Fine Ceramics

Major market of Fujilloy fine ceramic tools is automobile industry, nearly in the same way as our main product, i.e., cemented carbide tools. Automobile industry is well known to make always a great effort in the reduction of automobile weight as much as possible to increase fuel efficiency.

One method for the weight reduction is the application of low density Al-based alloy to engine parts. The casting molds are mainly made of heat resistant steels. However, the life time of the mold is not so long, even if the mold surface is coated with excellent CVD film. This is because the film tends to be peeled off. Then, our company have provided tungsten based alloy (brand name: FHR 96). The life time of FHR mold is longer by about 5 times than that of the present heat resistant steel mold. However, there are some problems such as Al-attacked corrosion and oxidation deteriorations.

Then, we focused on excellent properties of FCS60 such as high corrosion, heat and ther-

FCA10 จะถูกใช้สำหรับชิ้นส่วนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงซึ่งต้องการความต้านทานการสึกหรอสูงและความแข็งแรงของการแตกหักที่ไม่สูงมาก การใช้งานในการต้านทานไฟฟ้าที่สูง ความแข็งแรงสูง และอื่นๆ

FCY40A และ FCY20A ถูกใช้สำหรับแม่พิมพ์และชุดพUNCH ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป กระบวนการลากขึ้นรูปสำหรับทองแดง ลูกกลิ้งบดอัดสำหรับเรซิน และอื่นๆ ซึ่งต้องการการป้องกันการสึกหรอ การยึดติด ออกซิเดชันและการกัดกร่อน จะแนะนำให้ใช้หนึ่งใน FCY40A และ FCY20A เมื่ออายุของอุปกรณ์ถูกคำนวณและกำหนดด้วยความสึกหรอและรอยแตกที่เกิดขึ้นตามลำดับ

FCY0M ถูกใช้เป็นตัวไกด์และตัวไกด์ลูกกลิ้งสำหรับกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็กที่ต้องการการป้องกันการสึกหรอ การยึดติด ออกซิเดชัน และการกัดกร่อน

FCZ10 ถูกใช้เป็นแม่พิมพ์ของกระบวนการเอกซ์ทรูดที่อุณหภูมิสูงสำหรับอัลลอยทองแดงและวัสดุที่เป็นฉนวนซึ่งต้องการการป้องกันจากความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน การยึดติด ออกซิเดชัน การกัดกร่อน และอื่นๆ

FCS60 ถูกใช้เป็นตัวต้านทานความสึกหรอในเครื่องมือต่างๆ เช่น ลูกโรลลิงแบบร้อน ลูกโรลแบบเย็น และแม่พิมพ์ขึ้นรูปกระป๋อง ซึ่งต้องการการป้องกันการสึกหรอ การยึดติด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ความร้อน และการกัดกร่อน

FCC30 ถูกใช้สำหรับชิ้นส่วนที่มีการเสียดสีอย่างเช่น Mechanical Seal ชิ้นส่วนในโครงสร้างที่ใช้ในอุณหภูมิสูงและเลนส์แก้วขึ้นรูปแม่พิมพ์ซึ่งต้องการการป้องกันจากการกัดกร่อน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

การพัฒนาตลาดในอนาคตของเซรามิกขั้นดีของ Fujilloy

ตลาดหลักของอุปกรณ์เครื่องมือเซรามิกขั้นดีของ Fujilloy จะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งจะเป็นไปในทำนองเดียวกับผลิตภัณฑ์หลัก อุปกรณ์เครื่องมือเซรามิกคาร์ไบด์ อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นที่รู้กันดีในความต้องการที่จะลดน้ำหนักของรถยนต์ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิง

หนึ่งกระบวนการสำหรับการลดน้ำหนักยานยนต์เป็นการใช้คุณสมบัติของความหนาแน่นที่ต่ำของอลูมิเนียมอัลลอยในชิ้นส่วนเครื่องยนต์ โมลสำหรับการหล่อโดยหลักๆแล้วจะทำจากเหล็กทนความร้อน อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของโมลนั้นก็ยังไม่นิยามมาก ถึงแม้ผิวของโมลจะถูกเคลือบด้วย CVD ฟิล์มที่ดีมากแล้วก็ตาม ซึ่งเป็นเพราะว่าฟิล์มมีแนวโน้มที่จะลอกออก จากนั้นทางบริษัทได้ผลิตโลหะผสมทังสเตนอัลลอย (สัญญาลักษณะการค้า: FHR 96) อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ FHR นั้นจะยาวกว่าประมาณ 5 เท่าของแม่พิมพ์ที่เป็นเหล็กทนความร้อนที่เดิกล่วงมาก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาอย่างเช่นการกัดกร่อนของ อลูมิเนียม (Al-Attacked Corrosion) และออกซิเดชันที่ทำให้วัสดุเสื่อมโทรม

จากนั้นทางบริษัทได้มุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติของ FCS60 อย่างเช่นคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันจนถึงอลูมิเนียมอัลลอยเหลวได้



Table 3. Dipping test condition.

Molten Alloy	Al alloy (AC2B. i.e., Al-2~4mass%Cu -5~7mass%Si alloy)
Dipping temperature	660 °C
Heating time	72 hr
Dipping atmosphere	Air

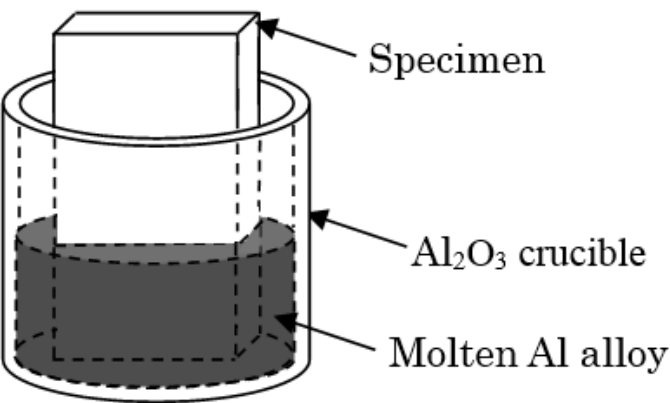
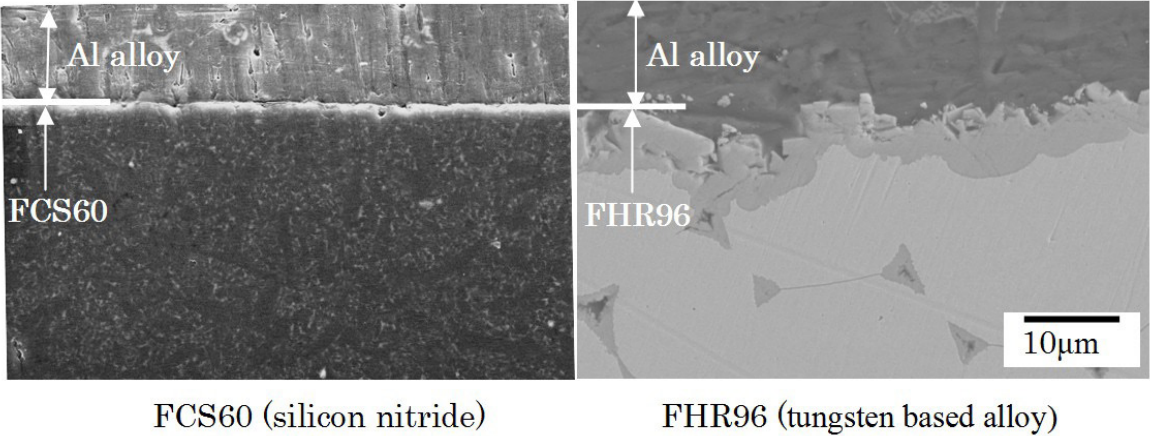


Fig. 9. Schematic of dipping test.



FCS60 (silicon nitride)

FHR96 (tungsten based alloy)

Fig. 10. An example of SEM microstructures of the interface of FCS60 and FHR96 with the stuck Al alloy after dipping test in molten Al alloy AC2B. The white area of FCS60 is due to the inclination of FCS60 surface caused by preferential polishing of soft Al alloy.

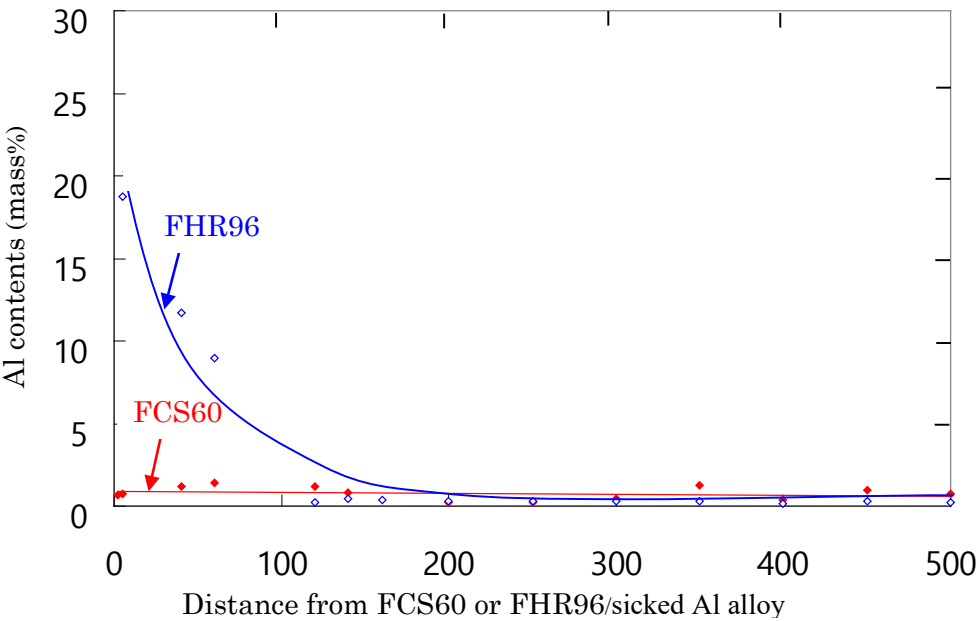


Fig. 11. Al contents in FCS60 and FHR96 which were dipped in molten Al alloy at 660 °C for 3 days. Al diffused in FHR96 by about 100 µm. On the other hand, FCS60 hardly reacted the molten Al alloy.

mal shock resistances. Corrosion resistance to molten Al alloy was investigated by using a method illustrated in Fig. 9 under a condition shown in Table 3. SEM microstructures of cross section after dipping test are shown in Fig. 10. Al content in FCS60 and FHR96 measured with EDX are shown as a function of the distance from the reaction interface in Fig. 11. Figs. 10 and 11 show that the reaction phase layer thickness was about 100 μm in FHR96, but almost 0 μm in FCS60. This suggests that FCS60 mold is expected to have a longer tool life compared with FHR96 mold.

SUMMARY

In this paper, we introduced mainly the material properties and application of Fujilloy fine ceramics to wear resistance tools. We want to push forward a farther development of Fujilloy fine ceramics in accord with the needs of various customers.

For more information of the use of Fujilloy fine ceramics and their application to your tools, please contact us today.

REFERENCES

- [1] Dai Suzuki, Jun-ichi Yuki and Koji Hayashi: "Fuji Die Tribological Approach to Low Friction Materials", TTA E-Magazine, (2015) 51-62.
- [2] The Ceramic Society of Japan: "Handbook of ceramics engineering", Gihodoshuppan Co., Ltd., (1989) 1145-1155.

ถูกตรวจสอบโดยใช้วิธีการแสดงในภาพที่ 9 ภายใต้สภาวะที่แสดงในตารางที่ 3 SEM โครงสร้างระดับไมโครของภาพตัดขวางหลังจากการทดสอบชุบโลหะถูกแสดงในรูปที่ 10 อลูมิเนียมที่อยู่ใน FCS60 และ FHR96 วัดด้วย EDX ถูกแสดงตามฟังก์ชันของระยะห่างจากผิวที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมติดในรูปที่ 11 รูปที่ 10 และรูป 11 ซึ่งแสดงปฏิกิริยาระหว่างชั้นของเฟสที่ความหนาประมาณ 100 μm ใน FHR96 แต่ใกล้เคียงกับที่ 0 μm ใน FCS60 ซึ่งได้แนะนำแม่พิมพ์ FCS60 ซึ่งคาดว่าจะมีอายุการใช้งานของอุปกรณ์ยาวกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ FHR96

บทสรุป

ในบทความนี้ได้มีการนำเสนอคุณสมบัติของวัสดุหลักๆและการใช้งานของเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy ถึงการด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ ทางบริษัทต้องการผลักดันการพัฒนาเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy ให้ก้าวไกลยิ่งขึ้นตามความต้องการของลูกค้า

สำหรับข้อมูลเพิ่มเติมของเซรามิกชั้นดีของ Fujilloy และการใช้งานของวัสดุเหล่านี้สำหรับงานของคุณนั้นกรุณาติดต่อเราวันนี้





Western Digital®

Every device. One drive. **No wires.**   **My Passport® Wireless**
Wi-Fi® Mobile Storage



WD, a Western Digital company, is a long-time innovator and storage industry leader. As a storage technology pacesetter, the company produces reliable, high-performance hard disk drives and solid state drives. These drives are deployed by OEMs and integrators in desktop and mobile computers, enterprise computing systems, embedded systems and consumer electronics applications, as well as by the company in providing its own storage products. WD's leading storage devices and systems, networking products, media players and software solutions empower people around the world to easily save, store, protect, share and experience their content on multiple devices.

Western Digital (Thailand) Company Limited

140 Moo 2, BangPa-In Industrial Estate, Klongjig, BangPa-in, Ayutthaya 13160, Thailand.
Tel: +66-35-278-000 Fax: +66-35-276-050



Western Digital, WD and the WD logo are registered trademarks of Western Digital Technologies, Inc. in the US and other countries; absolutely is a trademark of Western Digital Technologies, Inc. in the U.S. and other countries. Other marks may be mentioned herein that belong to other companies. Product specifications subject to change without notice.
© 2014 Western Digital Technologies, Inc. All rights reserved.



THAI TRIBOLOGY ASSOCIATION (TTA)

Tribocorrosion

การกัดกร่อนในโพรโพลี

Written by Dr. Pitichon Klomchit (National Metal and Materials Technology Center)

เขียนโดย ดร.พิตชน กล่อมจิต (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

WHAT IS CORROSION

“Corrosion is the destructive attack of a material by reaction with its environment.” Stated author of Pierre R. Roberge [1]. The corrosion is one of the most underrated problems in the world of materials because processes are often very slow and microscopic, but when corrosion-induced failure is catastrophic. Figure 1 below shows an airplane fuselage tear open during a flight en-routed to Hawaii in 1988.

การกัดกร่อนคืออะไร

“การกัดกร่อนคือการโจมตีที่ทำให้วัสดุเสียหายโดยการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม” ผู้เขียน ปีแอร์ อาร์ โรแบร์จ ได้กล่าวไว้ [1] การกัดกร่อนเป็นหนึ่งในปัญหาที่ถูกมองข้ามมากที่สุดในโลกของวัสดุ เพราะกระบวนการการกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และขนาดเล็กมาก แต่เมื่อการล้มเหลวของวัสดุที่เกิดจากการกัดกร่อนเกิดขึ้น มักจะเป็นการสูญเสียที่ยิ่งใหญ่ รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการฉีกขาดของลำตัวเครื่องบินขณะที่กำลังบินไปรัฐฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1988



Fig. 1. A fuselage of the aircraft failed due to corrosion induced fatigue (Source: <http://www.thisdayinaviation.com/28-april-1988/>)



Corrosion is an electrochemical process caused by chemical reactions. Electrochemical process involves a transfer of electron. The difference between chemical and electrochemical process is subtle yet important. For example, if you mix NaCl with CaSO₄, you have an equation below



The oxidation state of Na(+1) and Ca(2+) stay unchanged from left to right side of the equation. On the other hand, if you immerse a solid piece of pure Al in water



The oxidation state of Al (+0) on the left side is increased to Al(3+) on the right side of the equation. This shows that the transfer of electron has occurred.

Three components are required for corrosion to occur, that said; corrosion cannot happen if one of the three components is missing. The three are anode, cathode, and electrical path. Anode is a negative terminal where oxidation happens or electrons are released. Cathode is a positive terminal where reduction happens or electrons are consumed. Electrical connection or electrolyte is a path to electron or ion transport to complete the circuit.

Environment in which engineering materials are operated is very crucial because corrosion problem arises from interaction between the material and its environment. For example, a rebar in concrete structure is very corrosion resistant due to the alkalinity of the concrete, which causes formation of a protective passive film. Unfortunately, chloride ions, which are ubiquitous, penetrate into concrete and destroy the protective passive film. Coupled with moisture and oxygen, the rebar tends to corrode and form corrosion product, which undermines structural integrity.

การกัดกร่อนคือ กระบวนการอิเล็กโตรเคมี ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี. กระบวนการทางอิเล็กเคมีเกี่ยวข้องกับการโอนถ่ายอิเล็กตรอน. ความแตกต่างระหว่าง กระบวนการทางเคมี และ อิเล็กโตรเคมี มีน้อยแต่สำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเราผสม NaCl และ CaSO₄ เราจะได้ปฏิกิริยาข้างล่างนี้

จะเห็นว่า ภาวะออกซิเดชันของ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากซ้ายมือถึงขวามือของสมการ ในอีกด้านหนึ่ง ถ้าเราใส่ชิ้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงในน้ำ เราจะได้ปฏิกิริยาข้างล่าง

จะเห็นว่า ภาวะออกซิเดชันของ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากซ้ายมือถึงขวามือของสมการ ในอีกด้านหนึ่ง ถ้าเราใส่ชิ้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงในน้ำ เราจะได้ปฏิกิริยาข้างล่าง

ภาวะออกซิเดชันของ Al(+0) ด้านซ้ายของสมการเพิ่มขึ้น เป็น Al(3+) ด้านขวาของสมการ นี่แสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนของอิเล็กตรอน

การเกิดการกัดกร่อนต้องมีส่วนประกอบสำคัญสามอย่าง นั่นก็คือ การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าส่วนใดส่วนหนึ่งขาดหายไป สามส่วนที่ขาดคือ แอโนด, แคโทด, และ ทางให้กระแสไฟฟ้าผ่าน. แอโนดคือขั้วลบที่มีการเกิดออกซิเดชันหรือ มีการปล่อยอิเล็กตรอนออก. แคโทดคือขั้วบวกที่มีการเกิดรีดักชัน หรือมีการรับอิเล็กตรอน สิ่งเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กโตรไลต์ที่จะเป็นทางให้อิเล็กตรอนหรือไอออนเคลื่อนที่ได้และทำให้วงจรสมบูรณ์แบบ

สิ่งแวดล้อมที่ล้อมรอบวัสดุที่ใช้งานจริงมีความสำคัญมากเพราะการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุและสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น เหล็กเส้นที่ใช้ในงานคอนกรีต มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เพราะ คอนกรีตมีความเป็นด่างสูง ความเป็นด่างนี้ช่วยให้การเกิดชั้นบางๆที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน แต่ Cl⁻ ไอออนที่มีอยู่ทั่วไป สามารถทะลุผ่านชั้นคอนกรีตเข้าไปได้ และเข้าไปทำลายชั้นบางๆที่ปกป้องการกัดกร่อน ความชื้นและออกซิเจนช่วยให้การกัดกร่อนของเหล็กเส้นเร็วยิ่งขึ้น เมื่อเกิดผลผลิตของการกัดกร่อนจะดันให้คอนกรีตแตกออกได้ตามรูปที่ 2



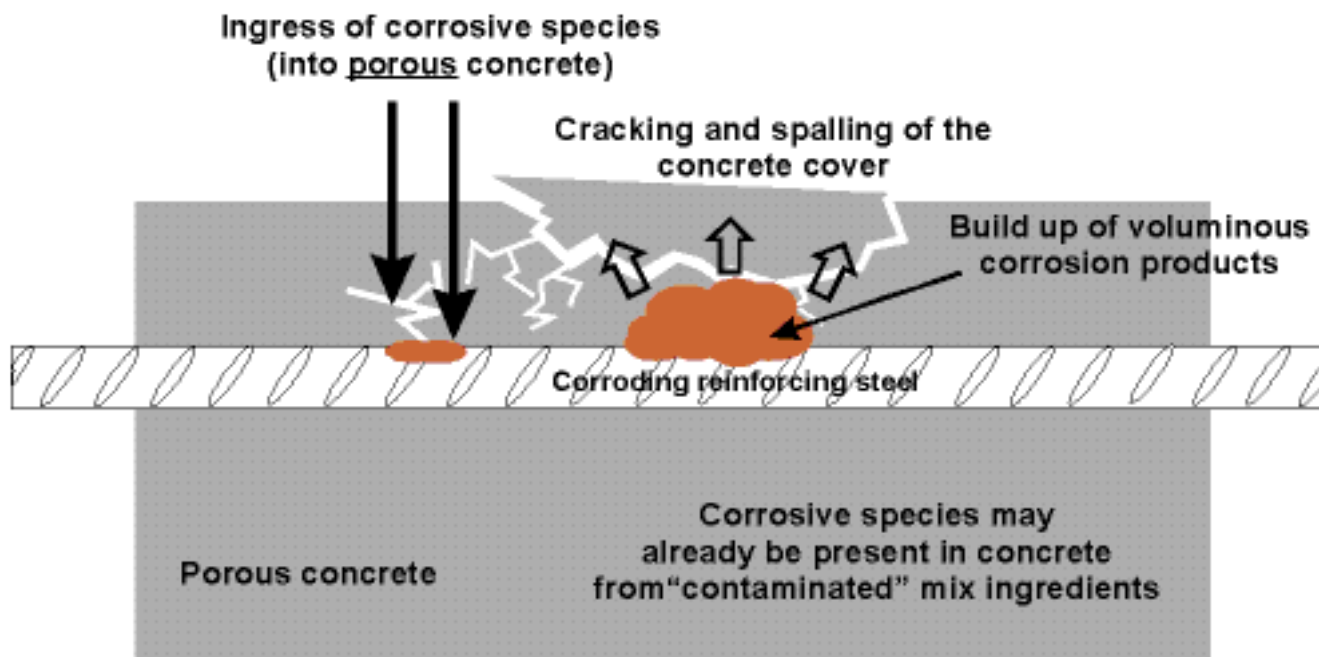


Fig. 2. Concrete rebar corrosion mechanism. (source: <http://www.corrosion-club.com/concret corrosion.htm>)

WHY IS TRIBOCORROSION IMPORTANT

Tribocorrosion is a problem that can be found in many engineering applications ranging from biomedical, transportation, mining, nuclear reactors, valves, and pipelines. Where there are moving parts, tribocorrosion should not be overlooked. Corrosion and wear can work together synergistically to accelerate damage, especially passive metals. Passive film is damaged by continuous mechanical rubbing and it does not allow enough time for passive metal to repassivate, so metals dissolve at much higher rate than when there is no mechanical wear [2].

Tribocorrosion is a complex problem because the duration of contact is short and reactions happen only on the surface. The mechanism is still unknown. Reaction between two materials can alter chemical composition of a medium. For example, tribocorrosion could also occur when a lubricant is needed. The pH of the lubricant can change during operation or the lubricant might contain some aggressive ions that can cause corrosion.

In electronic industry tribocorrosion is often strictly avoided because tribocorrosion can form a surface layer that changes conductivity and reactivity of the surface. However, tribocorrosion can also be beneficial in chemical-mechanical planarization in electronic industry. Tribocorrosion is a complex problem that requires in situ advance surface characteriza-

ทำไมการกัดกร่อนในโทรโบโลยีจึงสำคัญ

การกัดกร่อนในโทรโบโลยีเป็นปัญหาที่สามารถพบเจอได้ในการใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม เช่น ชีวแพทย์, การคมนาคม, การทำเหมืองแร่, เครื่องทำปฏิกิริยานิวเคลียร์, วาล์ว, และท่อส่งน้ำมัน. เมื่อใดก็ตามที่มีส่วนประกอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ การกัดกร่อนในโทรโบโลยีไม่ควรถูกมองข้าม การกัดกร่อนและการสึกหรอทำงานคู่กันอย่างสมคคีทำให้เกิดความเสียหายต่อตัววัสดุอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เหล็กที่มีชั้นบางๆปกป้อง เพราะชั้นบางๆนี้โดนทำลายโดยการเสียดสี และไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ทัน วัสดุจึงเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการที่ไม่มีการสึกหรอด้วย [2]

การกัดกร่อนในโทรโบโลยี เป็นปัญหาที่ซับซ้อน เพราะเวลาในการสัมผัสสั้นและปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุ [3] กลไกการเกิดยังไม่ถูกค้นพบ ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุสองอย่างสัมผัสกันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบของตัวกลาง ยกตัวอย่างเช่น สารหล่อลื่น การกัดกร่อนในโทรโบโลยีสามารถเกิดขึ้นเมื่อสารหล่อลื่นมีความจำเป็น ค่า pH ของสารหล่อลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงระหว่างที่มีการทำงาน หรือสารหล่อลื่นอาจจะมีส่วนผสมของไอออนที่มีการกัดกร่อนสูง และทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่สุด

ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า การกัดกร่อนในโทรโบโลยีจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษ เพราะ การกัดกร่อนจะทำให้เกิดชั้นพื้นผิวที่ความนำไฟฟ้าและการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนก็สามารถทำไปใช้ในทางที่เป็นประโยชน์ได้ เช่น การทำให้พื้นผิวราบเรียบโดยทางเคมีและทางเชิงกล ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า การกัดกร่อนในโทรโบโลยีเป็นปัญหาที่ซับซ้อนที่ต้องการ ความก้าวหน้าในการอธิบายลักษณะของพื้นผิวแบบในแหล่งที่เกิด และ

tion as well as electrochemical analysis in order to fully understand the mechanism of each particular system. As stated above, because corrosion damage is often undetectable by naked eye, corrosion in tribology is often minimized. If tribocorrosion is understood, it can be controlled in a useful way and can help prolong service life of materials.

การวิเคราะห์ทางอิเล็กโตรเคมี เพื่อที่จะสามารถเข้าใจกลไกของระบบต่างๆในการกัดกร่อนนี้ อย่างที่ได้กล่าวมาข้างต้น หลายครั้งที่การกัดกร่อนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การกัดกร่อนในไทโรโบโลยีเลยถูกมองข้าม ถ้าเราเข้าใจการกัดกร่อนในไทโรโบโลยี เราจะสามารถควบคุมปรากฏการณ์นี้ให้เกิดประโยชน์ได้ และทำให้อายุการใช้งานของวัสดุยาวนานขึ้น

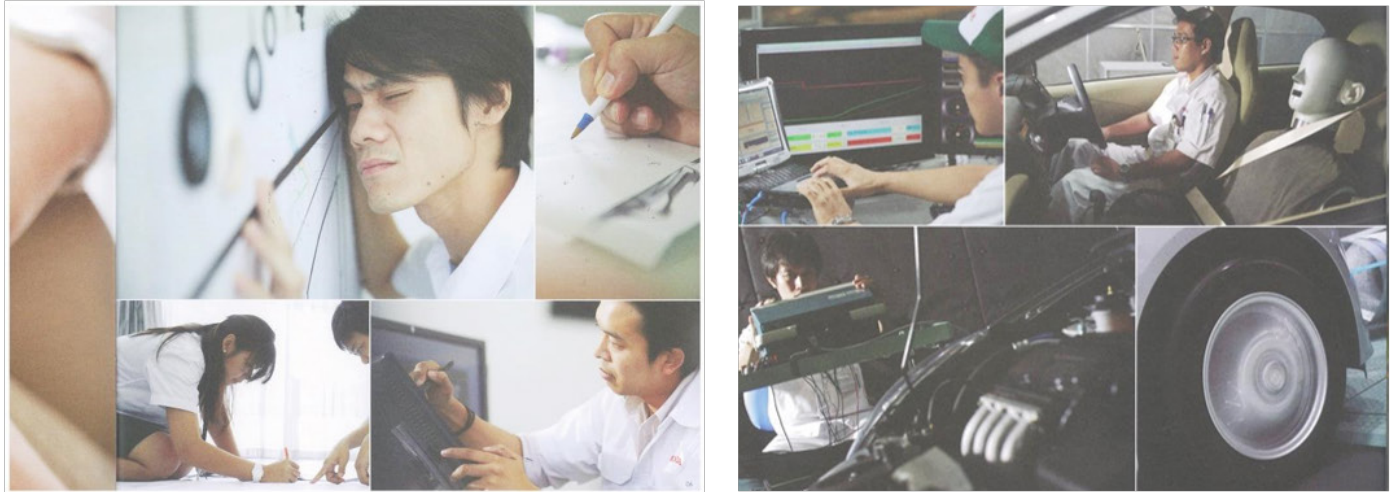
REFERENCES

- [1] P.R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill (2000)
- [2] S. W. Watson, F. J. Friedersdorf, B. W. Madsen, S. D. Cramer, Wear 181-183, (1995) 476-484
- [3] A. Fischer, S. Mischler, J. Phys D: Appl Phys. 39 (2006)
- [4] S. Tagella, A.K. Skder, A. Kumar, J. Electrochem. Soc. 151 (2004) G205



HONDA

Honda R&D Asia Pacific Co., Ltd.



**Brio
AMAZE**
aunsnouqolnu



THAI TRIBOLOGY ASSOCIATION (TTA)





THAI
TRIBOLOGY
ASSOCIATION

สมาคมการสีกหล่อและการหล่อลื่นไทย