


การขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันรีแอกชันบอนด์ซิลิคอนไนไตรด์เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง



นางสาวปาริชาติ ม่วงอร่าม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1146-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF REACTION-BONDED SILICON NITRIDE FOR OIL NOZZLE  
FOR HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS



Miss Parichat Muangaram

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2004

ISBN 974-53-1146-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันรีแอกชันบอนด์ซิลิโคนไนไตรด์เพื่อการใช้งานที่  
อุณหภูมิสูง

โดย

นางสาวปาริชาติ ม่วงอร่าม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยจิตร

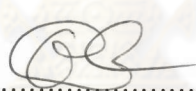
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

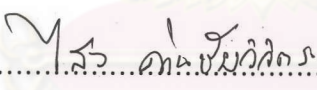
ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์

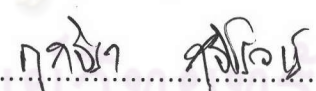
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยจิตร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

นางสาวปาริชาติ ม่วงอร่าม : การขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันรีแอคชันบอนด์ซิลิคอนไนไตรด์เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง. (FABRICATION OF REACTION-BONDED SILICON NITRIDE FOR OIL NOZZLE FOR HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ไสว ด้านชัย  
จิตร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์, 112 หน้า. ISBN 974-53-1146-4.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันรีแอคชันบอนด์ซิลิคอนไนไตรด์เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทำการเผาผนึกชั้นต้นผงซิลิคอนอัดที่อุณหภูมิ 1200°C โดยปรับเปลี่ยนเวลาเผของการเผาผนึกชั้นต้นจาก 10 ถึง 16 ชั่วโมง ความหนาแน่นและสมบัติทางกลของผงซิลิคอนอัดที่ผ่านการเผาผนึกชั้นต้นเพิ่มขึ้นตามเวลาเผของการเผาผนึกชั้นต้น ความหนาแน่นที่สูงขึ้นเป็นผลให้ได้ความเรียบผิวที่ดีขึ้นความสามารถในการเจาะและกลึงขึ้นอยู่กับความแข็งของผงซิลิคอนอัดภายหลังการเผาผนึกชั้นต้นเป็นหลัก โดยความแข็งที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปได้มีค่าอยู่ในช่วง 72-95 HV การกลึงใช้มีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์กลึงด้วยความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 0.111 mm/rev การเจาะใช้ดอกสว่านทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 3.5, 3.8 และ 5.1 มิลลิเมตร มีมุมจิกมาตรฐาน 60 องศา เจาะด้วยความเร็วรอบ (rpm) / อัตราเร็วการป้อน (mm/min) 1200/100, 1000/100 และ 800/80 ตามลำดับ การทำไนไตรเดชันทำที่อุณหภูมิ 1500°C โดยปรับเปลี่ยนเวลาเผของไนไตรเดชันจาก 14 ถึง 24 ชั่วโมง ขนาดและความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกชั้นต้นมีผลต่อความหนาแน่นภายหลังการไนไตรเดชันและความลึกของซิลิคอนไนไตรด์ โดยการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำภายหลังการเผาผนึกชั้นต้นง่ายกว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงภายหลังการเผาผนึกชั้นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา .....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต .....ปาริชาติ ม่วงอร่าม.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....ไสว ด้านชัยจิตร.....  
ปีการศึกษา .....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....กุลจิรา สุจิโรจน์.....



## 4470408421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: REACTION-BONDED SILICON NITRIDE (RBSN) / PRE-SINTERING / MACHINABILITY / SPEED / FEED / FEED RATE / POINT ANGLE / NITRIDING

PARICHAT MUANGARAM : FABRICATION OF REACTION-BONDED SILICON NITRIDE FOR OIL NOZZLE FOR HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SAWAI DANCHAIVIJIT, Ph.D. THESIS COADVISOR : KULJIRA SUJIROTE, Ph.D. 112 pp. ISBN 974-53-1146-4.

The objective of this research was to study the fabrication of reaction-bonded silicon nitride for oil nozzle for high temperature applications. The silicon compacts were pre-sintered at 1200 °C by varying soaking time from 10 to 16 hours. The bulk density and mechanical properties of pre-sintered silicon compacts were increased with increasing soaking time of pre-sintering. Higher density of pre-sintered silicon compacts resulted in better surface roughness. Machinability depended mainly on hardness of pre-sintered silicon compacts. The hardness suitable for machining was ranging between 72-95 HV. Tungsten carbide cutting tools were used in turning at speed of 330 rpm and feed of 0.111 mm/rev. The 3.5, 3.8 and 5.1 mm with standard point angle of 60 degree drills were used in drilling process at different speed (rpm) / feed rate (mm/min) of 1200/100, 1000/100 and 800/80 respectively. The nitriding processes were done at 1500 °C by varying soaking time from 14 to 24 hours. The size and the density of pre-sintered silicon compacts affected the density after nitriding and the depth of silicon nitride. The diffusion of nitrogen into the pre-sintered silicon compacts with low density was easier than the pre-sintered silicon compacts with high density.

Department ... Metallurgical Engineering.. Student's signature ... *Parichat Muangaram* ..  
 Field of study ... Metallurgical Engineering.. Advisor's signature ... *Sawai Danchaivijit* ..  
 Academic year ..... 2004 ..... Co-advisor's signature ... *Kuljira Sujirote* ..

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์ ซึ่งได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ คุณศิริโรจน์ ถนอมพันธ์ ที่ช่วยเหลือเครื่องมือและปรับตั้งน้ำหนักรีดสำหรับอัดชิ้นงาน ขอขอบพระคุณบริษัทไทยคาร์บอน-กราไฟต์ จำกัด ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปตลอดจนจัดหาผู้ชำนาญการขึ้นรูป ขอขอบพระคุณ คุณสันชัย น้อยปุก ผู้จัดการฝ่ายผลิต และคุณทองหล่อ จันทร์แจ้ง วิศวกร ที่ให้ความช่วยเหลือในการขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมัน ขอขอบคุณ คุณกรรณิการ์ เศรษฐษา ที่ช่วยเหลือการปฏิบัติงานวิจัยด้วยดีโดยตลอด รวมถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานและเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังกายและกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมสั่งเสริมด้านการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา และครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจให้การสนับสนุนในทุกด้าน ทำให้สำเร็จการศึกษาได้ดังเจตนารมณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป RBSN.....	5
2.1.1 ขนาดผง.....	5
2.1.2 การตัดเจาะกลึงไสชิ้นงานให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการหลังการเผา ผืนึกขึ้นต้น.....	8
2.1.2.1 การเจาะ (Drilling).....	9
2.1.2.2 การกลึง (Turning).....	11
2.1.3 อุณหภูมิในไตรเคชั่น.....	12
2.1.3.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล.....	12
2.1.3.2 โครงสร้างจุลภาคที่ช่วงอุณหภูมิในไตรเคชั่นต่างๆ.....	14
2.2 ปัญหาการใช้งาน RBSN ที่อุณหภูมิสูง.....	16
2.2.1 การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation).....	16
2.2.2 ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (High-temperature strength).....	17
2.2.3 ความคืบ (Creep).....	18



บทที่	หน้า
3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	20
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	20
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การบดและขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอน.....	20
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การตกแต่งชิ้นงาน.....	20
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบและตรวจสอบ.....	20
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2.1 วัสดุ: ผงโลหะซิลิกอน.....	21
3.2.2 ตัวประสาน (Binder).....	21
3.2.3 แก๊สที่ใช้ควบคุมบรรยากาศภายในเตา.....	21
3.3 การเตรียมชิ้นงาน.....	22
3.3.1 การบดและผสมผง.....	22
3.3.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอน.....	22
3.4 การเผาผนึกขั้นต้น (Pre-sintering).....	24
3.5 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	25
3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	25
3.5.1.1 การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	25
3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางกล.....	26
3.5.2.1 การวัดความแข็ง (Hardness).....	26
3.5.2.2 การวัดโมดูลัสของยัง (Young's modulus).....	26
3.5.2.3 การวัดความเหนียวต่อการแตกหัก (Fracture Toughness).....	27
3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope).....	29
3.5.4 การกลึงและเจาะชิ้นงาน Silicon compact.....	29
3.5.4.1 การกลึง (Turning).....	29
3.5.4.2 การเจาะ (Drilling).....	31
3.6 การไนไตรเดชัน (Nitridation).....	32





บทที่	หน้า
4.3 ผลการกลึงและเจาะชิ้นงาน Silicon compact.....	44
4.3.1 ผลการกลึง (Turning).....	44
4.3.2 ผลการเจาะ (Drilling).....	50
4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 14, 20 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ.....	59
4.4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยการวัดความหนาแน่น.....	59
4.4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลโดยการวัดความแข็ง.....	64
4.4.3 ผลการวัดความขรุขระผิวของชิ้นงานหัวฉีดน้ำมันภายหลังการไนไตรชัน.....	65
4.4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายหลังการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ... 4.4.4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope).....	68
4.4.4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM).....	69
4.4.4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย (EDS) บริเวณผิวชิ้นงาน ที่ผ่าน การไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ.....	71
4.4.4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย X-Ray Diffractometer (XRD). .....	72
5 อภิปรายผลการทดลอง.....	77
5.1 การกำหนดน้ำหนักผงซิลิคอนและแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ต้นแบบหัวฉีดน้ำมัน.....	77
5.2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและความขรุขระผิวของชิ้นงานภายหลังการเผา ผนึกชิ้นต้น.....	78
5.3 ผลการขึ้นรูป Silicon compact เป็นชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมัน.....	79
5.3.1 ผลการกลึง (Turning).....	80
5.3.2 ผลการเจาะ (Drilling).....	83
5.4 ผลของความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นต่อความหนาแน่นภายหลัง การไนไตรเดชันและระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานเป็น Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	89
5.5 ปริมาณเฟสในโครงสร้างของชิ้นงาน RBSN ที่เวลาไนไตรเดชันต่าง ๆ.....	91

บทที่	หน้า
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	95
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงาน RBSN ที่เป็นชิ้นงานทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์ (Commercial grade).....	6
2.2 ความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน RBSN ที่ช่วงอุณหภูมิไนไตรเดชัน 1350 – 1500°C เปรียบเทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์ (Commercial grade).....	6
2.3 % Theoretical density และ Young's Modulus ของชิ้นงานที่ใช้ผงซิลิคอนเริ่มต้นขนาด 13 ไมครอน.....	7
2.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงาน RBSN ของ เฟสที่ 1 เฟสที่ 2 และชิ้นงานเชิงพาณิชย์.....	7
2.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์จากบริษัท Tenmat.....	12
2.6 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคซิลิคอนไนไตรด์ที่เกิดขึ้นหลังจากการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	15
3.1 ปริมาณธาตุผสมของโลหะซิลิคอน ตรวจสอบโดย X-Ray Fluorescent (XRF).....	21
3.2 การ Heat treatment สำหรับการเผาผนึกชิ้นต้น Silicon Compact.....	24
3.3 การ Heat Treatment สำหรับการไนไตรเดชัน.....	33
4.1 ผลของแรงดันต่อปริมาณผงและความสูงที่ได้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน Silicon compact.....	38
4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการอัดขึ้นรูปและ CIP ตามลำดับ.....	39
4.3 ความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกชิ้นต้นที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลาต่าง ๆ.....	41
4.4 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลทั้งหมดของชิ้นงาน Silicon compact ภายหลัง Pre-sintering ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับผลงานที่ผ่านมา.....	42
4.5 แฟคเตอร์การกลิ้ง (MRR/V) และความขรุขระของผิวงานกลิ้ง (Ra) ที่สภาวะการกลิ้งต่าง ๆ (Dwell time 14 hr).....	45



ตารางที่	หน้า
4.6 ความขรุขระของผิวชิ้นงานซิลิคอน (Ra) ที่ผ่านการเผาผนึกขึ้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ โดยผ่านการกลึงด้วยความเร็วรอบ (speed) 330 rpm และอัตราป้อน (feed) 0.111 mm/rev.....	47
4.7 ความขรุขระของผิวรอยเจาะ (Ra) ที่สภาวะต่าง ๆ (Dwell time 14 hr).....	51
4.8 แฟคเตอร์การเจาะ (MRR/V) ที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ ในแต่ละความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (Dwell time 14 hr).....	52
4.9 ความเร็วรอบ (Speed) และอัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (Feed rate) ในแต่ละขนาดรูเจาะ (Dwell time 14 hr).....	55
4.10 ความขรุขระของผิวรอยเจาะ (Ra) ที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ ในแต่ละเวลาการเผาผนึกขึ้นต้นเมื่อผ่านการเจาะที่ speed และ feed rate ต่าง ๆ.....	55
4.11 ความหนาแน่นของชิ้นงานทรงกระบอก 2 ขนาด ที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลาต่าง ๆ ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ.....	59
4.12 ความหนาแน่นของชิ้นงานหัวฉีดน้ำมัน (Nozzle) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (bar) ที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลาต่าง ๆ ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ และใช้เครื่อง Ultrapycnometer สำหรับหา True density เปรียบเทียบกับผลงานที่ผ่านมาและชิ้นงานมาตรฐานจากบริษัท Tenmat.....	62
4.13 ความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลาต่าง ๆ โดยแบ่งเป็นช่วงของความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้น เปรียบเทียบกับผลงานที่ผ่านมาและชิ้นงานมาตรฐานจากบริษัท Tenmat.....	64
4.14 ความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงานหัวฉีดน้ำมันที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C ที่เวลาการเผาผนึกขึ้นต้นต่าง ๆ.....	65
4.15 ความขรุขระผิวของหัวฉีดน้ำมันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งเป็นไปตามแบบ (Drawing) ของหัวฉีดน้ำมันที่ใช้จริง .....	66
4.16 Relative Integrated Intensity ของ peak $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> เทียบกับ peak ของ $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> บริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ.....	74
4.17 Relative Integrated Intensity ของ peak $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> เทียบกับ peak ของ $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> บริเวณกลางชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ.....	74

ตารางที่	หน้า
4.18 ปริมาณของ $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> และ $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> บริเวณผิวของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรต์เคชันเป็น เวลาต่าง ๆ.....	75
4.19 ปริมาณของ $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> และ $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> บริเวณกลางชิ้นงานของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรต์ เคชันเป็นเวลาต่าง ๆ.....	75
5.1 อัตราป้อนสำหรับงานเจาะทั่วไป.....	85
5.2 ความเร็วรอบในการเจาะที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ความเร็วตัดอยู่ในช่วง 11.50 - 13.50 m/min.....	86
5.3 อัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (feed rate) ที่ความเร็วรอบ (speed) ต่าง ๆ เมื่อกำหนด ให้อัตราป้อน (feed) อยู่ในช่วง 0.08 - 0.1 mm/rev.....	86

  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและความเร็วรอบดอกสว่านกับความสามารถในการ เจาะรู.....	9
2.2 ความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร.....	9
2.3 อัตราการกินเนื้อชิ้นงานรอยเจาะที่สภาวะการเจาะต่าง ๆ.....	10
2.4 ความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่สภาวะต่าง ๆ.....	11
2.5 อัตราการกินเนื้อชิ้นงานที่สภาวะการกลึงต่าง ๆ.....	11
2.6 ความหนาแน่นของชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิไนไตรเดชันต่าง ๆ.....	13
2.7 ความสัมพันธ์ของค่า Young's Modulus กับ % Porosity.....	13
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อการดัดของชิ้นงานและค่าโมดูลัสของยัง.....	14
2.9 ตัวอย่างการเกิดออกซิเดชันของ RBSN .....	16
2.10 ความแข็งแรงดัด (Flexural strength) ของ RBSN ที่มีความหนาแน่นและรูพรุนแตก ต่างกัน.....	17
2.11 อัตราความคืบของ RBSN ที่ $T = 300^{\circ}\text{C}$ , $\sigma = 70 \text{ MPa}$ .....	18
3.1 การกระจายตัวของขนาดผงซิลิคอนขนาดเฉลี่ย 3.42 ไมครอน.....	21
3.2 Die รูปทรงกระบอก ซึ่งทำด้วยเหล็ก SKD11.....	23
3.3 รูปทรงชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันภายหลังจากอัดขึ้นรูป.....	23
3.4 เครื่องมือสำหรับกระบวนการ CIP.....	24
3.5 แผนภาพกระบวนการ Heating profile ของ Silicon compact.....	25
3.6 ลักษณะรอยกดจากการวัดความแข็งแบบ Vickers.....	28
3.7 ชิ้นงาน Silicon compact ภายหลังการการกลึงเป็นหัวฉีดน้ำมัน.....	29
3.8 มุมจิกของดอกสว่าน High speed steel 118, 85, 75 และ 60 องศา ตามลำดับ.....	31
3.9 ชิ้นงาน Silicon compact ภายหลังการเจาะรูเป็นหัวฉีดน้ำมัน.....	31
3.10 แผนภาพกระบวนการ Nitridation ที่อุณหภูมิ $1500^{\circ}\text{C}$ .....	33
3.11 กระบวนการขึ้นรูปรีเอกซ์บอนด์ซิลิคอนไนไตรด์ทั้งหมด.....	37
4.1 ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น (Pre-sintering).....	40
4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	43



รูปที่	หน้า	
4.3	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ที่ผ่านการกลึงที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงสภาวะต่าง ๆ.....	45
4.4	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกินเนื้องาน (MRR/V) ของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงสภาวะต่าง ๆ.....	46
4.5	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานกลึง (Dwell time 10 hr).....	48
4.6	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานกลึง (Dwell time 12 hr).....	48
4.7	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานกลึง (Dwell time 14 hr).....	48
4.8	ลักษณะของชิ้นงานภายหลังการกลึงด้วย Speed 330 rpm, Feed 0.111 mm/rev.....	49
4.9	ผิวรอยเจาะรูขนาด 3.8 มิลลิเมตร.....	50
4.10	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ที่ผ่านการเจาะรูขนาด $\phi$ 3.5, 3.8 และ 5.1 mm ที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนดอกสว่านที่สภาวะต่าง ๆ.....	52
4.11	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์การเจาะของชิ้นงาน (MRR/V) ที่ผ่านการเจาะรูขนาด $\phi$ 3.5, 3.8 และ 5.1 mm ที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนดอกสว่านที่สภาวะต่าง ๆ.....	53
4.12	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานเจาะที่ขนาด $\phi$ 3.5 mm.....	56
4.13	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานเจาะที่ขนาด $\phi$ 3.8 mm.....	56
4.14	Profile ความขรุขระผิว (Ra) ของงานเจาะที่ขนาด $\phi$ 5.1 mm.....	56
4.15	ลักษณะของชิ้นงานภายหลังการเจาะที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ.....	57
4.16	ลักษณะของหัวฉีดน้ำมันที่สมบูรณ์ภายหลังการกลึงและการเจาะ.....	58
4.17	ภาคตัดขวางของชิ้นงานทรงกระบอกภายหลังการไนไตรเดชัน 2 ขนาด.....	59
4.18	แผนภาพความหนาแน่นภายหลังการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ ของชิ้นงานทรงกระบอก 2 ขนาด ซึ่งมี $\rho_0$ (pre-sintering) ต่างกัน.....	60
4.19	แผนภาพอัตราส่วนระหว่างระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงาน (Depth, $\Delta L$ ) และระยะครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L_0$ ) ภายหลังการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ ของชิ้นงานทรงกระบอก 2 ขนาด ซึ่งมี $\rho_0$ (pre-sintering) ต่างกัน.....	61



รูปที่	หน้า
4.20 ความหนาแน่นของชิ้นงานหัวฉีดน้ำมัน (Nozzle) ภายหลังจากไนไตรเดชัน ( $\rho_N$ ) เป็นเวลาต่าง ๆ.....	63
4.21 ความหนาแน่นของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม (bar) ภายหลังจากไนไตรเดชัน ( $\rho_N$ ) เป็นเวลาต่าง ๆ.....	63
4.22 ส่วนที่วัดความขรุขระผิว.....	65
4.23 แผนภาพความสัมพันธ์ของความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ที่ผ่านการกลึงภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นและการไนไตรเดชัน.....	67
4.24 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ที่ผ่านการเจาะรูขนาด $\phi$ 3.5, 3.8 และ 5.1 mm ภายหลังจากการเผาผนึกชิ้นต้นและการไนไตรเดชัน.....	67
4.25 โครงสร้างจุลภาคของซิลิคอนไนไตรด์ที่ผ่านการไนไตรเดชัน.....	68
4.26 โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ที่อุณหภูมิไนไตรเดชัน 1500°C เป็นเวลาต่าง ๆ.....	70
4.27 การ mapping บริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลาต่าง ๆ .....	71
4.28 ข้อมูล XRD บริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง.....	72
4.29 ข้อมูล XRD บริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	73
4.30 ข้อมูล XRD บริเวณผิวชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	73
4.31 Calibration curve ความสัมพันธ์ระหว่าง Integrated Intensity ของ $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> และ $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> เทียบกับ Weight fraction $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	75
5.1 แผนภาพน้ำหนักผงและแรงดันในการอัดชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันที่มีต่ออัตราส่วนของความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เมื่อ $\phi_{Die} = 71$ มิลลิเมตร.....	77
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและความเร็วรอบของงานกลึงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ.....	81
5.3 แผนภาพการกลึงหัวฉีดน้ำมันซิลิคอนที่ Speed 330 rpm และ Feed 0.111 mm/rev ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกชิ้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ.....	83

รูปที่	หน้า
5.4 กราฟตั้งความเร็วรอบของเครื่องเจาะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่านต่าง ๆ.....	84
5.5 แผนภาพการเจาะหัวฉีดน้ำมันที่ Speed และ Feed ของขนาดครุเจาะต่าง ๆ.....	89
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงาน Depth ของ $Si_3N_4$ และเวลาแช่ของการไนไตรเดชัน (Dwell time).....	91
5.7 กลไกการเกิด $\alpha$ -matte-ซิลิคอนไนไตรด์ .....	92
5.8 การเกิด $\alpha$ -needle-ซิลิคอนไนไตรด์ โดยกลไกการกลายเป็นไอแล้วควบแน่น.....	93
5.9 การเกิด $\alpha$ -needle-ซิลิคอนไนไตรด์ โดยกลไกแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง.....	93
5.10 กลไกการเกิดเบตา-ซิลิคอนไนไตรด์ ( $\beta$ - $Si_3N_4$ ).....	94

  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย