

การขึ้นรูปและวิเคราะห์คุณลักษณะของรีเอกซ์บอนดซิลิคอนไนไตรด์

นางสาวกัญยาทิพย์ ตันติคมนน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-133-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 19969284

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF REACTION-BONDED SILICON NITRIDE

Miss Kanyatip Tantikom

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

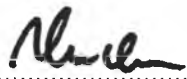
Chulalongkorn University

Academic Year 2000


ISBN 974-347-133-2

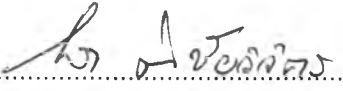
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การขึ้นรูปและวิเคราะห์คุณลักษณะของรีเอกซ์บอนด์ซิลิคอนไนไตรด์
โดย นางสาวกันยาทิพย์ ดันติคมน์
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์

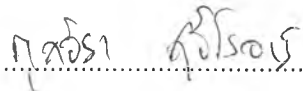
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

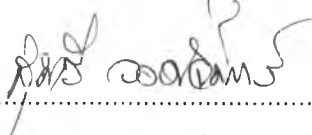
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)

กัญยาทิพย์ ตันติคมน์ : การขึ้นรูปและวิเคราะห์คุณลักษณะของรีเอกซ์บอนด์ซิลิคอนไนไตรด์
(FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF REACTION-BONDED SILICON NITRIDE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์ ,
90 หน้า., ISBN 974-347-133-2

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบวนการขึ้นรูป และวิเคราะห์คุณลักษณะของรีเอกซ์บอนด์ซิลิคอนไนไตรด์ ศึกษาความสามารถในการเจาะและกลึงของชิ้นงานหลังการเผาขึ้นต้นที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและอัตราการป้อน ซึ่งชิ้นงานซิลิคอนมีค่าแฟกเตอร์ของการเจาะและการกลึง (MRRV) ไม่เกิน 0.13 และ 2.9 ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับขนาดรูเจาะและความเรียบผิว ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการไนไตรเดชันเพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิในช่วง 1350-1500°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ตรวจสอบความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไนไตรเดชัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงาน RBSN อยู่ในช่วง 72-82% ความหนาแน่นทางทฤษฎี ความหนาแน่นจริงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิไนไตรเดชันเพิ่มขึ้น และปริมาณของซิลิคอนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาใกล้เคียงสมบูรณ์เมื่อทำการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1450°C ค่าโมดูลัสของยังและความแข็งแรงต่อการดัดจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่มีอยู่ในชิ้นงาน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต..... กัญยาทิพย์ ตันติคมน์
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ดร. ด้านชัยวิจิตร
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... กุลจิรา สุจิโรจน์

4170217621 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : REACTION-BONDED SILICON NITRIDE (RBSN) / MECHANICAL PROPERTY /
NITRIDATION

KANYATIP TANTIKOM : FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
REACTION-BONDED SILICON NITRIDE.

THESIS ADVISOR : DR. SAWAI DANCHAIVICHIT

THESIS COADVISOR : DR. KULJIRA SUJIROTE, 91 pp. ISBN 974-347-133-2

The objectives of this research were to study the fabrication and characterization of reaction-bonded silicon nitride. The machinability of pre-sinter silicon compacts at 1200°C for 10 hours were determine by manifesting speed/feed diagrams of drilling and turning operations. Drilling and turning factors (MRR/V) of silicon compacts in this research were less than 0.13 and 2.9 respectively and depended on diameter and surface roughness average. The pre-sinter specimens undergone nitriding process for 14 hours at 1350-1500°C were characterised (density, microstructure and mechanical properties). From the results, the bulk density of RBSN were ranging between 72-82% theoretical density and true density were increase with nitridation temperature. Amount of unreacted silicon were decreased with increasing temperature and the reaction was completed at temperature 1450 °C . Young 's modulus and flexural strength were depended on percent of porosity.

Department....Metallurgical..Engineering.....Student 's signature.....*Kanyatip Tantikom*.....
Field of study....Metallurgical..Engineering.....Advisor 's signature.....*Sawai Danchaisit*.....
Academic year.....2000.....Co-advisor 's signature.....*Kuljira Sujirak*.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
 ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบ
 พระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอ
 ขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณวีรศักดิ์ หอมกระจาย ที่ให้
 ข้อมูลเกี่ยวกับหัวฉีดน้ำมันที่ใช้ในโรงไฟฟ้าและช่วยเหลือด้านอุปกรณ์อัดขึ้นรูป คุณศรีใจล ชุนทน ที่
 กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูป คุณรุ่งทิพย์ กระต่ายทอง ที่ช่วยเหลือเรื่องการใช้เตาเผา
 คุณวัชรกร สุศิวะ ที่ให้ความช่วยเหลือในการกลึงชิ้นงาน คุณศิริพรรณ จันทราสกุล ที่ช่วยเหลือใน
 การใช้เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน คุณธนวิทย์ โพธิ์ศรี ที่ช่วยเหลือในการทำ Nuclear Magnetic
 Resonance เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติ
 งานวิจัย และเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมส่งเสริมด้านการศึกษาเป็นอย่างดี
 ตลอดมา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้การสนับสนุนในทุกด้านจนสามารถสำเร็จการศึกษาได้ตาม
 เจตนารมณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ปรีทรรศน์วรรณกรรม	
2.1 สมบัติของซิลิคอนไนไตรด์.....	4
2.2 กระบวนการขึ้นรูปซิลิคอนไนไตรด์ด้วยวิธี Reaction-Bonded Silicon Nitride (RBSN).....	6
2.2.1 เทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamics) ของปฏิกิริยาไนไตรเดชัน (nitridation).....	7
2.2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (kinetics) ของปฏิกิริยาไนไตรเดชัน (nitridation).....	7
2.2.3 กลไกการเกิด Reaction-Bonded Silicon Nitride (RBSN).....	9
2.2.4 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิด Reaction-Bonded Silicon Nitride (RBSN).....	12
2.3 การใช้งานของซิลิคอนไนไตรด์.....	18
3. ระเบียบวิธีการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอน.....	19
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ตัดแต่งชิ้นงาน.....	19
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบและตรวจสอบ.....	19
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 วัสดุผง silicon metal.....	20
3.2.2 สารช่วยเกาะยึด (binder).....	21
3.2.3 ก๊าซที่ใช้ควบคุมบรรยากาศในเตา.....	21
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.3.1 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	21
3.3.2 การเผาผนึกขั้นต้น (pre-sintering).....	22
3.3.3 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	23
3.3.3.1 วิธีการวัดความหนาแน่นของชิ้นทดสอบด้วย Ultracycrometer.....	23
3.3.3.2 วิธีการวัดค่าโมดูลัสของยัง (Young 's modulus) ด้วย Grindosonic.....	23
3.3.3.3 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ แสง optical microscope.....	24
3.3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	24
3.3.4.1 วิธีการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน (hardness).....	24
3.3.4.2 วิธีการวัดค่าความแข็งแรงต่อการอัด (compressive strength).....	25
3.3.5 การตรวจสอบความสามารถในการเจาะกลึง (machinability).....	25
3.3.5.1 วิธีการเจาะรู (drilling) ชิ้นทดสอบและการตรวจสอบผลการเจาะรู.....	25
3.3.5.2 วิธีการกลึง (turning) ชิ้นทดสอบและการตรวจสอบผลการกลึง.....	25
3.3.6 วิธีการทำไนไตรเดชัน (Nitridation).....	26
3.3.7 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชัน.....	27
3.3.7.1 วิธีการวัดความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ.....	27
3.3.7.2 วิธีการวัดค่าโมดูลัสของยัง	28
3.3.7.3 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	28
3.3.8 การตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชัน.....	28
3.3.8.1 วิธีวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน (hardness).....	28
3.3.8.2 วิธีวัดค่าความแข็งแรงต่อการดัด (flexural strength).....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี.....	30
3.3.9.1 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย x-ray diffractometer.....	30
3.3.9.2 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย nuclear magnetic resonance.....	31
4. ผลการทดลอง	
4.1 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอน.....	32
4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน.....	34
4.2.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นและรูพรุนในชิ้นงาน.....	34
4.2.2 ผลการวัดค่าโมดูลัสของยัง.....	36
4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	37
4.3.1 ผลการวัดค่าความแข็ง.....	37
4.3.2 ผลการวัดค่าความแข็งแรงต่อการัด.....	38
4.4 ผลการตรวจสอบความสามารถในการเจาะและกลึงของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	39
4.4.1 ผลการวัดความแข็งแรงต่อการัด.....	39
4.4.2 ผลการวัดค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน.....	39
4.4.3 ผลการตรวจสอบรอยเจาะของชิ้นงานและความเรียบของชิ้นงาน.....	41
4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	48
4.5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	48
4.5.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด.....	49
4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี.....	55
4.6.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย x-ray diffractometer.....	55
4.6.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย nuclear magnetic resonance.....	60
5. อภิปรายผลการทดลอง	
5.1 ผลของความสามารถในการเจาะกลึงชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	62
5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชั่น.....	64
5.3 สมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชั่น.....	68
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากการทดลอง.....	77
ภาคผนวก ข. รูปประกอบผลการทดลอง.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงข้อมูลโครงสร้างผลึกของซิลิคอนไนไตรด์.....	5
2.2 แสดงความหนาแน่นและสมบัติทางกลของซิลิคอนไนไตรด์โดยทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง.....	5
2.3 สรุปอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....	17
3.1 ส่วนผสมหลักของ silicon metal ตรวจสอบโดย X-ray flourescent (XRF).....	20
3.2 แสดงการ heat treatment สำหรับการ Pre-sintering silicon compact.....	22
3.3 แสดงการ heat treatment สำหรับการ Nitridation.....	27
3.4 แสดงอัตราส่วนของ Si : α -Si ₃ N ₄ ที่ใช้ในการผสม.....	30
4.1 ตารางแสดงขนาด, น้ำหนักของชิ้นงานซิลิคอนที่ผ่านการอัด.....	32
4.2 แสดงผลของความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและเผาผนึกชิ้นต้น.....	34
4.3 แสดงความหนาแน่นเฉลี่ยของซิลิคอนไนไตรด์ที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34
4.4 แสดงค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกชิ้นต้นและชิ้นงานที่ผ่านการ ไนไตรเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์จากบริษัท Tenmat.....	36
4.5 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกชิ้นต้นและชิ้นงานที่ผ่านการ ไนไตรเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับชิ้นงานมาตรฐานจากบริษัท Tenmat.....	37
4.6 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการดัดของชิ้นงานแบบ Three-point bending ที่ผ่านการ ไนไตรเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับชิ้นงานมาตรฐานจากบริษัท Tenmat.....	38
4.7 แสดงผลของการวัดความแข็งต่อการอัด.....	39
4.8 ผลการวัดค่าความเรียบผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่สภาวะต่างๆ.....	39
4.9 แสดงความเรียบผิวรอยเจาะที่สภาวะต่างๆ (ϕ 3 mm).....	44
4.10 แสดงความเรียบผิวรอยเจาะที่สภาวะต่างๆ (ϕ 4 mm).....	45
4.11 แสดงความเรียบผิวรอยเจาะที่สภาวะต่างๆ (ϕ 5 mm).....	45
4.12 แสดง Relative integrated intensity ของ peak Si ₃ N ₄ เทียบกับ peak silicon.....	57
4.13 แสดงปริมาณของ Si ₃ N ₄ และ Silicon จากการทำปฏิกิริยา Nitridation.....	59

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ภาพจากกล้อง TEM หลังจากไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 28 นาที.....	6
2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชันกับเวลา.....	8
2.3 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 3 ช่วง.....	9
2.4 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชันแบบสมบูรณแสดง 2 ช่วงที่เกิดปฏิกิริยาสูงสุด.....	10
2.5 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชันระหว่างซิลิคอนในสถานะของเหลวกับ ก๊าซไนโตรเจน.....	12
2.6 แสดงการกลายเป็นไอและความดันย่อยสมดุลบนผิวซิลิคอนกับอุณหภูมิ.....	13
2.7 แสดงความดันย่อยของซิลิคอนเหนือผิวกับอัตราการกลายเป็นไอของซิลิคอน.....	14
2.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของเหล็กที่เติมในผงเริ่มต้น.....	15
2.9 แสดงผลการผ่านก๊าซต่อการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชัน.....	16
2.10 แสดงชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่ผลิตจากซิลิคอนไนไตรด์.....	18
3.1 แสดงลักษณะผง silicon metal จากกล้อง SEM ที่ผ่าน sieve ขนาด 325 mesh.....	20
3.2 แสดงการกระจายขนาดของผง silicon metal ที่ใช้ในการทดลองขนาด 25.13 ไมครอน.....	20
3.3 แสดงขนาดสะสมของผง silicon metal ที่ใช้ในการทดลองขนาด 13.27 ไมครอน.....	21
3.4 แสดงรูปทรงขึ้นทดสอบที่ได้จาก hydraulic press.....	22
3.5 แสดงแผนภาพกระบวนการ heat treatment silicon compact.....	23
3.6 แสดงลักษณะของ Si compact ที่ผ่านการกลึงลักษณะขั้นบันได.....	26
3.7 แผนภาพแสดงกระบวนการ Nitridation ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด 1500°C.....	27
3.8 แสดงการทดสอบ Three-point bending.....	29
4.1 ลักษณะชิ้นงาน silicon compact ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วย hydraulic press.....	33
4.2 แสดงลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นต้น (pre-sintering).....	33
4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิการไนไตรเดชันต่างๆ.....	35
4.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Young 's modulus กับ % porosity	36
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อการดัดของชิ้นงานกับค่าโมดูลัสของยัง.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.6 แสดงความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่สภาวะต่างๆ.....	40
4.7 แสดงแพ็คเกจจิ้งจากการกลึงที่สภาวะต่างๆ.....	40
4.8 แสดงลักษณะของรูเจาะ 4 ประเภท (เส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่าน 3 mm).....	42
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน,ความเร็วรอบดอกสว่าน กับ ความสามารถในการเจาะรู.....	44
4.10 แสดงความเรียบผิวชิ้นงานรูเจาะที่สภาวะการเจาะรูต่างๆ.....	46
4.11 แสดงแพ็คเกจจิ้งจากการเจาะที่สภาวะต่างๆ.....	47
4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของซิลิคอนหลังจากผ่านการเผาผนึกขั้นต้น.....	48
4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของซิลิคอนไนไตรด์ที่ผ่านการไนไตรเดชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาค (x50) และ mapping ของชิ้นงาน RBSN ที่อุณหภูมิ ไนไตรเดชั่น 1500°C (บริเวณผิวชิ้นงาน).....	50
4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาค (x50) และ mapping ของชิ้นงาน RBSN ที่อุณหภูมิ ไนไตรเดชั่น 1500°C (บริเวณภายในชิ้นงาน).....	50
4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ที่อุณหภูมิการไนไตรเดชั่น 1500°C เทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์ที่กำลังขยาย (x200) และ (x1500).....	52
4.17 แสดงผิวหน้ารอยแตกจากกล้อง SEM ที่อุณหภูมิการไนไตรเดชั่นต่างๆ (x500) และ (x3500).....	54
4.18 แสดงข้อมูล XRD ที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชั่นที่อุณหภูมิ 1350°C.....	56
4.19 แสดงข้อมูล XRD ที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชั่นที่อุณหภูมิ 1500°C.....	56
4.20 แสดง Calibration curve ความสัมพันธ์ระหว่าง Integrated intensity ของ Si และ Si ₃ N ₄ เทียบกับ Weight fraction Si.....	58
4.21 แสดง Calibration curve ความสัมพันธ์ระหว่าง Integrated intensity ของ α -Si ₃ N ₄ เทียบกับ Weight fraction β -Si ₃ N ₄	58
4.22 แสดงปริมาณ α -Si ₃ N ₄ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยา.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

4.23	แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการไนไตรเดชันต่างๆ เทียบกับชิ้นงานเชิงพาณิชย์..	60
4.24	แสดงตัวอย่างข้อมูล NMR ของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1350°C.....	60
4.25	แสดงตัวอย่างข้อมูล NMR ของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C.....	61
5.1	แสดงกลไกการเกิดแอลฟาซิลิคอนไนไตรด์ (Alpha matte)	65
5.2	แสดงกลไกการเกิดผลึกรูปเข็มของแอลฟาซิลิคอนไนไตรด์บนผิวของซิลิคอน.....	66
5.3	แสดงการเกิดนิวเคลียสของซิลิคอนไนไตรด์ และโตไปที่บริเวณช่องว่าง.....	66
5.4	แสดงกลไกการเกิดเบตา-ซิลิคอนไนไตรด์.....	67