คุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของนิกเกิลเบสซุปเปอร์อัลลอยด์ เกรด INCONEL 718 ที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

นายบุญเลิศ ทองยินดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-120-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I15832091

HIGH TEMPERATURE TENSILE PROPERTIES OF HOT-PRESSED INCONEL 718 NI-BASE SUPERALLOY

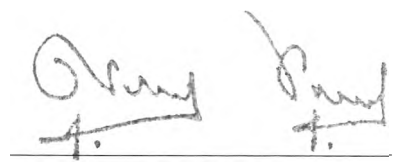
Mr. Boonloerd Thongyindee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1998

ISBN 974-331-120-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของนิกเกิลเบสซุปเปอร์อัลลอยด์ เกรด INCONEL 718 ที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
โดย	นายบุญเลิศ ทองยินดี
ภาควิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร

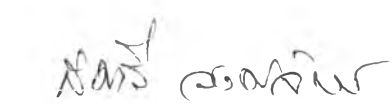
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

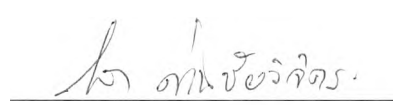
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



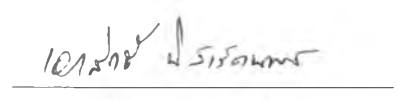
ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

บุญเลิศ ทองยินดี : คุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของนิกเกิลเบสซุปเปอร์อัลลอยด์เกรด INCONEL 718 ที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (High Temperature Tensile Properties of Hot-Pressed INCONEL 718 Ni-Base Superalloy)
อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร; 69 หน้า. ISBN 974-331-120-3

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผง INCONEL 718 ที่นำมาทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานให้มีค่าความหนาแน่นสูงในสภาวะของแข็ง เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูง และนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตแบบ Wrought ซึ่งนำมาจาก บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการดังกล่าวคือ 1,250 °C และใช้เวลาในการคงอุณหภูมิสูงสุดอย่างน้อย 1 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ได้มีค่าความหนาแน่นมากกว่า 99 % ของความหนาแน่นตามทฤษฎี เมื่อนำชิ้นงานไปอบชุบด้วยความร้อนแบบมาตรฐานพบว่า คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากแผ่นหนาแบบต่อเนื่องเป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่องและพบคาร์ไบด์เม็ดละเอียดกระจายตัวภายในเกรนอย่างสม่ำเสมอ ขณะที่ไม่พบคาร์ไบด์ในชิ้นงานที่นำมาจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) รวมทั้งให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่นำมาจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) เมื่อทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนให้ค่า UTS และ 0.2 % Proof Stress สูงกว่าชิ้นงานที่นำมาจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) แต่ค่าการยืดตัวมีค่าต่ำกว่ามาก และการแตกหักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นการแตกหักแบบเปราะ แต่สำหรับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) จะเป็นการแตกหักแบบเหนียว

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ไสว ด่านชัยวิจิตร
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

#C 818125 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING
KEY WORD: NI-BASE SUPERALLOYS / INCONEL 718 / ELEVATED TEMPERATURE TESTING / HOT PRESSING

BOONLOERD THONGYINDEE : HIGH TEMPERATURE TENSILE PROPERTIES OF HOT-PRESSED INCONEL 718 NI-BASE SUPERALLOY . THESIS ADVISOR : SAWAI DANCHAIVIJIT, Ph.D. 69 pp. ISBN 974-331-120-3

In this research, the appropriate temperature and time for producing a high density INCONEL 718 via Hot-Pressing Process was studied. The high temperature tensile properties of the dense INCONEL 718 was then tested and compared the results with the Wrought-Typed sample received from the Thai Airways International PCL.

The experiment indicated that the appropriate temperature to form a product by this mean was 1,250 °C and the required holding time at high temperature was at least one hour. The density of the product was more than 99 % of theoretical density. After Standard Heat Treatment, the carbide at grain boundary was transformed form continuous thick sheet to discontinuous chain. There were also uniformly dispressed fine carbides within the grain of the Hot-Pressed product while there were not in the samples from the Thai Airways International PCL. The hardness of this Hot-Pressed products was higher than the sample from the Thai Airways International PCL. For the tensile testing at 650 °C, the Hot-Pressed product had UTS and 0.2 % Proof Stress higher than the sample from the Thai Airways International PCL. but the elongation was much lower. The fracture of Hot-Pressed product was brittle while the sample from the Thai Airways International PCL. was ductile.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ	**ลายมือชื่อนิสิต**
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2541	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ และ อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในการทดลอง ขอขอบคุณนางศิริรัตน์ นิสารัตนพร และนายเสนีย์ มณีเพชร รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ นายมงคล อุมา นายชุมพล บุษบก นางสาวนฤมล สุทธิวานิช ที่ช่วยเหลือด้านเครื่องมือเอกสารและพิมพ์วิทยานิพนธ์ จนกระทั่งงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของกองทุนโลหการ สวทช. จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

2. ปริทัศน์วรรณกรรม 5

3. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง 13

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 13

3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบรูปร่าง การกระจายขนาด และโครงสร้างจุลภาคของผงโลหะ 15

3.3 ขั้นตอนการผลิต INCONEL 718 ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 15

3.4 เงื่อนไขในการผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.5 ขั้นตอนการอบชุบด้วยความร้อนแบบมาตรฐาน (Standard Heat Treatment : SHT) 16

3.6 การตรวจสอบความหนาแน่น 17

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบกวาด (SEM) 18

3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) 18

3.9 การตรวจสอบความแข็ง 19

3.10 การตรวจสอบระดับการกระจายตัวของความพรุน (Porosity Profile) 19

3.11 การทดสอบคุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูง 19

4. ผลการทดลอง 22

4.1 วัสดุ 22

4.2 ผลของการขึ้นรูปผง INCONEL 718 โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 26

4.3 ผลของโครงสร้างจุลภาค 31

4.4 การตรวจสอบความพรุนตลอดชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะ 36

4.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูง 39

4.6 การแสดงผลการแตกหักของชิ้นงาน 40

5. การอภิปรายผลการทดลอง 48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

6. สรุปผลการทดลอง 54

รายการอ้างอิง 55

ภาคผนวก 58

ประวัติผู้เขียน 69

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ส่วนผสมทางเคมีของ INCONEL 718 5

2.2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของ INCONEL 718 5

2.3 ค่าการทดสอบคุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C ของ INCONEL 718 แบบ Wrought 9

2.4 Mechanical Properties Observed for Alloy 718 Spray Fromed + Forged 55 % 9

2.5 Heat Treatment Schedule Used on Experimental Alloy 718 Materials 12

2.6 คุณสมบัติทางกลของอัลลอยด์ 718 ซึ่งผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนที่ต่างกัน 12

3.1 การแปรผันอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปร้อน 16

4.1 การกระจายขนาดของผงโลหะ 22

4.2 แสดงค่าของขนาด น้ำหนักสะสม และ % น้ำหนักสะสมของผง INCONEL 718 23

4.3 แสดงผลของค่าความหนาแน่นเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน แบบวัดเฉพาะส่วน 26

4.4 แสดงผลของค่าความหนาแน่นเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน แบบวัดทั้งแท่ง 26

4.5 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการทำ SHT 28

4.6 แสดงผลโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการทำ SHT 31

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.7 แสดงผลโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการทำ SHT 32

4.8 การแสดงผลของค่า UTS, 0.2 % Proof Stress, Elongation, Reduction of Area และ Young's Modulus ของการทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะเทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 39

4.9 แสดงผลระหว่างความหนาแน่นเทียบกับคุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานทดสอบที่ผลิตจากผงโลหะเทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 39

5.1 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการผลิต INCONEL 718 ด้วยกระบวนการต่าง ๆ 49

ข. ตารางแสดงส่วนประกอบทางเคมีของผง INCONEL 718 60

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 TTP Diagram แสดงการอบชุบด้วยความร้อนของ INCONEL 718 แบบ Hot-Rolled Bar 7

2.2 Graphical Representation of the Data Process 11

3.1 แม่พิมพ์กราไฟต์พร้อมขนาด 14

3.2 แท่งอัดกราไฟต์พร้อมขนาด 14

3.3 แผนภูมิการขึ้นรูปผง INCONEL 718 15

3.4 แสดงขั้นตอนการทำ SHT 17

3.5 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ 19

4.1 แผนภูมิการกระจายขนาดของผง INCONEL 718 23

4.2 ภาพ Scanning Electron Micrographs แสดงถึงรูปทรงของผง INCONEL 718 24

4.3 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อผง INCONEL 718 25

4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งชิ้นที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 27

4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน 29

4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความหนาแน่นสัมพัทธ์สำหรับชิ้นงานทั้งชิ้น 30

4.7 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,125 °C/3 ชม. 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.8 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. 33

4.9 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม. 34

4.10 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 34

4.11 ภาพของ Precipitate Phase ในโครงสร้างพื้นของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 35

4.12 ภาพของ Precipitate Phase ในโครงสร้างพื้นของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 35

4.13 แสดงจำนวนและรูปร่างของรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. ผ่าตามยาว 37

4.14 แสดงจำนวนและรูปร่างของรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม. ผ่าตามยาว 38

4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับ UTS และ 0.2 % Proof Stress ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 40

4.16 ภาพการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C 42

4.17 ภาพแสดงบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการดึงที่อุณหภูมิ 650 °C 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. 44

4.19 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม. บริเวณขอบ บริเวณระหว่างกึ่งกลางและขอบ และบริเวณกึ่งกลาง ตามลำดับ 45

4.20 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1.5 ชม. บริเวณขอบ บริเวณระหว่างกึ่งกลางและขอบ และบริเวณกึ่งกลาง ตามลำดับ 46

4.21 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) บริเวณขอบ บริเวณระหว่างกึ่งกลางและขอบ และบริเวณกึ่งกลาง ตามลำดับ 47

5.1 แสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่าง ๆ ที่บริเวณส่วนบนชิ้นงาน (Z = L) 52

5.2 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่าง ๆ ที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน (Z = L/2) 52

5.3 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่าง ๆ ที่บริเวณส่วนล่างชิ้นงาน (Z = 0) 53

ค. ภาพแสดงเครื่องมือในการผลิตชิ้นงานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 61

ง. แผนภูมิแสดงค่า EDS ของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

จ. แผนภูมิแสดงค่า EDS ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม. (SHT) 63

ฉ. แผนภูมิแสดงค่า EDS ของเม็ดคาร์ไบด์ในเกรน 64

ช. แผนภูมิแสดงค่า EDS ของแถบคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน 65

ซ. แผนภูมิแสดงค่า EDS ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. เมื่อผ่านการทำ SHT 66

ฌ. แผนภูมิผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. 67

ญ. แผนภูมิผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม. 67

ฐ. แผนภูมิผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1.5 ชม. 68

ฒ. แผนภูมิผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) 68