ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249437

ผลกระทบของการจัดการน้ำโดยใช้ประตูระบายน้ำที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรน้ำในลุ่มน้ำ

นายณัฐพงศ์ ทำรุ่งกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สถาบันวิจัยและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2564

b00254491

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249437

อิทธิพลของทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก

นางสาวจุฑามาส บำรุงกุล วท.บ. (ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ดร. ชาญเดช พิสิษฐ์ไพบูลย์) ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ. ดร. สิริพร โรจนนันต์) กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ. ดร. สุรศิษฐ์ โรจนนันต์) กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ดร. เอกพล ศิวพลเสถียร) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นางสาวจุฑามาส บำรุงกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. สิริพร โรจนนันต์
	ผศ. ดร. สุรศิษฐ์ โรจนนันต์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

249437

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก ในการทดลองเริ่มจากการผสมผงทองแดงและทังสเตนคาร์ไบด์ปริมาณร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูป แล้วอบผนึก หลังจากนั้นนำชิ้นงานบางส่วนไปทุบขึ้นรูปร้อน บางส่วนทุบขึ้นรูปเย็นเพื่อลดความหนาลงปริมาณต่างๆ วัดค่าการนำไฟฟ้า วัดความแข็งและความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังทุบขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าชิ้นงาน Cu-20WC, Cu-50WC และCu-75WC หลังอัดขึ้นรูปแล้วอบผนึกมีค่าการนำไฟฟ้า 44.5, 17.7 และ 3.1%IACS ตามลำดับ ความแข็งมีค่า 43.4, 58.1 และ 70.5 รอคเวลส์สเกลบี ตามลำดับ ความหนาแน่นมีค่า 7.6, 9.6 และ 10.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผลการทุบขึ้นรูปร้อนของชิ้นงาน Cu-20WC เพื่อลดความหนาลงร้อยละ75 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเป็น 65.8%IACS มีค่าความแข็งเป็น 81.7 รอคเวลส์สเกลบี มีค่าความหนาแน่นเป็น 8.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทุบแปรรูปเย็นชิ้นงาน Cu-20WC เพื่อลดความหนาลงร้อยละ 75 มีค่าการนำไฟฟ้าเป็น 62.7 %IACS มีค่าความแข็งเป็น 87.4 รอคเวลส์สเกลบี มีค่าความหนาแน่น 8.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าอิทธิพลของของทังสเตนคาร์ไบด์มีผลทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทองแดงเพิ่มขึ้น แต่ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ขณะที่ปริมาณการทุบขึ้นรูปเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความแข็ง และความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การนำไฟฟ้า/ ความแข็ง/ ทองแดงผสม/ ทังสเตนคาร์ไบด์/ วัสดุหน้าสัมผัส

Thesis Title	The Effect of Tungsten Carbide on Electrical Conductivity and Hardness of Copper-based Contact Materials
Thesis Credits	15
Candidate	Miss Jutamas Bumrungkul
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Siriporn Rojananan
	Asst. Prof. Dr. Surasit Rojananan
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2554

Abstract

249437

The objective of this work is to study the effect of tungsten carbide on electrical conductivity and hardness of copper-based contact materials. In the experiment, copper powders were mixed together with tungsten carbide powders with the ratio of tungsten carbide powder 20, 35 and 50 percent by weight. Mixed powders were compacted and sintered. Subsequently, some of samples were hot forged and cold forged to reduce the thicknesses. The electrical conductivity, hardness and density were investigated. The experimental results showed that the as-sintered Cu-20WC, Cu-50WC and Cu-75WC samples exhibited the electrical conductivity values of 44.5, 17.7 and 3.1%IACS, respectively, the hardness of 43.4, 58.1 and 70.5 HR_B, respectively, and the density of 7.6, 9.6 and 10.2 g/cm^3, respectively. The hot forged samples of Cu-20WC for 75% reduction of the thickness exhibited the conductivity values at 65.8%, the hardness of 81.7 HR_B and the density of 8.6 g/cm^3. For the cold forged samples of Cu-20WC for 75% reduction of thickness exhibited the conductivity values at 62.7%, the hardness of 87.4 HR_B and the density of 8.8 g/cm^3. It could be concluded that, the effect of the tungsten carbide contents increased the hardness; however, it reduced the electrical conductivity of copper-based samples. The electrical conductivity, hardness and density of copper-based samples were increased with increasing the forging contents.

Keyword: Contact Materials/ Copper Alloys/ Electrical Conductivity/ Hardness / Tungsten Carbide

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยเรื่องอิทธิพลของทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มทองแดงเป็นส่วนผสมหลักในครั้งนี้กว่าจะสำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยได้พบกับปัญหาต่างๆ มากมายในการปฏิบัติงาน ขณะเดียวกันปัญหามากมายดังกล่าวได้ก่อให้เกิดการเรียนรู้ การแก้ปัญหาระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนได้ประสบการณ์ใหม่ๆ ในการทำงาน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. สิริพร โรจนนันต์ และผศ. ดร. สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษา ให้เกิดกระบวนการคิด ด้านการทำงาน การติดต่อประสานงาน การแก้ปัญหาขณะทำการวิจัย การดำเนินชีวิตประจำวันรวมถึงความรู้ทั้งด้านวิชาการ คุณธรรมและจริยธรรม รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่คอยให้คำแนะนำ ประสิทธิ์ประสาทวิชาการทั้งในด้านการทำงานและการใช้ชีวิต นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. ชาญเดช พิสิษฐ์ไพบูลย์ และดร. เอกพล ศิวพรเสถียร สำหรับคำแนะนำในการนำสิ่งที่ได้เรียนรู้จากการทำวิจัยไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำงานในชีวิตประจำวัน และความกรุณาในการสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ ดร. เรืองเดช ธงศรี สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทำวิจัยและให้คำชี้แนะการวิเคราะห์ผลครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณเดวิช ชนนิยม สำหรับคำแนะนำในการใช้และซ่อมเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจในการทำงาน ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมาจนสามารถทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่ก่อเกิดจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ญ

บทที่

1.	**บทนำ**	1
1.1	ความสำคัญและปัญหาของงานวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2.	**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	5
2.1	วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า	5
2.2	สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงและทังสเตนคาร์ไบด์	9
2.3	กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะผง	12
2.4	การทุบขึ้นรูป	21
2.5	การนำไฟฟ้าของวัสดุ	22
2.6	ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	26
2.7	ความแข็งแรงของวัสดุ	29
2.8	การทดสอบความแข็งของวัสดุ	31
2.9	หลักการทำงานของอีดีเอ็ม	37
2.10	การสึกหรอของวัสดุ	39

3. การดำเนินงานวิจัย 42

3.1 การศึกษาขนาดและรูปร่างผงโลหะ 43

3.2 การผสมผงและอัดขึ้นรูป 43

3.3 การอบผนึก 45

3.4 การทุบขึ้นรูป 45

3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค 47

3.6 การทดสอบการนำไฟฟ้า 47

3.7 การทดสอบความแข็ง 48

3.8 การหาความหนาแน่น 49

3.9 การทดสอบความหยาบผิว 50

3.10 การทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์ค 52

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 54

4.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของผงโลหะ 54

4.2 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) 61

4.3 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-WC 64

4.4 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูป 68

4.5 ผลการทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์ค 73

4.6 ผลการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการสปาร์ค 77

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการสปาร์ค 83

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ 87

5.1 สรุปผล 87

5.2 ข้อเสนอแนะ 88

เอกสารอ้างอิง 89

ภาคผนวก 94

ก ผลการทดสอบการนำไฟฟ้า 94

ข ผลการทดสอบความแข็ง 97

ค ผลการทดสอบความหนาแน่น 100

ง ผลการทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์ค 102

จ ผลการทดสอบค่าความหยาบผิว 105

ประวัติผู้วิจัย 108

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ข้อจำกัดของเครื่องมือผสมผงของแต่ละประเภท	16
2.2	สเกลการทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์ แสดงชนิดหัวกด และน้ำหนักกดหลัก	34
4.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีทังสเตนคาร์ไบด์เป็นส่วนผสมถ่ายด้วย กล้องจุลทรรศน์แสง	59
4.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี WC-12Co เป็นส่วนผสมถ่ายด้วย กล้องจุลทรรศน์แสง	60
4.3	ตารางเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกายภาพของวัสดุหน้าสัมผัสที่มีส่วนผสม ของ Ag-WC ที่ผลิตด้วยวิธี Infiltration ตามมาตรฐาน ASTM B663-94(2006)	76
4.4	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็นที่ผ่านการสปาร์คหยาบ	85
4.5	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนที่ผ่านการสปาร์คละเอียด	86
ก.1	ผลการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานหลังอบผนึก	95
ก.2	ผลการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานส่วนผสม Cu-20WC ที่ผ่านการทุบขึ้นรูป	96
ข.1	ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานหลังอบผนึก	98
ข.2	ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC ที่ผ่านการทุบขึ้นรูป	99
ค.1	ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบผนึก	101
ค.2	ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่าน การทุบขึ้นรูปร้อน	101
ค.3	ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่าน การทุบขึ้นรูปเย็น	101
ง.1	ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงาน Cu-50WC และ Cu-20WC หลังผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด	103
ง.2	ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงาน Cu-20WC ทุบขึ้นรูปเย็น หลังผ่านการ สปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด	103
ง.3	ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงาน Cu-20WC ทุบขึ้นรูปร้อน หลังผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด	104

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

จ.1 ผลการทดสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC ที่ผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด 106

จ.2 ผลการทดสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็น Cu-20WC ที่ผ่านการสปาร์คละเอียด 106

จ.3 ผลการทดสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็น Cu-20WC ที่ผ่านการสปาร์คหยาบ 107

จ.4 ผลการทดสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อน Cu-20WC ที่ผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด 107

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แผนภูมิจำแนกประเภทหน้าสัมผัสไฟฟ้าจากส่วนผสมทางเคมี	6
2.2	ปริมาณธาตุผสมที่เติมต่อค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง	7
2.3	ลักษณะรูปร่างของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า	9
2.4	ลักษณะรูปร่างผงที่ได้จากวิธี Atomization ด้วยก๊าซและน้ำ	10
2.5	ลักษณะรูปร่างผงทองแดงที่ได้จากวิธี Electrolysis	10
2.6	ลักษณะรูปร่างผงทังสเตนคาร์ไบด์	11
2.7	ประเภทของการผสมผงด้วยลูกบด	13
2.8	ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดภายในเครื่องบด	14
2.9	เครื่องมือที่ใช้ในการผสมผง	15
2.10	การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว	18
2.11	การอัดขึ้นรูปแบบ Cold Isostatic Pressing	19
2.12	การเปลี่ยนรูปคอคอดในสถานะของแข็งระหว่างการอบผนึกอนุภาคทรงกลม	20
2.13	การเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างขณะทำการอบผนึกทั้ง 3 ขั้นตอน	20
2.14	ลักษณะการทุบขึ้นรูปเมื่อแบ่งตามลักษณะแม่พิมพ์	21
2.15	แบบจำลองการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน	22
2.16	แบบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน	23
2.17	ระดับพลังงานชั้นย่อยของอะตอมโดยเรียงตามลำดับพลังงาน	24
2.18	การเกิดกระแสเหนี่ยวนำบนแผ่นวัตถุตัวนำ	25
2.19	กระแสไหลวนบนวัตถุตัวนำ	25
2.20	ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด	27
2.21	ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเส้น	28
2.22	ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบระนาบ	29
2.23	ลักษณะของอะตอมที่เกิดเป็นสารละลายของแข็ง	30
2.24	การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและความเหนียวเมื่อปริมาณการขึ้นรูปเย็นเปลี่ยนไป	31
2.25	การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	32
2.26	หลักการคิดค่าความแข็งแบบรอคเวลล์จากความลึกของรอยกด	33
2.27	ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ส	35
2.28	การหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยจากเส้นทแยงมุมในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา	36

รูป(ต่อ) **หน้า**

2.29	ลักษณะการแยกอนุภาควัสดุด้วยอีดีเอ็ม	38
2.30	ลักษณะการเกิดการสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ	39
2.31	ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างของคู่ผิวสัมผัสกับการสึกหรอ	40
3.1	แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	42
3.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด JEOL รุ่น JSM-5800	43
3.3	ลักษณะการผสมผงด้วยเครื่องกลิ้ง	44
3.4	เครื่องอัดไฮโดรลิก ENERPAC รุ่น RC1010	44
3.5	เตาอบอุณหภูมิสูง Linn High Term รุ่น HT 1600	45
3.6	เครื่องทุบ SANES รุ่น SHF 400	46
3.7	ลักษณะชิ้นงานหลังทำการทุบขึ้นรูปเพื่อลดความหนา	46
3.8	กล้องจุลทรรศน์แสง Olympus รุ่น BX-60M	47
3.9	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า Foerster รุ่น Sigma test 2.069	48
3.10	เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น CV-700	48
3.11	ตำแหน่งการวัดความแข็งของชิ้นงาน	49
3.12	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยลวด	49
3.13	เครื่องวัดความหนาแน่น AND รุ่น GF-600	50
3.14	เครื่องวัดความหยาบผิว DIAVITE รุ่น DH-7 47	51
3.15	ลักษณะการวางตัวของหัววัดความหยาบผิวบนชิ้นงาน	51
3.16	การหาความเรียบผิวเฉลี่ย	51
3.17	เครื่องอีดีเอ็ม Sodick Mark X EPOC2	52
3.18	ลักษณะการจับอิเล็กโทรดและการวางตัวรองรับการทดสอบ	52
3.19	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล METTLER TOLEDER รุ่น XP-204	53
4.1	ลักษณะของผงทองแดงถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	54
4.2	ลักษณะผงทังสเตนคาร์ไบด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	55
4.3	ลักษณะของผง WC-12Co ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	55
4.4	ลักษณะทางกายภาพของผงทองแดงกับทังสเตนคาร์ไบด์ที่สัดส่วนต่างกัน	56
4.5	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังผ่านการอบผนึก	56
4.6	ลักษณะการกระจายตัวของผง WC ในชิ้นงาน Cu-WC ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	57
4.7	ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	61

รูป(ต่อ) **หน้า**

4.8	ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	62
4.9	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	63
4.10	ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	64
4.11	ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	65
4.12	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก	66
4.13	ลักษณะของชิ้นงานหลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น	68
4.14	ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น	69
4.15	ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น	70
4.16	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อน และทุบขึ้นรูปเย็น	71
4.17	อัตราการสึกกร่อนของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบผนึก ผ่านการสปาร์ค	73
4.18	อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึก ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น	74
4.19	อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึก ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น	75
4.20	อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึกที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อน	76
4.21	อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึกที่ผ่านการทุบขึ้นรูปเย็น	76
4.22	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบผนึก	78
4.23	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบผนึก	78
4.24	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC	79
4.25	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC	80
4.26	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนการสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC	81
4.27	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC	82
4.28	โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึก	83