



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบ
ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค
ของโลหะผงเหล็ก-ทองแดงอัดขึ้นรูป

โดย ผศ. ดร. ศุภชัย สุรพันธ์ และ คณะ

30 มิถุนายน 2547

สัญญาเลขที่ PDF/30/2543

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบ
ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค
ของโลหะผงเหล็ก-ทองแดงอัดขึ้นรูป

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ. ดร. ศุภชัย สุรพันธ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ -
Prof. Dr. Yoshiharu Mutoh Nagaoka University of Technology

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ PDF/30/2543
ชื่อโครงการ อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบต่อคุณสมบัติทางกล
และโครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็ก-ทองแดงอัดขึ้นรูป
ชื่อนักวิจัยและสถาบัน ผศ. ดร. ศุภชัย สุรพันธ์ (ssupacha@engr.tu.ac.th)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ระยะเวลาโครงการ 1 กรกฎาคม 2543 – 30 มิถุนายน 2545
ขยายระยะเวลาโครงการ ถึง 30 มิถุนายน 2547

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ผลิตจากโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูป ซึ่งมีองค์ประกอบแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu และ Fe-1.2%C-0.01%Cu โลหะผงถูกอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปในโรงงานอุตสาหกรรม มีรูปร่างเป็นแท่งยาวหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 10.5x10.5x56 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก 37.4 กรัม ความหนาแน่น 6.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการทดลองโดยการอบชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ควบคุมบรรยากาศภายในเตาด้วยก๊าซอาร์กอน และใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้มาเตรียมเป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงชิ้นงานด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที และทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อที่จะอธิบายถึงกลไกที่ทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไป ชิ้นงานอีกส่วนหนึ่งอบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมงนำไปทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าด้วยค่าความถี่ 30 รอบต่อวินาที ที่สัดส่วนความเค้น -1 และตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ผลจากการทดสอบความสามารถด้านทานแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิด มีค่าเกือบคงที่ เมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงานชนิดที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 300, 390 และ 350 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความเหนียวมีค่าร้อยละ 3.6, 3.7 และ 3.2 ตามลำดับ การเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มาก โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วยเฟสของเฟอร์ไรต์เป็นส่วนใหญ่ การอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนมีปริมาณน้อยลง ค่าความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้าของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด มีค่า 130, 150 และ 120 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ ภาพแสดงรอยแตกที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงให้เห็นการแตกหักเริ่มที่รูพรุนในเนื้อชิ้นงาน ลักษณะรอยแตกแบบเปราะกระจายไปตามขอบเกรน

คำหลัก : โลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูป การทดสอบแรงดึง การทดสอบความล้า โครงสร้างจุลภาค

ABSTRACT

Project Code: PDF/30/2543
Project Title: The Effects of Sintering Temperature and Time on Mechanical Properties and Microstructure of Fe-Cu Base Alloys
Investigator: Asst. Prof. Dr. Supachai Surapunt, ssupacha@engr.tu.ac.th
Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand
Project Period: July 1, 2000 – June 30, 2002
Extension Period: June 30, 2004

The purpose of this research is to study the factors of sintering temperature and time that effect on the mechanical properties and microstructure of 3 sintered steels, which are Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu and Fe-1.2%C-0.01%Cu. The samples were pressed to a rectangular bar with the size of 10.5x10.5x56 mm by using a compacting press machine, weight and apparent density of which were 37.4 g and 6.4 g/cm², respectively. The compacts were heated in argon gas atmosphere at 900, 1000, 1100, 1150 and 1200°C for 1 and 2 hours. Standard tensile specimens were machined from the sintered samples and the tensile tests were carried out at the crosshead speed of 1 mm/min. The microstructures of sintered alloys under various sintering temperatures have been observed in order to explain mechanical behavior of test samples. In addition, the sintered alloys at 1200°C for 1 hour were machined for fatigue standard specimens. The test was carried out at the frequency of 30 cycles and the stress ratio of -1. The fracture surface was observed by scanning electron microscope.

Experiment results revealed that tensile strength for the 3 kinds of specimens were almost constant when sintering the samples at over 1100°C. The average number of tensile strength was 300, 390 and 350 MPa, respectively, and the average ductility was at 3.6%, 3.7% and 3.2%, respectively. The values of tensile strength slightly increased with increasing sintering time for 2 hours. Microstructures of the 3 kinds of specimens composed mainly of pearlite phase. The densities of the specimens increased with increasing sintering temperature due to decreasing number of pore. The fatigue limits of the three sintered alloy was at 130, 150 and 120 MPa, respectively. The micrograph of fracture surface revealed crack initiated from pores inside the specimen and brittle crack growth along the grain boundary.

Keywords: Powder metallurgy, Sintered steels, Tensile test, Fatigue Test, Microstructure

อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบต่อคุณสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็ก-ทองแดงอัดขึ้นรูป

1. บทนำ

ในปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายสนับสนุนให้มีการลงทุนในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ภายในประเทศ เพื่อลดการนำเข้าและเป็นการสร้างงานภายในประเทศ การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่สำคัญยังคงใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งทำให้การลงทุนส่วนใหญ่เป็นของชาวต่างประเทศที่นำเทคโนโลยีและเครื่องจักรกลมาลงทุนและพัฒนาการผลิต การลงทุนโดยคนไทยต้องนำเข้าเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตจากต่างประเทศ และซื้อวัตถุดิบราคาแพง การขาดความรู้พื้นฐานทางเทคโนโลยีจึงเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งในการพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทย

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยกรรมวิธีโลหะผงอัดขึ้นรูปและอบที่อุณหภูมิสูงเป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมานานมากกว่า 50 ปี ใช้ได้กับโลหะผงหลายชนิด ได้แก่ โลหะผงเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม

เหล็กกล้าเป็นโลหะพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ต้องการความเหนียวและความแข็งแรงสูง ในอดีตที่ผ่านมาใช้กรรมวิธีการผลิตโดยการหล่อขึ้นรูปและนำมากลึงให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการ กรรมวิธีนี้ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติที่ดี แต่มีขั้นตอนในการผลิตหลายขั้นตอนทำให้ยุ่งยากซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตชิ้นงานโดยใช้โลหะผงอัดขึ้นรูปได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากทำให้สามารถพัฒนาการผลิตให้รวดเร็วมากขึ้น ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เป็นเทคโนโลยีที่มีความสะอาดใช้พื้นที่โรงงานน้อยกว่าเทคโนโลยีการหล่อโลหะ แต่การผลิตชิ้นงานจากโลหะผงอัดขึ้นรูปชิ้นงานยังคงมีจุดอ่อนคือความแข็งแรงและความเหนียวน้อยกว่าชิ้นงานผลิตจากงานหล่อขึ้นรูป

โลหะเหล็กผสมทองแดงที่มีคาร์บอนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.3 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ และมีทองแดงอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นโลหะผสมพื้นฐานที่สำคัญและใช้มากในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยกรรมวิธีโลหะผงอัดขึ้นรูปและอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ความแข็งแรงของชิ้นงานเกิดขึ้นจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ลักษณะและขนาดของอนุภาคโลหะ แรงอัดที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน และอัตราเร็วในการเย็นตัวของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงอัดขึ้นรูปได้พัฒนาไปมากแล้วแต่ข้อมูลพื้นฐานหลายชนิดยังคงเป็นความลับทางเทคโนโลยีสำหรับการผลิตของแต่ละบริษัท ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้ว ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงและความเหนียวให้ได้มากที่สุด ยังคงเป็นข้อมูลที่ยังไม่มีมีการเผยแพร่ในอุตสาหกรรมการผลิตทำให้การผลิตของบริษัทโดยทั่วไปหรือบริษัทที่เริ่มก่อตั้งไม่สามารถปรับปรุงการผลิตให้ดีที่สุดได้และไม่มีข้อข้อมูลในการวิเคราะห์หาสาเหตุข้อบกพร่องที่เกิดจาก

การผลิตได้ถูกต้อง เมื่อมีความเสียหายที่เกิดจากการผลิตในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงานมีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่สำคัญได้แก่ความแข็งแรงและความล้าของชิ้นงานทดสอบและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กผสมทองแดง เพื่อให้ทราบถึงเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการผลิตชิ้นงานและเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

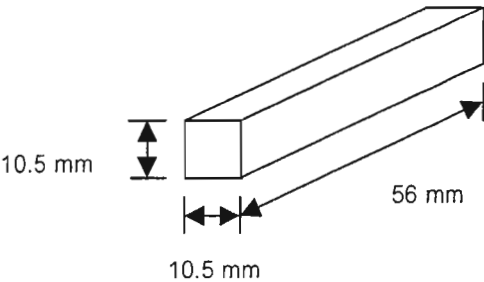
2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงาน

โลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน-ทองแดงที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบแตกต่างกัน 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 นำโลหะผสมไปอัดขึ้นรูปเป็นแท่งยาวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10.5x10.5x56 มิลลิเมตร ที่โรงงานผลิตชิ้นงานโลหะอัดขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดโลหะผสมที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต โดยใช้แบบที่มีการเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน 6.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 37.4 กรัม ดังแสดงตามรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน-ทองแดง

ชนิดผสมโลหะ	ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณทองแดง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	0.6	1.7
2	0.8	2.1
3	1.2	0.01

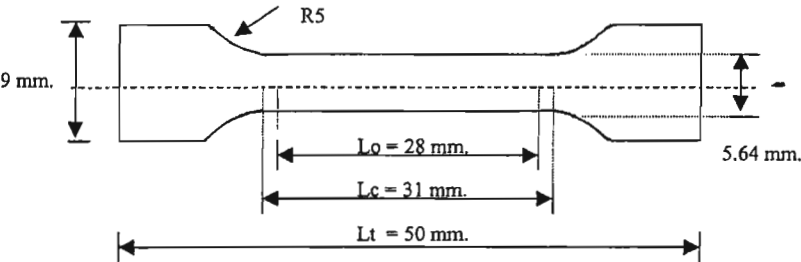


รูปที่ 1 แสดงขนาดของโลหะอัดขึ้นรูปก่อนที่จะทำการอบ

นำชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมที่ได้จากการอัดขึ้นรูปไปอบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ควบคุมบรรยากาศภายในเตาด้วยก๊าซอาร์กอนเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ และปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนลงมาที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาเก็บไว้ในภาชนะในสภาวะสุญญากาศเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

2.2 การทดสอบชิ้นงาน

นำชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมที่ผ่านการอบแล้วไปกลึงขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง มีช่วงความยาวส่วนยึด(Gage length) 28 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช่วงส่วนยึด(Gage length) 5.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ก่อนทำการทดสอบ ชัดผิวชิ้นงานให้เรียบเพื่อป้องกันการแตกหักเนื่องจากรอยที่เกิดจากการกลึงขึ้นรูป ทำการทดสอบแรงดึง โดยการดึงชิ้นงานด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อที่จะอธิบายถึงกลไกที่ทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไป



รูปที่ 2 แสดงขนาดของชิ้นงานมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงดึง

การทดสอบความล้า ใช้ชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปแท่งสี่เหลี่ยมขนาด10.5x10.5x56 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมบรรยากาศภายในเตาด้วยก๊าซอาร์กอน นำชิ้นงานที่ได้มากลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบความล้า ก่อนการทดสอบแต่ละชิ้นงานทำการขัดผิวละเอียดอีกครั้งด้วยกระดาษทรายละเอียดและตรวจสอบจนไม่มีรอยขีดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ทำการทดสอบความล้าด้วยค่าความถี่ 30 รอบต่อวินาที ที่สัดส่วนความเค้น -1

3. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การทดสอบแรงดึง

ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบซึ่งวัดในลักษณะการทดสอบแรงดึง กับอุณหภูมิในการอบ สำหรับโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 โลหะผงเหล็กที่มีองค์ประกอบ คาร์บอนร้อยละ 0.6 และทองแดงร้อยละ 1.7 (Fe-0.6%C-1.7%Cu) ชนิดที่ 2 โลหะผงเหล็กที่มีองค์ประกอบ คาร์บอนร้อยละ 0.8 และทองแดงร้อยละ 2.1 (Fe-0.8%C-2.1%Cu) และ ชนิดที่ 3 โลหะผงเหล็กที่มีองค์ประกอบ คาร์บอนร้อยละ 1.2 และทองแดงร้อยละ 0.01 (Fe-1.2%C-0.01%Cu) แสดงพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมาก และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่อบที่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย หรือเกือบคงที่ การเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มาก ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการอบ 1 และ 2 ชั่วโมง และค่าเฉลี่ยความเหนียวของชิ้นงานแต่ละชนิดที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2 , 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด โอบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของชิ้นงาน	ความแข็งแรง(แมกกะปาสคาล)				
	900 °C	1000 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C
Fe-0.6%C-1.7%Cu	180	250	285	300	310
Fe-0.8%C-2.1%Cu	210	300	386	392	390
Fe-1.2%C-0.02%Cu	207	285	318	354	365

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด โอบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

ชนิดของชิ้นงาน	ความแข็งแรง(แมกกะปาสคาล)				
	900 °C	1000 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C
Fe-0.6%C-1.7%Cu	186	258	293	309	318
Fe-0.8%C-2.1%Cu	218	311	395	401	398
Fe-1.2%C-0.02%Cu	215	294	371	376	379

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยความเหนียวของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด วัดในลักษณะอัตราการยืดตัว
อบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของชิ้นงาน	ความเหนียวหรืออัตราการยืดตัว(เปอร์เซ็นต์)				
	900 °C	1000 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C
Fe-0.6%C-1.7%Cu	2.5	2.9	3.6	3.6	3.6
Fe-0.8%C-2.1%Cu	2.7	3.2	3.8	3.7	3.7
Fe-1.2%C-0.02%Cu	2.0	2.5	3.2	3.3	3.1

ชิ้นงานทดสอบชนิดที่ 1 (Fe-0.6%C-1.7%Cu) ใช้เวลาอบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 180 เป็น 250 แมกกะปาสคาล และเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 285, 300 และ 310 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ การอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นไม่มากและเกือบจะคงที่ที่ประมาณค่า 295 แมกกะปาสคาล การเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มาก ค่าความเหนียวของชิ้นงานที่อบในช่วงอุณหภูมิ 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส มีค่า 3.6 เปอร์เซนต์

ชิ้นงานทดสอบชนิดที่ 2 (Fe-0.8%C-2.1%Cu) ใช้เวลาอบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 210 เป็น 300 แมกกะปาสคาล และเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 386, 392 และ 390 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ การอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นไม่มากและเกือบจะคงที่ที่ประมาณค่า 390 แมกกะปาสคาล การเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มาก ค่าความเหนียวของชิ้นงานที่อบในช่วงอุณหภูมิ 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส มีค่า 3.7 เปอร์เซนต์

ชิ้นงานทดสอบชนิดที่ 3 (Fe-1.2%C-0.02%Cu) ใช้เวลาอบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 207 เป็น 285 แมกกะปาสคาล และเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 318, 354 และ 365 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ การอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นไม่มากและเกือบจะคงที่ที่ประมาณค่า 350 แมกกะปาสคาล การเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มาก ค่าความเหนียวของชิ้นงานที่อบในช่วงอุณหภูมิ 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส มีค่า 3.2 เปอร์เซนต์

3.2 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด ที่มีองค์ประกอบ Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu, และ Fe-1.2%C-0.01%Cu อบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

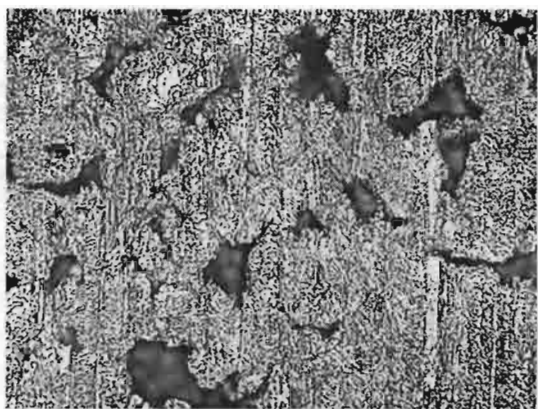
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูป Fe-0.6%C-1.7%Cu ประกอบด้วยเฟสของเพียร์ไลต์เป็นส่วนใหญ่ และ เฟสของเฟอร์ไรต์เล็กน้อย โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูป Fe-0.8%C-2.1%Cu ประกอบด้วยเฟสของเพียร์ไลต์เป็นส่วนใหญ่ และ เฟสของซีเมนไทต์เล็กน้อย โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูป Fe-1.2%C-0.01%Cu ประกอบด้วยเฟสของเพียร์ไลต์ และ เฟสของซีเมนไทต์ในปริมาณที่มากขึ้น ชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เกรนของเพียร์ไลต์มีขนาดละเอียดเนื่องจากอัตราการแพร่ที่อุณหภูมิต่ำเกิดขึ้นไม่สูงมาก พบเกรนของโลหะทองแดงที่ยังไม่หลอมละลาย และมีรูพรุนขนาดใหญ่ลักษณะปลายแหลมเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าไม่สูงมาก การอบที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว พบว่าปริมาณของรูพรุนลดน้อยลง ขนาดของรูพรุนเล็กลงและมีลักษณะกลมมนมากขึ้น ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันเฟสของเพียร์ไลต์มีขนาดใหญ่มากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ไม่มากในการอบที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส

3.3 การทดสอบความล้า

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเค้นและจำนวนรอบของการทดสอบของชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5 จุดที่มีลูกศรแสดงถึงชิ้นงานที่ไม่มีการแตกหักที่จำนวนรอบ 10^7 รอบ ค่าของความเค้นที่ทนต่อการแตกหัก มีค่า 130, 150 และ 120 แมกกะปาสคาล สำหรับชิ้นงาน Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu และ Fe-1.2%C-0.02%Cu ตามลำดับ

จากผลของการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าความเค้นที่ทนต่อการแตกหักของชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปชนิด Fe-0.8%C-2.1%Cu มีค่าสูงสุดเนื่องจากมีธาตุคาร์บอนผสมประมาณร้อยละ 0.8 ทำให้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟสของเพียร์ไลต์ ทั้งหมด ซึ่งมีความแข็งแรงสูงมาก และ การที่มีทองแดงผสมร้อยละ 2.1 ในปริมาณที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิด โลหะทองแดงที่หลอมละลายเมื่ออบตั้งแต่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมของเหล็กในสภาพสารละลายของแข็ง ทำให้ลดการหดตัวของเนื้อเหล็ก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนลดน้อยลงและมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น

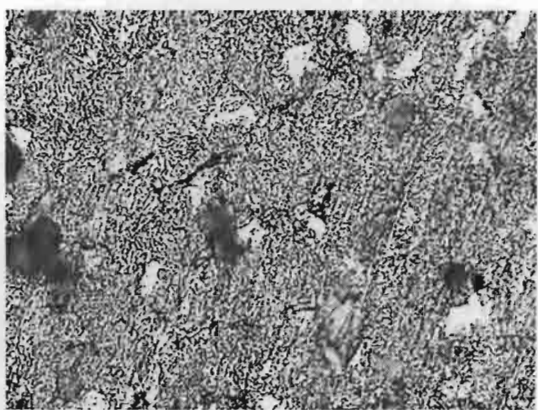
ค่าความเค้นที่ทนต่อการแตกหักของชิ้นงาน Fe-0.6%C-1.7%Cu มีค่าต่ำลงมาเป็นอันดับที่ 2 เนื่องจากชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.6 ใกล้เคียงกับปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคตอย ทำให้มีโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นเฟสของเพียร์ไลต์และมีเฟสเฟอร์ไรต์ในปริมาณเล็กน้อย โครงสร้างจุลภาคชนิดนี้มีความแข็งแรงลดน้อยลงมา และการที่มีปริมาณทองแดงผสมในปริมาณที่สูง



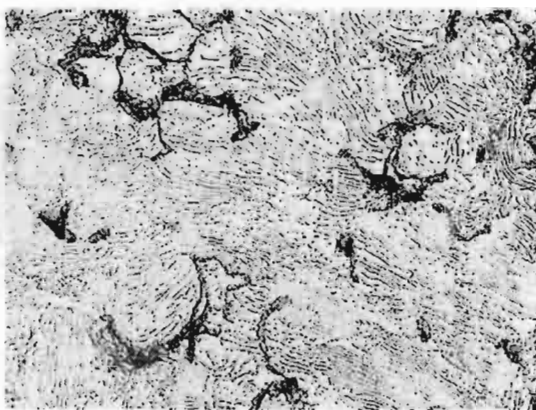
อบที่ 900 องศาเซลเซียส



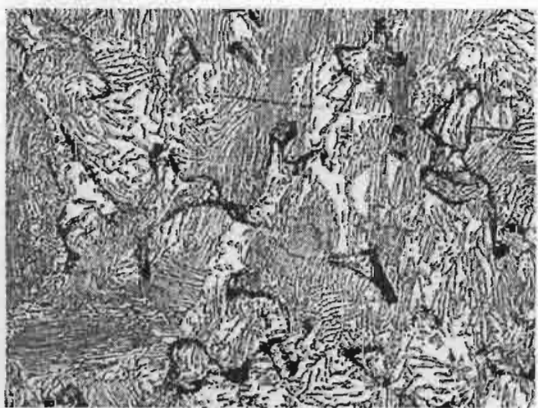
อบที่ 1000 องศาเซลเซียส



อบที่ 1100 องศาเซลเซียส

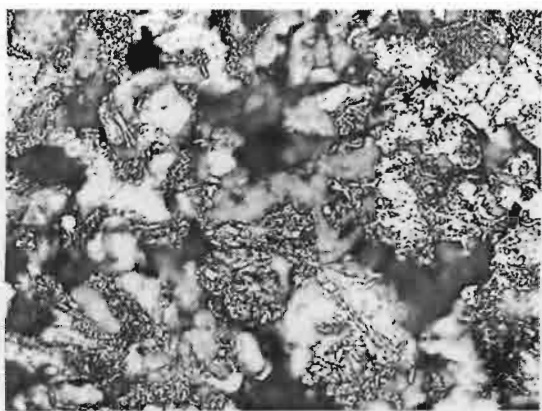


อบที่ 1150 องศาเซลเซียส

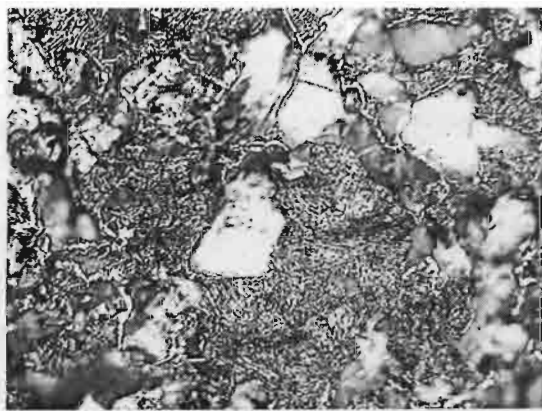


อบที่ 1200 องศาเซลเซียส

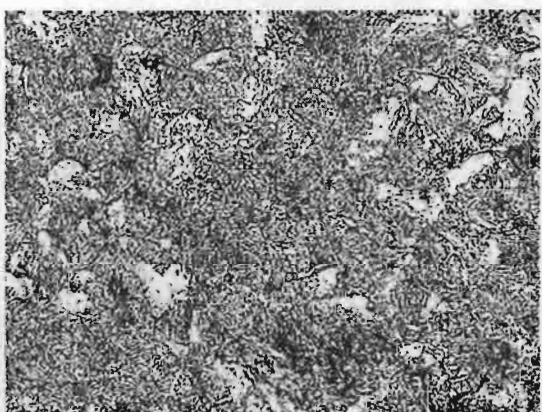
ภาพที่ 1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปชนิดที่ 1 ($\text{Fe-0.6\%C-1.7\%Cu}$) อบที่
อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



อบที่ 900 องศาเซลเซียส



อบที่ 1000 องศาเซลเซียส



อบที่ 1100 องศาเซลเซียส



อบที่ 1150 องศาเซลเซียส



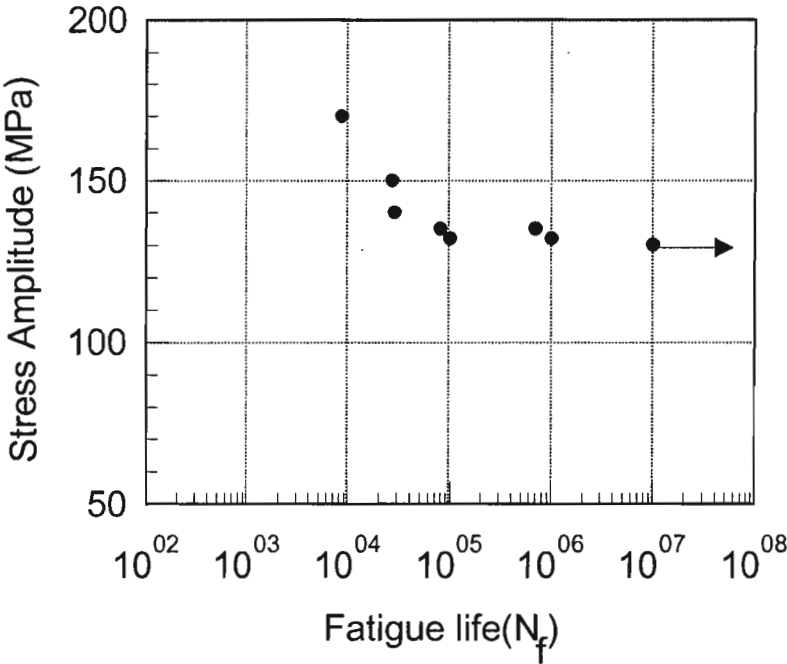
อบที่ 1200 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปชนิดที่ 3 (Fe-1.2%C-0.01%Cu) อบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

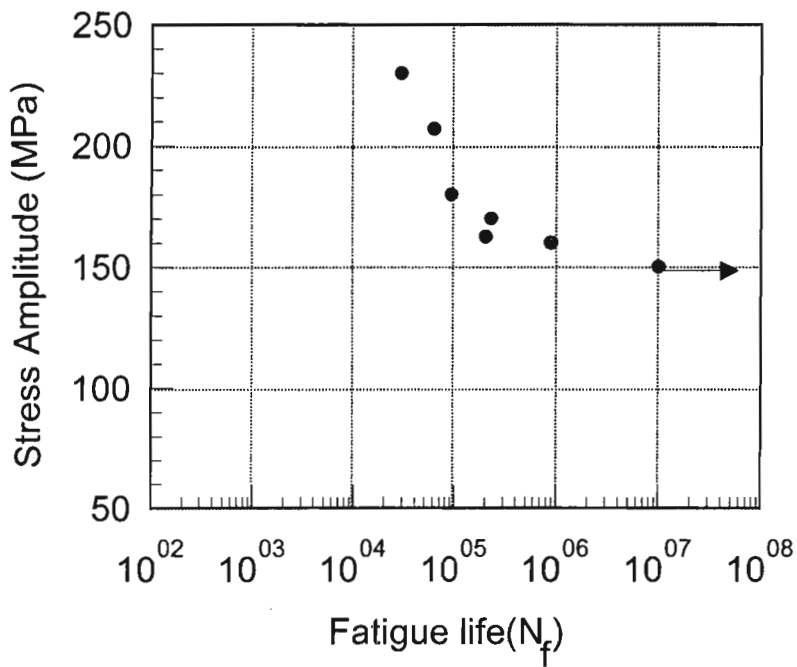
ประมาณร้อยละ 1.7 ทำให้ปริมาณรูพรุนลดน้อยลงและลักษณะของรูพรุนกลมมนได้ดีในระดับที่ต่ำกว่าชิ้นงานชนิด Fe-0.8%C-2.1%Cu

ค่าความเค้นที่ทนต่อการแตกหักที่มีค่าต่ำลงมาเป็นอันดับที่ 3 คือค่าความเค้นของชิ้นงาน Fe-1.2%C-0.02%Cu เนื่องจากชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 1.2 มากกว่าปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคตอย ทำให้มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสของเพิร์ไลต์และซีเมนไทต์ ทำให้โครงสร้างจุลภาคชนิดนี้มีความแข็งแรงมากที่สุด และการที่มีปริมาณทองแดงผสมในปริมาณที่น้อยมากประมาณร้อยละ 0.02 ทำให้มีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นมากและลักษณะของรูพรุนที่มีปลายแหลมคมจึงทำให้ค่าความเค้นที่ทนต่อการแตกหักมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผงอัดขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด

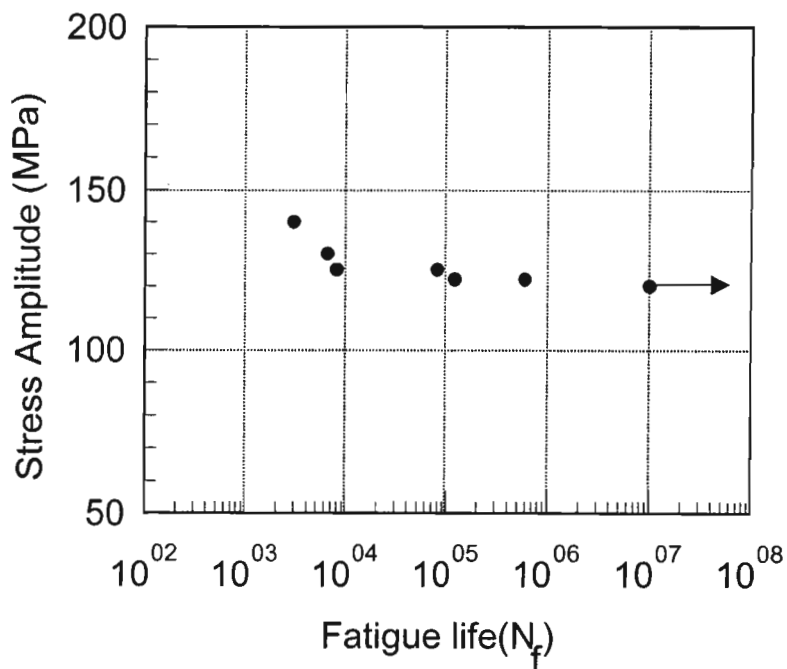
ภาพแสดงรอยแตกที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของชิ้นงาน Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu และ Fe-1.2%C-0.02%Cu แสดงในภาพที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ แสดงให้เห็นการแตกหักเริ่มที่รูพรุนในเนื้อชิ้นงาน ลักษณะรอยแตกแบบเปราะกระจายไปตามขอบเกรน



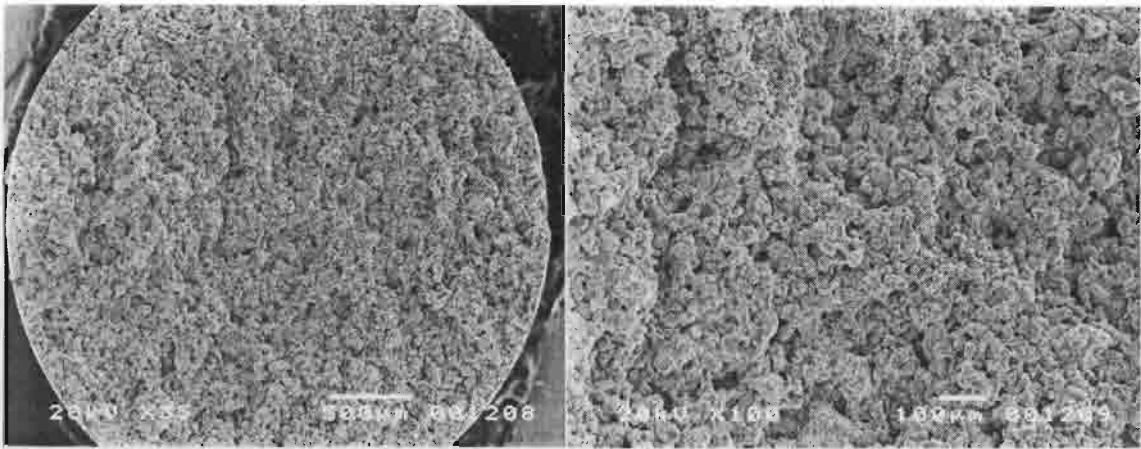
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความเค้นและจำนวนรอบของการทดสอบของชิ้นงานทดสอบ Fe-0.6%C-1.7%Cu



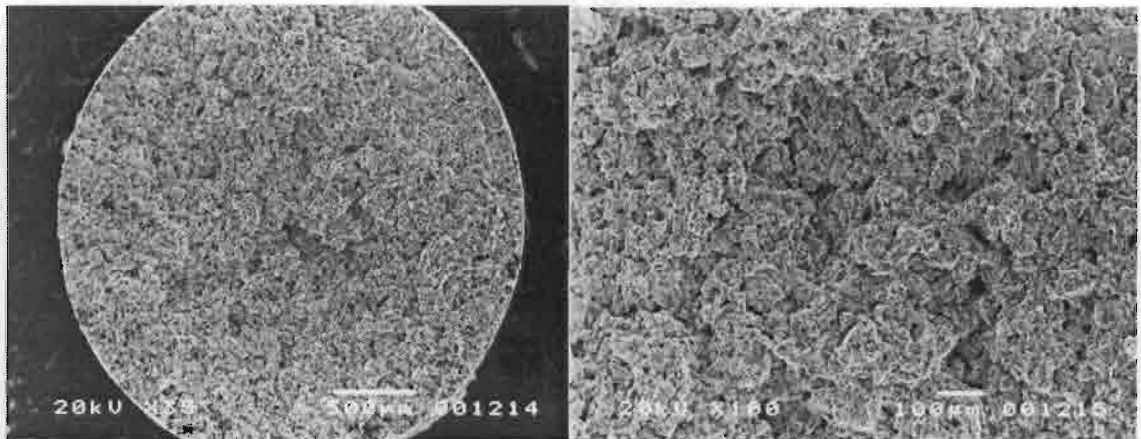
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความเค้นและจำนวนรอบของการทดสอบ
ของชิ้นงานทดสอบ Fe-0.8%C-2.1%Cu



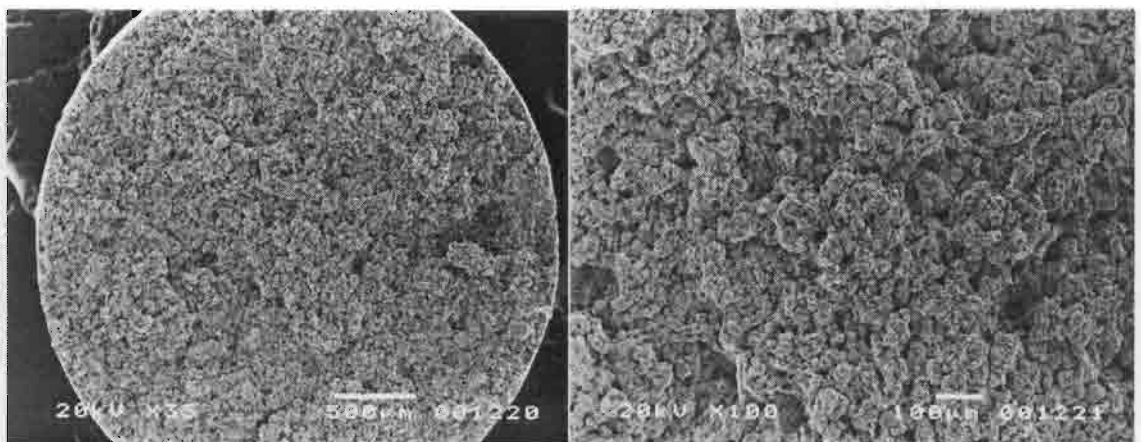
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความเค้นและจำนวนรอบของการทดสอบ
ของชิ้นงานทดสอบ Fe-1.2%C-0.01%Cu



ภาพที่ 4 แสดงรอยแตกหักของชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปที่มีองค์ประกอบ Fe-0.6%C-1.7%Cu
อบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานแตกหักในสภาวะความเค้น 125 แมกกะปาสคาล



ภาพที่ 5 แสดงรอยแตกหักของชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปที่มีองค์ประกอบ Fe-0.8%C-2.1%Cu
อบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานแตกหักในสภาวะความเค้น 162 แมกกะปาสคาล



ภาพที่ 6 แสดงรอยแตกหักของชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปที่มีองค์ประกอบ Fe-1.2%C-0.01%Cu
อบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานแตกหักในสภาวะความเค้น 140 แมกกะปาสคาล

4. สรุปผลการทดลอง

โลหะผงเหล็กผสมทองแดงอัดขึ้นรูป 3 ชนิด ที่มีองค์ประกอบคาร์บอนร้อยละ 0.6 และทองแดงร้อยละ 1.7 (Fe-0.6%C-1.7%Cu), คาร์บอนร้อยละ 0.8 และทองแดงร้อยละ 2.1 (Fe-0.8%C-2.1%Cu) และ คาร์บอนร้อยละ 1.2 และทองแดงร้อยละ 0.01 (Fe-1.2%C-0.01%Cu) ทำการอบที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค สามารถที่จะสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- 1) อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการอบชิ้นงานโลหะผงเหล็กอัดขึ้นรูปทั้งสามชนิดอยู่ที่ 1150 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแพร่ของอะตอมเหล็กเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและทองแดงหลอมละลายในเนื้อเหล็กในสภาวะสารละลายของแข็ง ทำให้รูพรุนลดน้อย การอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1100 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงจะลดลงอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เนื่องจากโลหะผงทองแดงยังไม่หลอมละลาย และการอบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะทำให้เกิดการแพร่ดีขึ้น แต่เกิดการเติบโตของเกรนในขณะเดียวกันทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่มากและเกือบคงที่
- 2) การเพิ่มเวลาอบชิ้นงานเป็น 2 ชั่วโมงไม่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากเกิดการเติบโตของเกรน
- 3) ค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงาน Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu และ Fe-1.2%C-0.01%Cu ที่อุณหภูมิของการอบ 1150 องศาเซลเซียส มีค่า 300, 392 และ 354 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ และค่าความเหนียวมีค่าร้อยละ 3.6, 3.7 และ 3.3 ตามลำดับ
- 4) ค่าความเค้นที่ทนต่อการแตกหักของชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีค่า 130, 150 และ 120 แมกกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับชิ้นงาน Fe-0.6%C-1.7%Cu, Fe-0.8%C-2.1%Cu และ Fe-1.2%C-0.02%Cu
- 5) การเริ่มต้นของรอยร้าวที่เกิดจากความล้าเกิดจากรูพรุนที่มีลักษณะปลายแหลมเป็นจำนวนมากและขยายตัวไปตามขอบเกรน

หนังสืออ้างอิง

K.V. Sudhakar, "Fatigue Behavior of a High Density Powder Metallurgy Steel." International Journal of Fatigue, 22, 2000, pp. 729-734.

N. Chawla, T.F. Murphy, K.S. Narasimhan, M. Koopman, and K.K. Chawla, "Axial Fatigue Behavior of Binder-Treated versus Diffusion Alloyed Powder Metallurgical Steels." *Materials Science and Engineering*, A308, 2001, pp. 180-188.

Z. Shan and Y. Leng, "Fracture and Fatigue Behavior of Sintered Steel at Elevated Temperature: Part I. Fracture Toughness." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, Vol. 30A, pp. 2885-2892.

Z. Shan and Y. Leng, "Fracture and Fatigue Behavior of Sintered Steel at Elevated Temperature: Part II. Fatigue Crack Propagation." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, Vol. 30A, pp. 2895-2904.

S.J. Polasik, J.J. Williams, and N. Chawla, "Fatigue Crack Initiation and Propagation of Binder-Treated Powder Metallurgy Steels." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, Vol. 33A, pp. 73-81.

G.L. Esperance, S. Martel, A. de Rege, B. Kiefer and Y.T. Chen. "Evaluation of the Effect of Tempering on Microstructure and Properties Three Widely Used Sinter Hardening Alloy." *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials* Vol. 2. 1995, p. 39.

F. Chagnon and Y. Trude. "Effect of Sintering Parameters on Mechanical Properties of Sinter Hardened Material." *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Vol. 2. 1997, p. 94.

Nuria Candela, Francisco Velasco and Jos M. Torralba. "Fracture Mechanisms in Sintered steels with 3.5% (wt.) Mo." *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 259. Issue 1. pp. 98-104.

Jinjun-Lu and Qunji Xue. "Comparison on the microstructure and mechanical strength of a Ni-Based alloy with and without 3 wt.% CeF_3 addition." *Journal of Materials Science and Engineering* Vol. 275. Issue 2. pp. 268-272.

L. Bertini, V. Fontanari, G. Straffellini. "Tensile and Bending Behavior of Sintered Alloys." Experimental Results and Modeling, Journal of Engineering Materials and Technology Vol. 120. July 1998, pp. 248-255.

Daniel H. Herring, Peter T. Hansen. "Heat treatment ferrous P/M parts." Advanced Materials & Processes Vol. 153. July 1998, p. 44.

G. SuskinG I Chepovetsky. "Comparison of vacuum and pressure-assisted sintering of TiB₂-Ni." Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 5. Issue 3. p. 396.

P. Datta G S Upadhyaya. "Effect of sintering variables on the properties of 316L and 434L stainless steels." Industry Heating Vol. 66. Issue 6. p. 37.

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลงานวิจัยบางส่วนได้มีการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการที่จัดขึ้นโดยศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ ในปี พ.ศ. 2545 ซึ่งมีผู้เข้าร่วมสัมมนาประกอบด้วยนักวิชาการและเอกชนที่เป็นเจ้าของกิจการทางด้านโลหะและวัสดุ รวมถึงเจ้าของกิจการทางด้านโลหะผงอัดขึ้นรูป ซึ่งได้รับความสนใจและซักถามข้อมูลต่างๆที่นำเสนอและขออธิบายถึงพฤติกรรมทางกลต่างๆที่เกิดขึ้น ทำให้เข้าใจถึงสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไป ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้รับการติดต่อจากโรงงานที่เกี่ยวข้องหลายครั้งเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และข้อมูลที่ได้จากการทดลองบางส่วนได้นำเสนอให้กับบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านวัสดุที่ใช้ในการทดลองเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิต

ข้อมูลจากการทดสอบเกี่ยวกับความล้าจะนำเสนอในการประชุมสัมมนาเครือข่ายอุตสาหกรรม ที่จะจัดขึ้นที่จังหวัดเชียงใหม่ในเดือนตุลาคม 2547

การตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

กำลังจัดเตรียมต้นฉบับในการตีพิมพ์ เรื่อง Effects of Sintering Parameters and Resultant Microstructure on Mechanical Properties of Sintered Steels ในวารสาร International Journal of Fatigue คาดว่าจะสามารถส่งต้นฉบับได้ภายในเดือน สิงหาคม 2547