

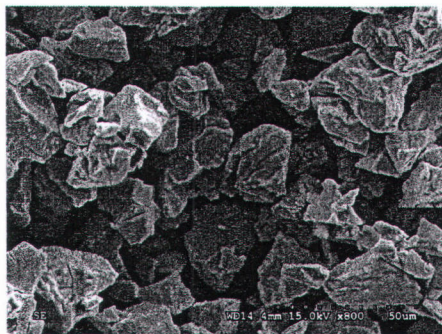
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

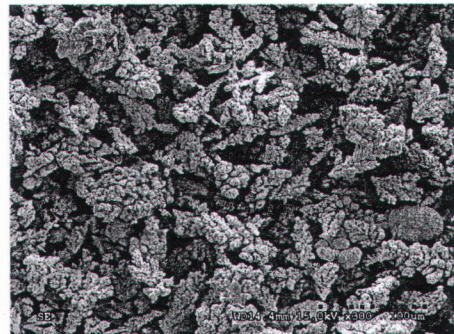
ผลการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ผลวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบจากเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และอุปกรณ์ Energy dispersive spectrometer (EDS) ผลวิเคราะห์ปฏิกิริยาดูดและคายความร้อนระหว่างการให้ความร้อนในการเผาผนึกด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) โครงสร้างจุลภาคโดยใช้ Optical microscope (OM) และ Scanning electron microscope (SEM) และคุณสมบัติทางกลซึ่งแบ่งเป็นความแข็งแรงวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์และความต้านทานการสึกหรอซึ่งทดสอบโดยใช้เครื่อง Tribometer โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขนาดและรูปร่างของผงโลหะ

ผงโลหะที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดได้แก่ ผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.7% ขนาด 29.59 ไมครอน (รูปที่ 4.1.1a) และผงทองแดงความบริสุทธิ์ 99% ขึ้นไป ขนาด 75 ไมครอน (รูปที่ 4.1.1b) ซึ่งผลิตโดยกรรมวิธี Electro-deposition มีลักษณะผงเป็นแบบ dendrite



(a)



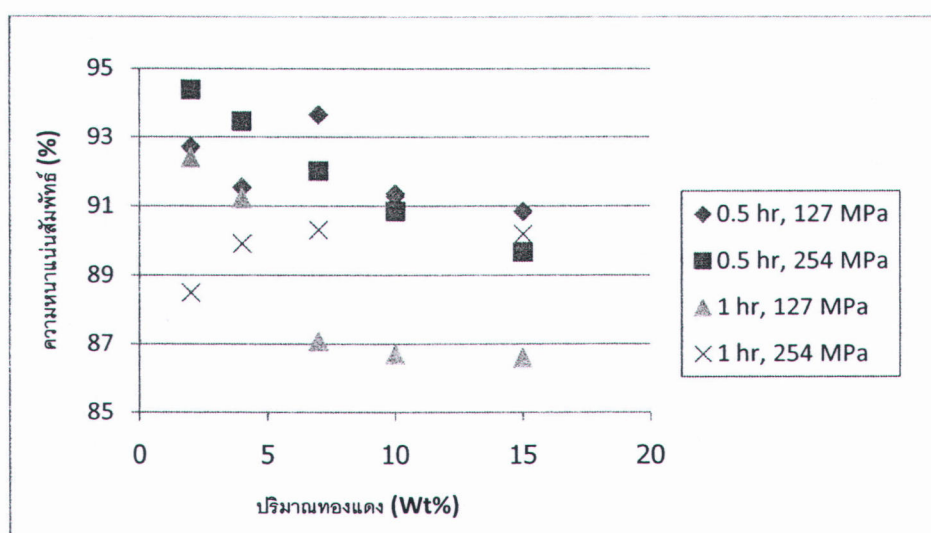
(b)

รูปที่ 4.1.1 ลักษณะของผงโลหะ (a) ผงไทเทเนียม (b) ผงทองแดง

4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

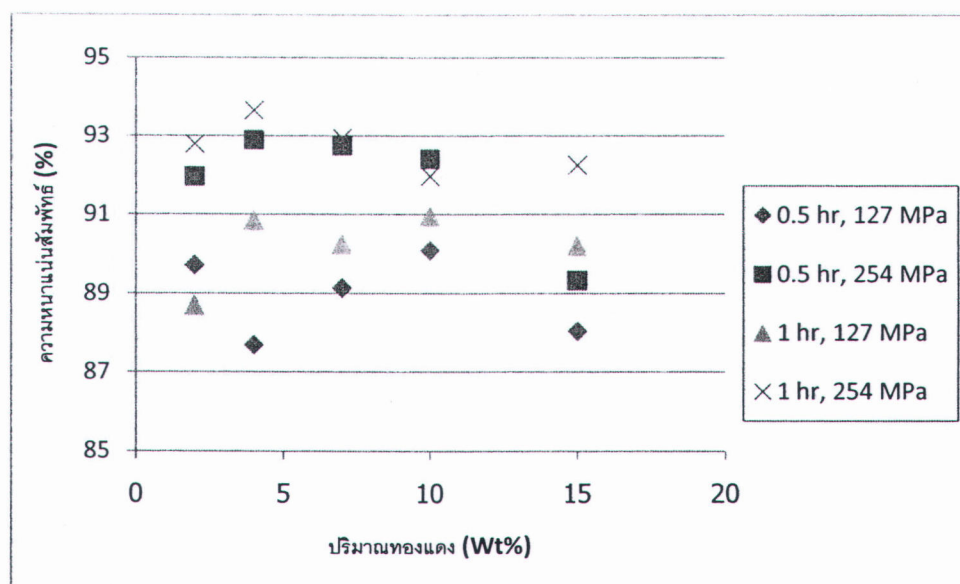
ความหนาแน่นของชิ้นงานถูกวัดโดยใช้วิธีของอาร์คิมิดีส ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ซึ่งผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 4.16 g/cm^3 ซึ่งต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี (4.51 g/cm^3) ชิ้นงานผงโลหะที่ผสมผงทองแดง 2% โดยน้ำหนักและผ่านการขึ้นรูปเย็นโดยใช้แรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 96% (4.37 g/cm^3)

รูปที่ 4.1.1 และ 4.1.2 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C และ 1100°C ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเผาผนึก 0.5 และ 1 ชม. และแรงอัด 127 และ 254 MPa



รูปที่ 4.2.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C

จากรูปที่ 4.2.1 ชิ้นงาน Ti-2Cu ที่เผาผนึกที่ 1000°C มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 94.38 % เมื่อผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกเป็นเวลา 0.5 ชม. และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10 เป็น 15% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงในทุกเงื่อนไขการเผาผนึก

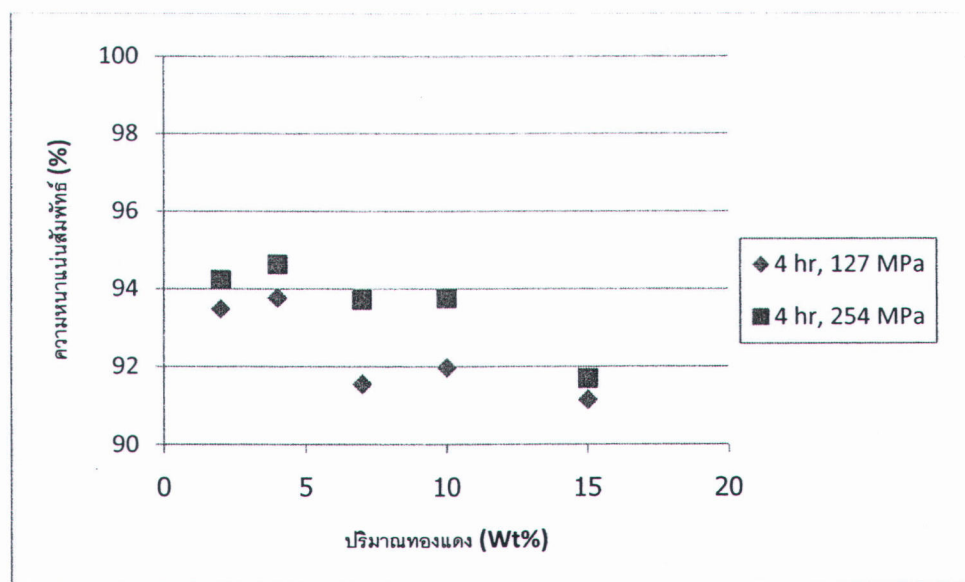


รูปที่ 4.2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C

จากรูปที่ 4.2.2 ชิ้นงาน Ti-4Cu ที่เผาผนึกที่ 1100°C มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 93.65 % เมื่อผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกเป็นเวลา 1 ชม. และชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า 127 MPa เมื่อเผาผนึกที่เวลาเดียวกัน

การเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10 เป็น 15% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงยกเว้นชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกเป็นเวลา 1 ชม. และปริมาณทองแดงไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

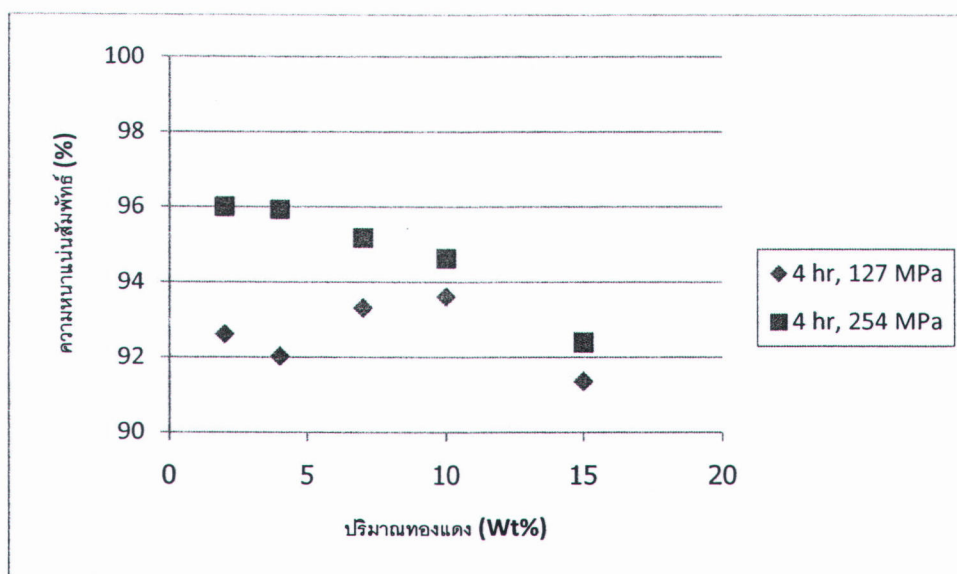
ผู้วิจัยมีความต้องการที่จะศึกษาผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มเติมเนื่องจากเวลาในการเผาผนึกมีผลมากต่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จึงได้ทดลองทำการเผาผนึกโดยใช้เวลา 4 ชม. และใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก 1000°C และ 1100°C ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2.3 และ 4.2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม.

จากรูปที่ 4.2.3 ชิ้นงาน Ti-4Cu ที่เผาผนึกที่ 1000°C มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 94.63 % เมื่อผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกเป็นเวลา 4 ชม. และชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า 127 MPa เมื่อเผาผนึกที่เวลาเดียวกัน นอกจากนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10 เป็น 15% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์กับชิ้นงานที่เผาผนึกที่เวลา 1 ชม. ที่ส่วนผสมและแรงอัดเดียวกันพบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2.4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.

จากรูปที่ 4.2.4 ชิ้นงาน Ti-2Cu ที่เผาผนึกที่ 1100°C มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 96 % เมื่อผ่านแรงอัด 254 MPa เป็นและเผาผนึกเวลา 4 ชม. และชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า 127 MPa เมื่อเผาผนึกที่เวลาเดียวกัน นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1 ชม. ที่ส่วนผสมและแรงอัดเดียวกันพบว่ามีความเพิ่มขึ้นและการเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10 เป็น 15% ทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลง

เมื่อศึกษาจากรูปค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ในทุกๆเงื่อนไขการเผาผนึกพบว่าแนวโน้มโดยส่วนใหญ่จะเป็นไปในทางที่แปรผกผันกันคือถ้าเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงโดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10% เป็น 15%

อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1000°C การแพร่ระหว่างไทเทเนียมและทองแดงจะอยู่ในสถานะของแข็ง ผงของทองแดงที่มีขนาดใหญ่และผงของไทเทเนียมซึ่งอยู่ติดกันจะเกิดการแพร่เข้าหากันและเกิดเป็นสารละลายของแข็งกับสารประกอบ การแพร่จะสิ้นสุดลงเมื่อส่วนผสมทางเคมีเหมือนกัน ผงทองแดงที่มีขนาดใหญ่จะค่อยๆเล็กลงและผงไทเทเนียมจะค่อยๆมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นโลหะผสมในระหว่างเผาผนึก ซึ่งบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผงทั้งสองจะเกิดเป็นขอบเกรน ผงทองแดงที่ค่อยๆลดขนาดลงจนกลายเป็นโลหะผสมจะทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนบริเวณรอบผงทองแดง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงสำหรับการเผาผนึกที่ 1000°C

อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1100°C ทองแดงจะเกิดเป็นเฟสของเหลวและทำปฏิกิริยากับไทเทเนียม แก๊สไฮโดรเจนซึ่งผสมอยู่ในผงโลหะไทเทเนียมจะถูกปล่อยออกมาจากผงโลหะและละลายในเฟสของเหลวช่วงที่ทำการเผาผนึกซึ่งเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัว ขณะชิ้นงานเย็นตัวและแข็งตัวจะเกิดการหดตัวของชิ้นงานซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะถูกกักไว้ในชิ้นงานและเกิดเป็นรูพรุน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงสำหรับการเผาผนึกที่ 1100°C

การเพิ่มเวลาในการเผาผนึกช่วยให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นยกเว้นการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C การเพิ่มเวลาจาก 0.5 ชม. เป็น 1 ชม. ทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำลง

การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจาก 1000°C เป็น 1100°C จะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น ยกเว้นชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่เวลา 0.5 ชม. ทั้งสองแรงอัด การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลง

การขึ้นรูปเย็นโดยใช้แรงอัด 254 MPa ทำให้อนุภาคผงโลหะอยู่ชิดติดกันมากกว่าใช้แรงอัด 127 MPa ซึ่งในขณะเผาผนึกจะทำให้เกิดพันธะต่อกันระหว่างผงโลหะได้ง่ายขึ้น ผงทองแดงและผงไทเทเนียมที่อยู่ชิดติดกันมากกว่าจะทำให้เกิดการแพร่ที่ทำให้เกิดเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (ส่วนผสมยูเทคติก) ได้ง่ายกว่า ทำให้เกิดเฟสของเหลวในระหว่างการเผาผนึกเป็นผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังเผาผนึกสูงขึ้น

การเพิ่มเวลาในการเผาผนึกจะทำให้การแพร่ระหว่างอนุภาคผงไทเทเนียมและทองแดงเป็นไปได้สมบูรณ์ขึ้น (การเพิ่มเวลาจะทำให้เฟสต่างๆเป็นไปตามแผนภูมิสมดุลเฟสมากขึ้น) เกิดเฟสของเหลวจากเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมากขึ้นแต่ไม่ถึงกับทำให้ชิ้นงานหลังเผาผนึกเสียรูป

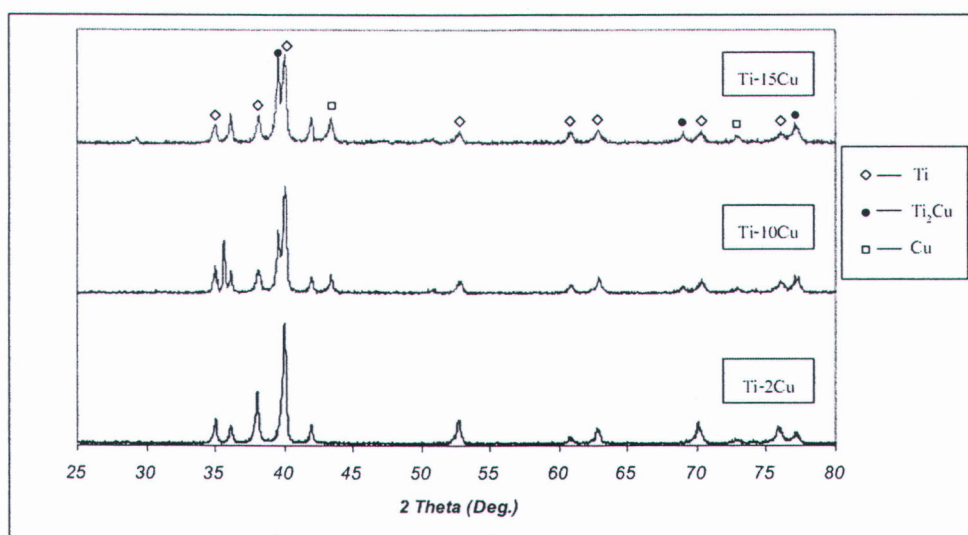
เมื่อดูจากแผนภูมิเฟสในรูปที่ 2.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 1100°C การแพร่ระหว่างไทเทเนียมและทองแดงทำให้เกิดเฟสของเหลวได้ปริมาณมากกว่าและเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นผลให้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการเผาผนึกทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น ทางผู้วิจัยจึงได้เพิ่มเวลาในการเผาผนึกเป็น 8 ชม. โดยใช้อุณหภูมิเผาผนึก 1000°C พบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังเผาผนึกเมื่อเทียบกับการเผาผนึกที่เวลา 4 ชม. เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.3 ผลวิเคราะห์ X-ray diffraction

ผลการทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer สำหรับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.3.1 พบว่าชิ้นงาน Ti-2Cu หลังผ่านการเผาผนึกไม่ปรากฏพีคของ Ti_2Cu และเมื่อปริมาณทองแดงในโลหะผสมเพิ่มขึ้นพบว่าหลังการเผาผนึกพีคของ Ti มีความสูงลดลงและพีคของ Ti_2Cu มีความสูงเพิ่มขึ้น และในชิ้นงาน Ti-15Cu พบพีคของทองแดงที่หลงเหลืออยู่หลังการเผาผนึก

ชิ้นงาน Ti-2Cu มีปริมาณทองแดงผสมอยู่เล็กน้อย ดังนั้นหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. จึงมีสารประกอบ Ti_2Cu เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงไม่ปรากฏพีคของ Ti_2Cu เมื่อปริมาณทองแดงในโลหะผสมเพิ่มขึ้นสารประกอบ Ti_2Cu จึงเกิดได้มากขึ้นดังนั้น ความสูงของพีค Ti_2Cu จึงเพิ่มขึ้น ส่วนไทเทเนียมจะทำปฏิกิริยากับทองแดงมากขึ้นความสูงของพีคจึงต่ำลง สำหรับชิ้นงาน Ti-15Cu ซึ่งมีปริมาณทองแดงผสมอยู่มาก หลังการเผาผนึกจึงมีทองแดงบางส่วนที่ยังหลอมเหลวหรือเกิดปฏิกิริยากับไทเทเนียมไม่หมดปรากฏอยู่ให้เห็นในโครงสร้างจุลภาคซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อถัดไปในรูป 4.3.1 จึงพบพีคของทองแดงหลังการเผาผนึก

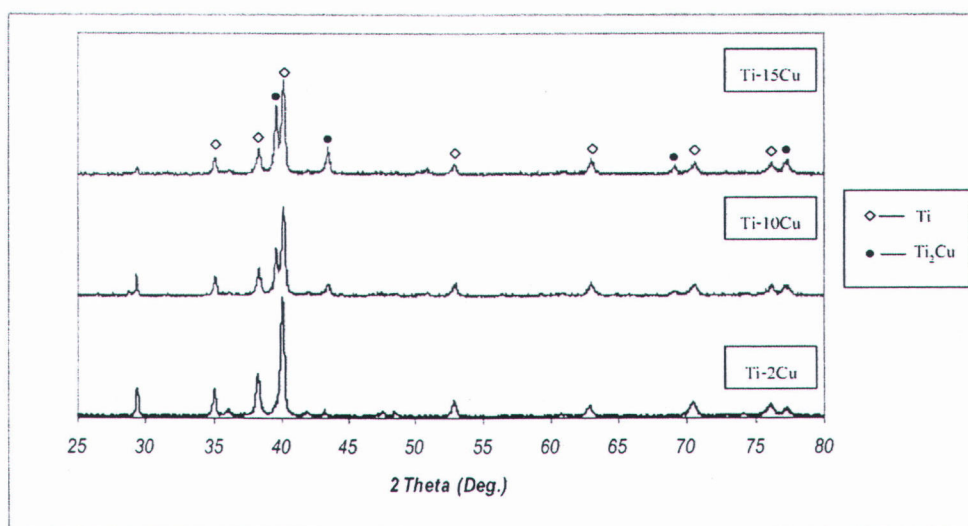


รูปที่ 4.3.1 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม.

ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.3.2 โดยมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C คือชิ้นงาน Ti-2Cu ไม่ปรากฏพีคของ Ti_2Cu และปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้พีค

ของ Ti_2Cu สูงขึ้น แต่ชิ้นงาน Ti-15Cu ที่เผาผืนที่อุณหภูมิ $1100^{\circ}C$ จะไม่พบฟีดของทองแดงที่หลงเหลืออยู่หลังการเผาผืน

การที่ไม่พบฟีดของทองแดงที่เกิดปฏิกิริยาไม่หมดเนื่องจากการเผาผืนที่อุณหภูมิ $1100^{\circ}C$ เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดงที่ $1084^{\circ}C$ ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้อย่างรวดเร็วและเกิด Ti_2Cu ได้ดี

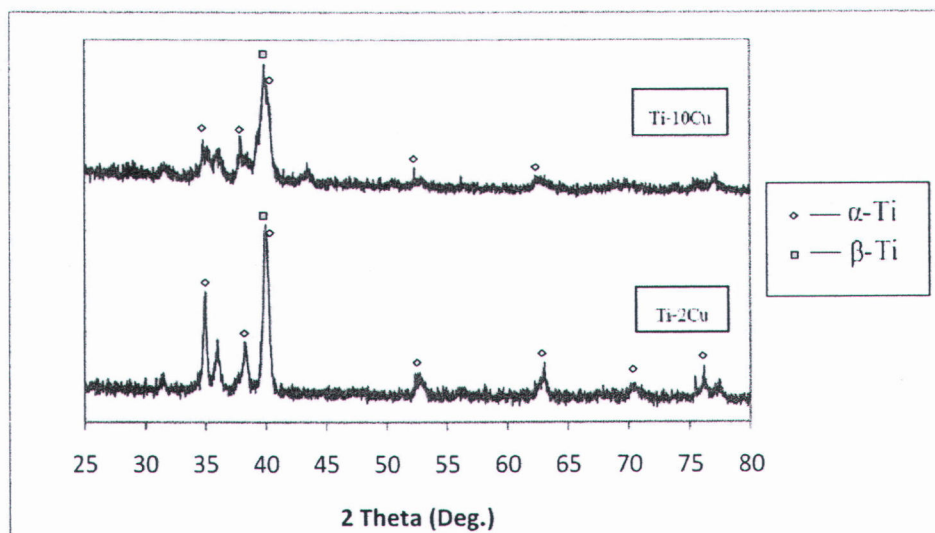


รูปที่ 4.3.2 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผืนที่อุณหภูมิ $1100^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชม.

ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ $1100^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชม. และนำมาผ่านกระบวนการ Solution treatment ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$ เป็นเวลา 0.5 ชม. ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอนแล้วทำการเย็นตัวในน้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 4.3.2

เฟสซึ่งปรากฏในผลวิเคราะห์รูปที่ 4.3.3 ได้แก่ α -Ti และ β -Ti มีความสอดคล้องกับรูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.4 โดย β -Ti ซึ่งหลงเหลือหลังจากการทำ Solution treatment มีลักษณะเป็นเฟสพื้นสีเทาอ่อนและ α -Ti เป็นเฟสซึ่งมีโครงสร้างเข็มปรากฏอยู่

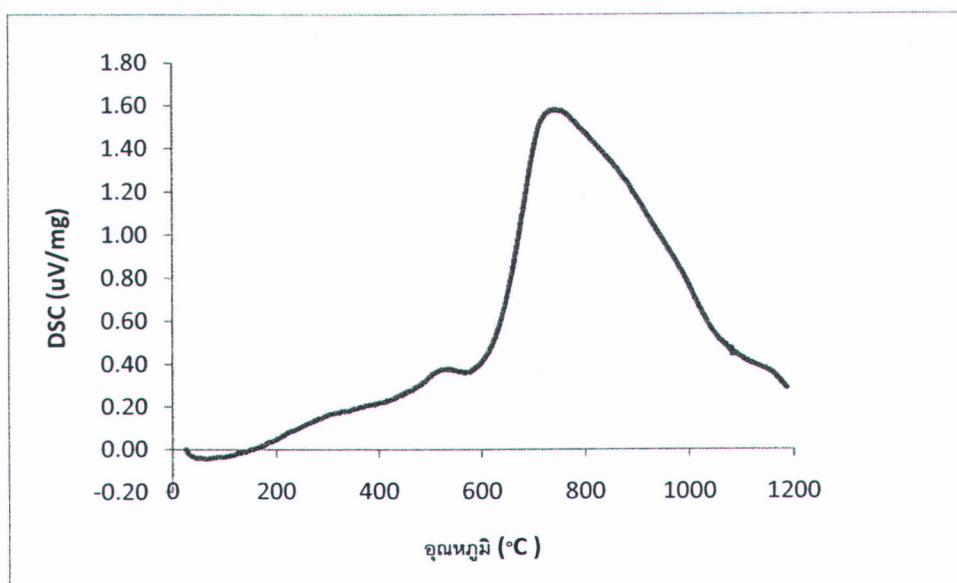
จากรูปที่ 4.3.3 พบว่าไม่พบฟีดของสารประกอบ Ti_2Cu ซึ่งปรากฏในผลวิเคราะห์ของโลหะผสมหลังผ่านการเผาผืน นั่นหมายความว่าหลังผ่านการทำ Solution treatment ทำให้ได้รับสารละลายของแข็งซึ่งอิมิตัวที่ยวดพร้อมที่จะนำไปทำการบ่มแข็งต่อไป



รูปที่ 4.3.3 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.แล้วผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม.

4.4 ผลวิเคราะห์ Differential Scanning Calorimeter (DSC)

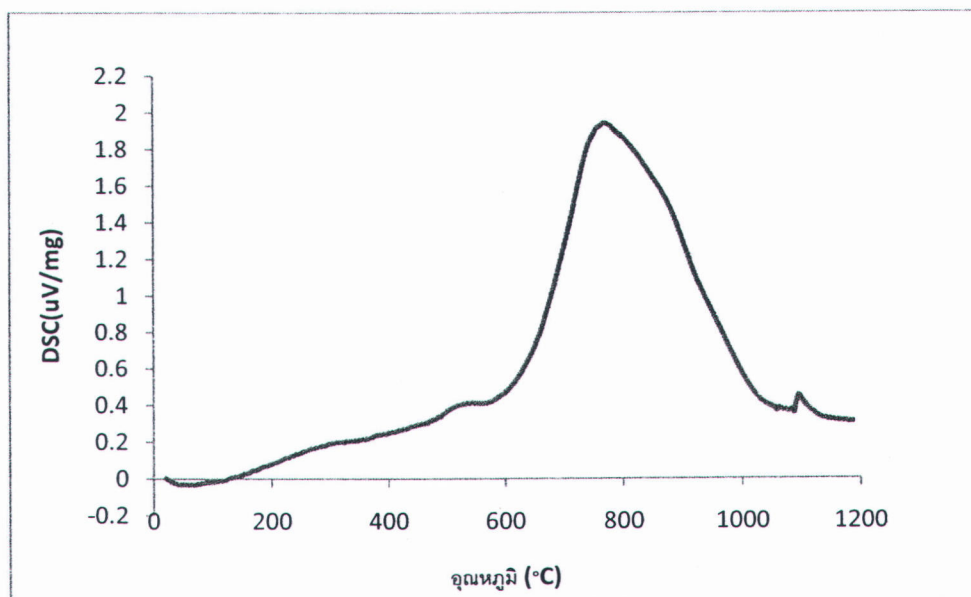
ผงโลหะตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาดูดและคายความร้อนในระหว่างการเผาฉีก โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1200 °C ในบรรยากาศสุญญากาศและใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C ต่อนาที



รูปที่ 4.4.1 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์

ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์แสดงไว้ในรูปที่ 4.4.1 พบว่าพบพีคของปฏิกิริยาคายความร้อนโดยจุดสูงสุดของพีคอยู่ที่อุณหภูมิ 741°C

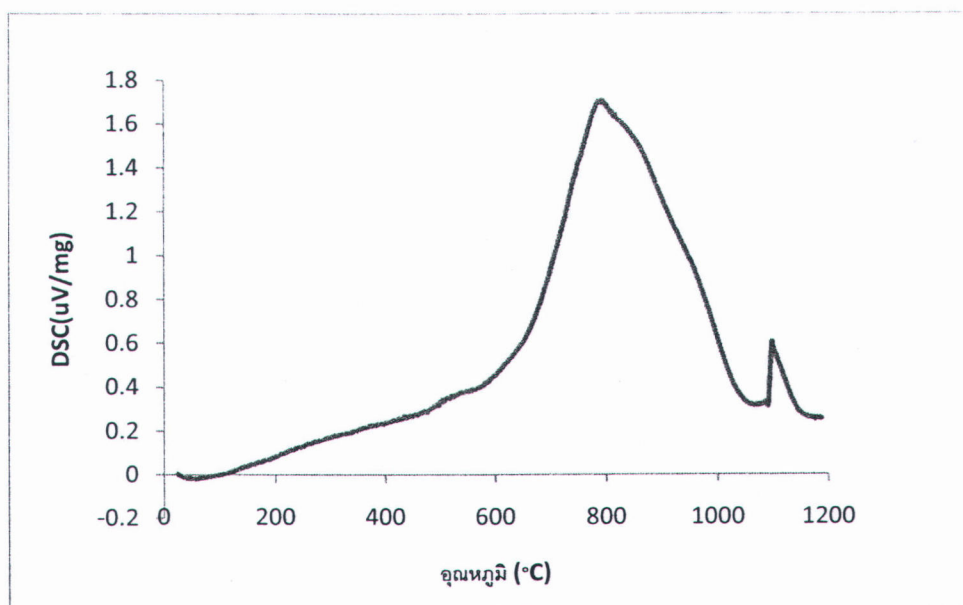
พีคคายความร้อนที่ปรากฏอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก hcp เป็น bcc (α เปลี่ยนเป็น β) โดยอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไทเทเนียมบริสุทธิ์คือ 882.5°C



รูปที่ 4.4.2 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะผสม Ti-2Cu

จากรูปที่ 4.4.2 พบว่ามีพีคคายความร้อนปรากฏขึ้นมาสองพีคได้แก่ พีคขนาดใหญ่ที่มีจุดสูงสุดที่อุณหภูมิ 771.2°C ซึ่งใกล้เคียงกับพีคที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.4.1 และพีคขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1096.5°C ซึ่งใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของทองแดงที่ 1083°C และพีคดูดความร้อนขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นก่อนพีคคายความร้อนที่อุณหภูมิ 1096.5°C เล็กน้อย

พีคที่อุณหภูมิ 771.2°C อาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟสจาก α เป็น β เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4.1 ส่วนพีคดูดและคายความร้อนขนาดเล็กเกิดจากการที่ทองแดงหลอมเหลวทำให้เกิดเฟสของเหลวและเฟสของเหลวดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมทันทีจึงปรากฏเป็นพีคดูดความร้อนก่อนจากนั้นจึงเกิดพีคคายความร้อนตามมา การที่พีคคายความร้อนมีขนาดเล็กอาจเกิดจากการหักล้างกับพีคดูดความร้อนจากการหลอมเหลวของทองแดง



รูปที่ 4.4.3 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะผสม Ti-10Cu

รูปที่ 4.4.3 ปรากฏพีคคายความร้อนสองพีคที่อุณหภูมิ 794.6°C และ 1098.5°C และพีคดูดความร้อนขนาดเล็กซึ่งเกิดก่อนพีคคายความร้อนที่อุณหภูมิ 1098.5°C เล็กน้อยใกล้เคียงกับรูปที่ 4.4.2 แต่พีคคายความร้อนที่อุณหภูมิ 1098.5°C มีความสูงเพิ่มขึ้น

พีคคายความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 794.6°C อาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟสจาก α เป็น β เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4.1 และ 4.4.2 และจากพีคดูดความร้อนและคายความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าความร้อนซึ่งเกิดจากการสลายประกอบระหว่างไทเทเนียมและทองแดงมีค่ามากกว่าความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวทองแดง และความสูงของพีคคายความร้อนที่เพิ่มขึ้นเกิดจากปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้สลายประกอบเกิดได้มากขึ้น

4.5 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 127 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.5.1 พบว่าปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของโครงสร้างยูเทคตอยด์ ($\alpha\text{-Ti} + \text{Ti}_2\text{Cu}$) ซึ่งในกล้องจุลทรรศน์แบบแสงขาวมีลักษณะเป็นแถบสีส้มสลับเทาเพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นงาน Ti-10Cu และ Ti-15Cu หลังการเผาผนึกจะพบทองแดงซึ่งยังหลอมเหลวหรือเกิดปฏิกิริยาไม่หมดในโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 4.5.2) เฟสสีดำที่ปรากฏในรูปคือรูพรุน



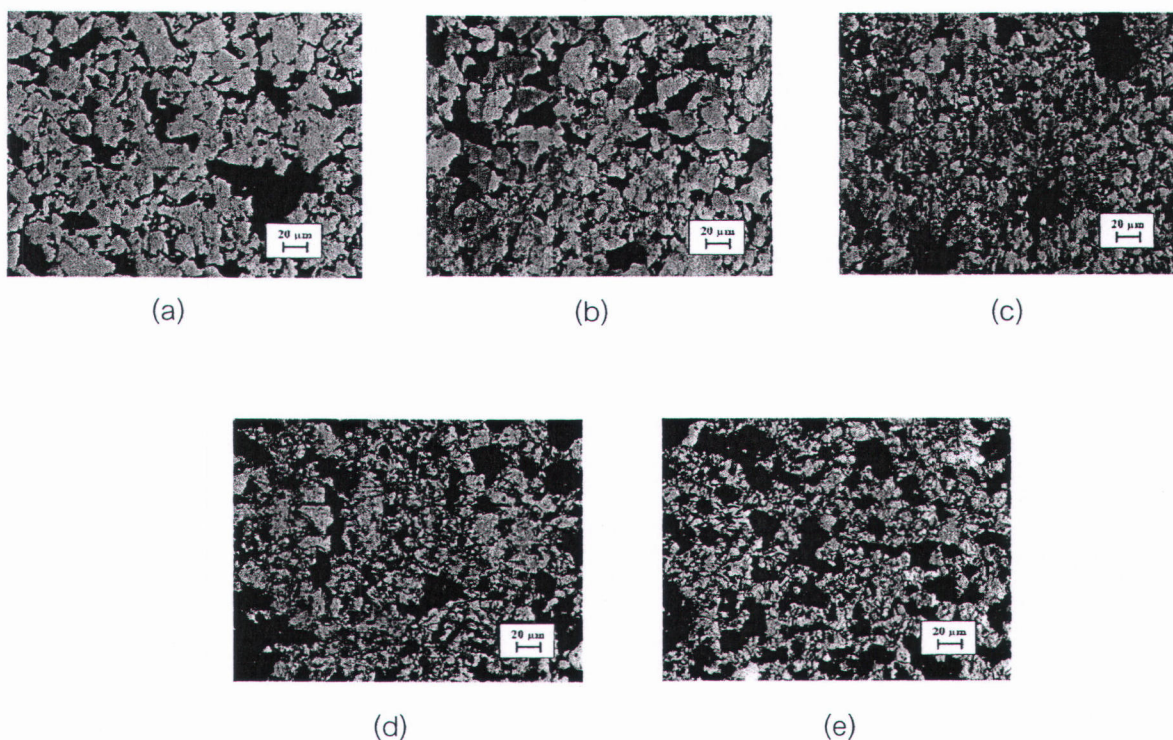
ในระหว่างการให้ความร้อนหรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ไทเทเนียมและทองแดงจะเกิดการแพร่ (Solid state diffusion) เข้าหากันและกัน ชิ้นงานก่อนเผาผนึกจะประกอบด้วยผงไทเทเนียมและทองแดงบริสุทธิ์สารประกอบที่สามารถเกิดขึ้นได้จึงมีได้หลากหลาย ได้แก่ Ti_2Cu , TiCu , Ti_3Cu_4 , Ti_2Cu_3 , TiCu_2 และ TiCu_4 ซึ่งสามารถศึกษาได้จากแผนภูมิสมดุลเฟส

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไทเทเนียมและทองแดงจะแพร่เข้าหากันจนทำให้เกิดเฟสซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งก็คือส่วนผสม ณ จุดยูเทคติก ซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิ 875°C ($\text{L} \rightarrow \text{TiCu}_2 + \text{TiCu}_4$) และ 960°C ($\text{L} \rightarrow \text{Ti}_2\text{Cu} + \text{TiCu}$) ในแผนภูมิสมดุลเฟส เฟสของเหลวระหว่างไทเทเนียมและทองแดงจะเข้าไปแทนที่รูพรุนในชิ้นงาน เฟสของเหลวดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับผงไทเทเนียมซึ่งยังไม่เกิดปฏิกิริยากับทองแดงโดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาคผงโลหะก่อนแล้วจึงค่อยๆ แพร่เข้าไปด้านใน

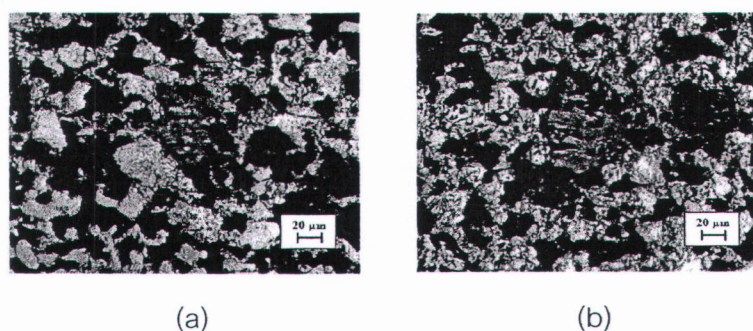
จากแผนภูมิสมดุลเฟสพบว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1000°C ช่วงที่คงอุณหภูมิไว้สารประกอบซึ่งยังคงมีความเสถียรที่อุณหภูมิดังกล่าวคือ Ti_2Cu และเฟสของเหลวสำหรับชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C ความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิและปฏิกิริยาคายความร้อนจากการเกิดสารประกอบจะทำให้เกิดเฟสของเหลวระหว่างไทเทเนียมและทองแดงมากขึ้นและทำให้การเผาผนึกเป็นไปได้สมบูรณ์ขึ้น

ในระหว่างการเย็นตัวในเตาอย่างช้าๆ ส่วนผสมของชิ้นงานโลหะผสมจะค่อยๆ ถูกปรับให้เข้าสู่สมดุล คือจะเกิดสารประกอบ Ti_2Cu มากขึ้นพร้อมกับ $\alpha\text{-Ti}$ ซึ่งเกิดขึ้นมาในภายหลังซึ่งก็คือโครงสร้างยูเทคตอยด์ที่เห็นในโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงอัด 127 MPa การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคผงโลหะไทเทเนียมและทองแดงจะไม่ดีเท่ากับการขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคผงมากกว่าหลังผ่านการขึ้นรูปเย็น ซึ่งทำให้การแพร่ระหว่างไทเทเนียมและทองแดงไม่ดี เกิดเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (ณ จุดยูเทคติก) น้อยกว่า ปริมาณเฟสของเหลวที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างในชิ้นงานน้อยกว่าและอาจทำให้มีทองแดงบางส่วนไม่ทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมและหลงเหลืออยู่หลังการเผาผนึก



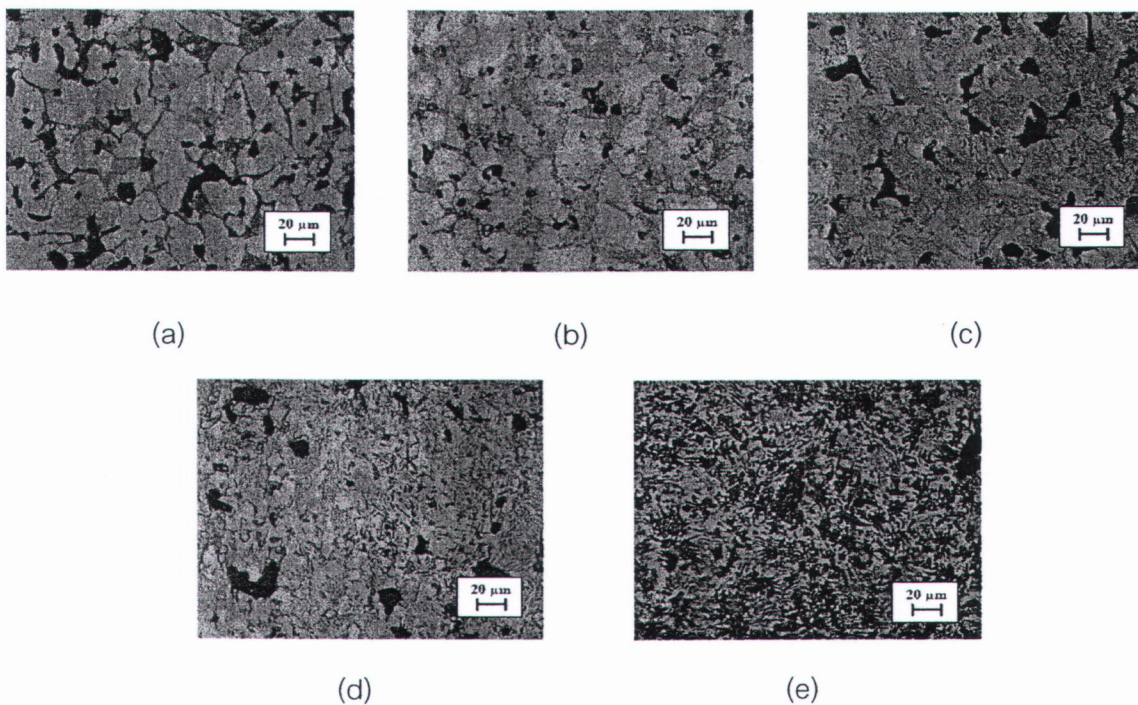
รูปที่ 4.5.1 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 127 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu



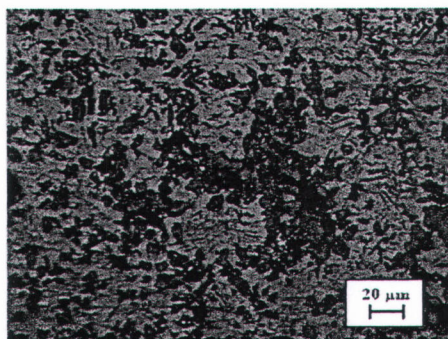
รูปที่ 4.5.2 ทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมดหลังการเผาผนึก (a) Ti-10Cu; (b) Ti-15Cu

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.5.3 พบว่ารูปพรุนซึ่งเห็นเป็นเฟสสีดำมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 127 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคตอยด์เพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นงาน Ti-15Cu พบทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมดปริมาณเล็กน้อยแสดงในรูปที่ 4.5.4

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงอัด 127 MPa มีช่องว่างระหว่างอนุภาคผงมากกว่าหลังผ่านการขึ้นรูปเย็น อีกทั้งยังมีปริมาณเฟสของเหลวที่เข้าไปแทนที่รูพรุนน้อยกว่า ปริมาณรูพรุนที่หลงเหลือจากการเผาผนึกจึงมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa



รูปที่ 4.5.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu

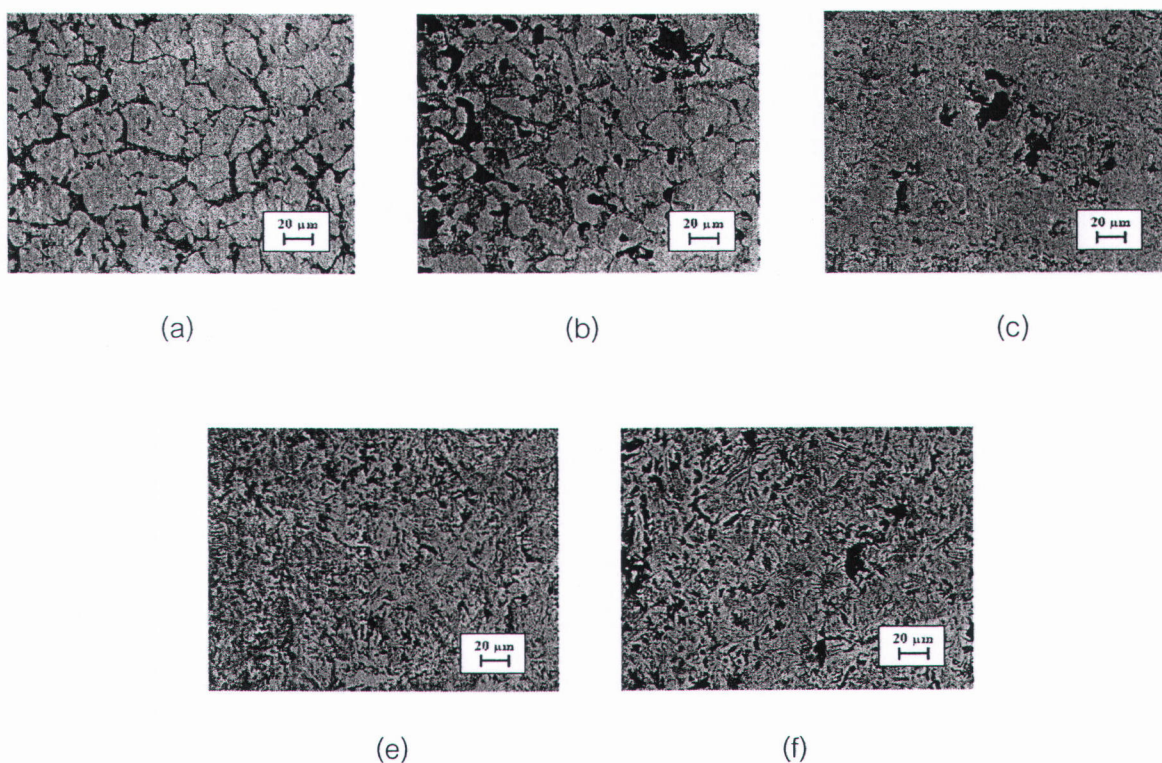


รูปที่ 4.5.4 ทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมดหลังการเผาผนึกชิ้นงาน Ti-15Cu

ปริมาณทองแดงที่หลงเหลือจากการเผาผนึกอาจเกิดจากการจับตัวกันของทองแดงหลังการอัดขึ้นรูปเย็น ซึ่งทำให้การแพร่ระหว่างทองแดงและไทเทเนียมในระหว่างการเผาผนึก

เป็นไปได้ไม่ทั่วถึงเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างไทเทเนียมและทองแดงมีน้อยลง บริเวณที่มีทองแดงจับตัวกันจะเกิดการแพร่กับไทเทเนียมไม่หมดและไม่เกิดเป็นเฟสของเหลว ทำให้เหลืออยู่หลังเผาขึ้น

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. แสดงไว้ในรูปที่ 4.5.5 พบว่ารูพรุนมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นเป็นเวลา 1 ชม. ที่อุณหภูมิและแรงอัดเดียวกัน อีกทั้งยังไม่พบทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมด

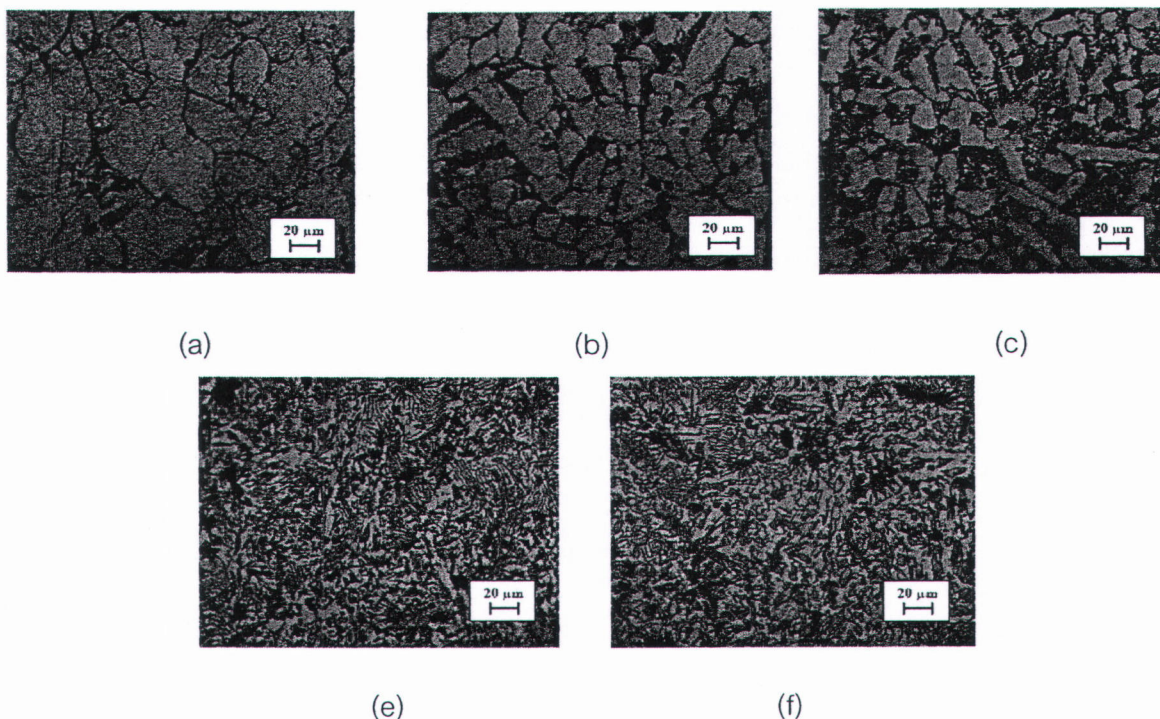


รูปที่ 4.5.5 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงไว้ในรูปที่ 4.5.6 พบว่ารูพรุนมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1000°C ที่เวลาและแรงอัดเดียวกัน อีกทั้งยังไม่พบทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมด

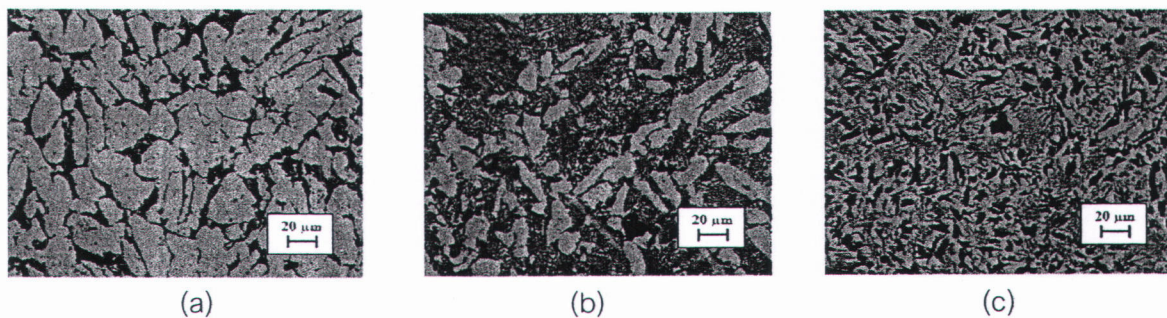
อุณหภูมิในการเผาขึ้นที่สูงขึ้นเมื่อดูจากแผนภูมิสมดุลเฟสในระหว่างการแพร่เข้าหากันระหว่างไทเทเนียมและทองแดงพบว่าจะสามารถเกิดเฟสของเหลวได้ง่ายกว่า (ความบริสุทธิ์

ของไทเทเนียมและทองแดงลดลงเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดเฟสของเหลวได้) ดังนั้นปริมาณรูพรุนจึงน้อยกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1000°C อีกทั้งการเผาผนึกที่ 1100°C ซึ่งเกินกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดง (1084°C) ทำให้ไม่พบทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมดในโครงสร้างจุลภาค

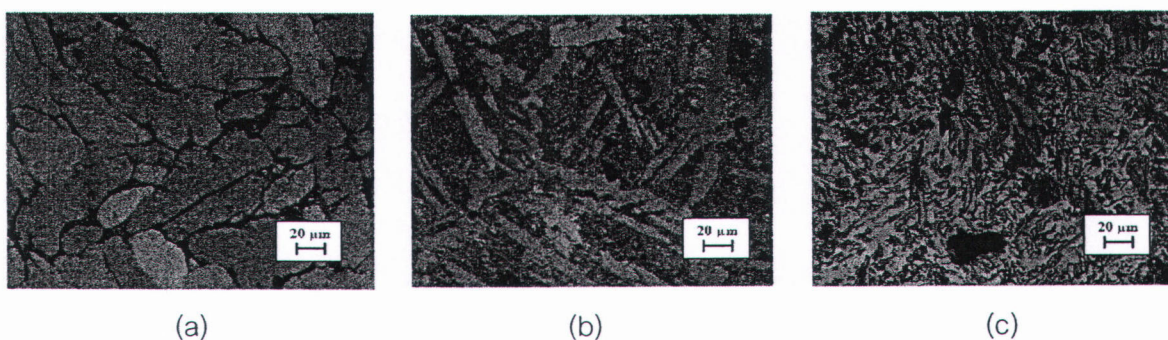


รูปที่ 4.5.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu

เนื่องจากผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเรื่องผลของเวลาการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ หลังเผาผนึกเพิ่มเติมจึงได้ทำการเผาผนึกเพิ่มเติมโดยใช้เวลา 4 ชม. ที่อุณหภูมิ 1000°C และ 1100°C โดยรูปโครงสร้างจุลภาคแสดงไว้ในรูปที่ 4.5.7 และ 4.5.8 ตามลำดับ



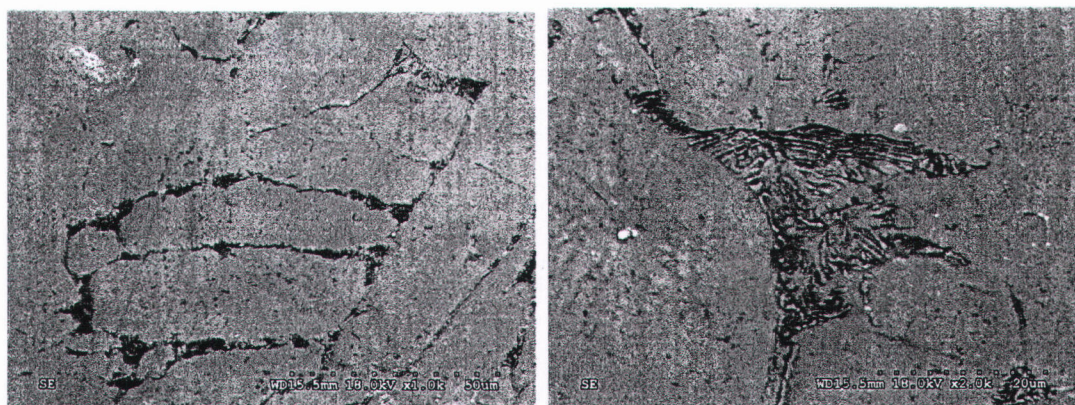
รูปที่ 4.5.7 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ
เผาผืนที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-7Cu; (c) Ti-15C



รูปที่ 4.5.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ
เผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-7Cu; (c) Ti-15Cu

จากรูปที่ 4.5.7 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เผาผืนโดยใช้เวลา 1 ชม. ที่อุณหภูมิและแรงอัดเดียวกันในรูปที่ 4.5.3 พบว่าปริมาณรูพรุนที่ส่วนผสมเดียวกันมีน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นการยืนยันว่าการเพิ่มเวลาในการเผาผืนจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังเผาผืนได้

จากรูปที่ 4.5.8 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เผาผืนโดยใช้เวลา 1 ชม. ที่อุณหภูมิและแรงอัดเดียวกันในรูปที่ 4.5.6 พบว่ารูพรุนมีปริมาณน้อยเช่นเดียวกัน

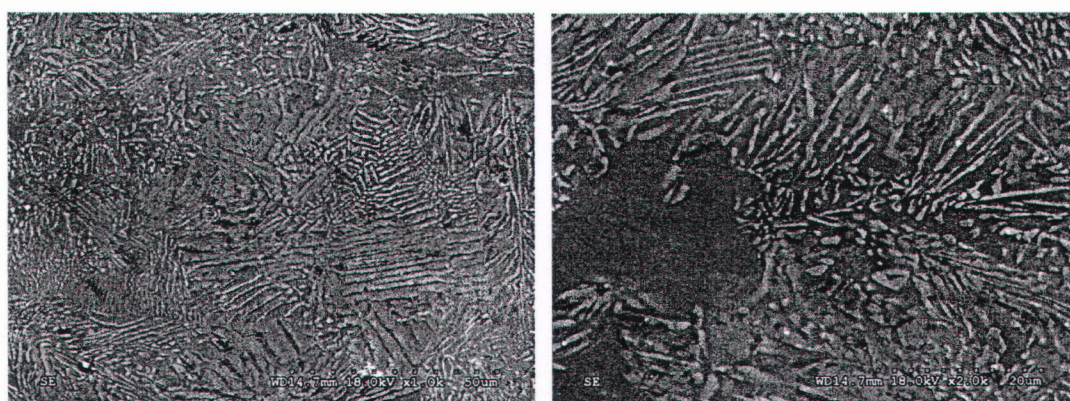


(a)

(b)

รูปที่ 4.5.9 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X

รูปที่ 4.5.9 แสดงรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงให้เห็นโครงสร้างยูเทคตอยด์ปริมาณเล็กน้อยบนเนื้อพื้น α -Ti จากรูปที่ 4.5.9(b) พบว่าโครงสร้างยูเทคตอยด์ประกอบด้วยเฟสซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นซึ่งอยู่บนเนื้อพื้น α -Ti



(a)

(b)

รูปที่ 4.5.10 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-10Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X

รูปที่ 4.5.10 เป็นรูปโครงสร้างของโลหะผสมซึ่งมีปริมาณทองแดงมากกว่าในรูปที่ 4.5.9 ซึ่งจะเห็นเฟสที่มีลักษณะเป็นเส้นสีขาวบนเนื้อพื้นสีเทาชัดเจนขึ้น และในรูปที่ 4.5.10(b) ซึ่งถ่ายที่ กำลังขยาย 2000 เท่าพบว่าในบางบริเวณเฟสที่เป็นเส้นมีลักษณะหนาขึ้นจนเห็นเป็นแผ่นสีขาว



(a)



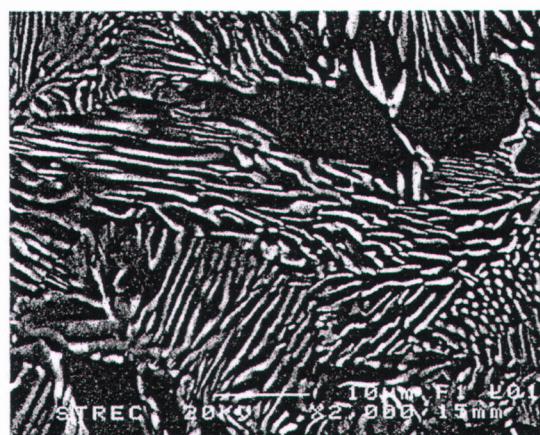
(b)

รูปที่ 4.5.11 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-15Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผา ผนึ่งที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X

จากรูปที่ 4.5.11 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5.10 พบว่าเฟสที่มีลักษณะเป็นเส้นมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจนมีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งจะมองเห็นได้ชัดเจนขึ้นที่ กำลังขยาย 2000 เท่า



(a)

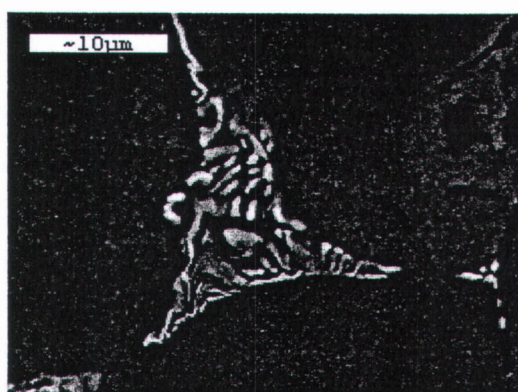


(b)

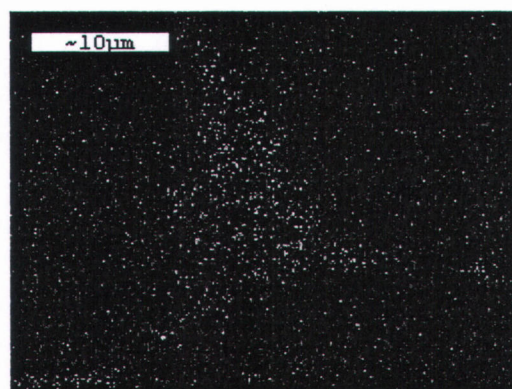
รูปที่ 4.5.12 รูปถ่ายโหมด Back-scatter จาก SEM (2000X) ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึ่งที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu

จากรูปที่ 4.5.12 แสดงรูปถ่ายโหมด Back-scatter จาก SEM ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาฉีกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. บริเวณที่เป็นเฟสสีขาวมีลักษณะเป็นเส้นคือ สารประกอบ Ti_2Cu เนื่องจากบริเวณที่เป็นสารประกอบจะมีอะตอมของทองแดงมากกว่าเมื่อเทียบกับเฟสพื้นและทองแดงมีเลขอะตอม 63.55 ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมซึ่งมีเลขอะตอม 47.87 ดังนั้นรูปที่ปรากฏในโหมด Back-scatter บริเวณสารประกอบจึงสว่างกว่าเฟสพื้น

เมื่อเปรียบเทียบรูป 4.5.12(a) และ 4.5.12(b) พบว่าสารประกอบของโลหะผสม Ti-10Cu มีมากกว่า Ti-2Cu และมีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากอะตอมของทองแดงที่ถูกผลักออกจากเนื้อพื้นและเกิดเป็นสารประกอบกับไทเทเนียมมีมากกว่า



(a)



(b)

รูปที่ 4.5.13 รูปถ่ายจาก SEM (2000X) ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาฉีกที่ อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.บริเวณโครงสร้างยูเทคตอยด์ (a) BSE; (b) Mapping ที่ ตำแหน่งเดียวกัน

จากรูปที่ 4.5.13 (a) และ 4.5.13 (b) แสดงรูปถ่ายจาก SEM ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาฉีกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.บริเวณโครงสร้างยูเทคตอยด์โดยใช้ โหมด BSE (Back-scatter Electron) และ Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ EDS (Energy dispersive spectrometer) เพื่อศึกษาปริมาณอะตอมของทองแดงในบริเวณต่างๆ ตามลำดับ

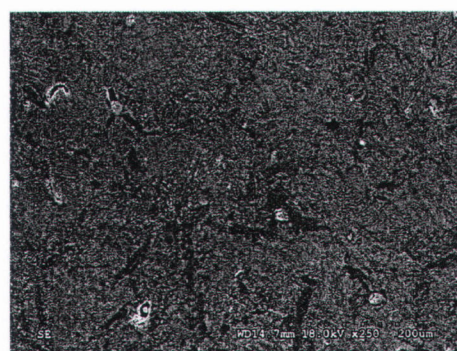
จากรูปที่ 4.5.13 (b) พบว่าบริเวณที่มีอะตอมทองแดงอยู่มากคือบริเวณที่มีโครงสร้างยูเทคตอยด์ เนื่องจากขณะเย็นตัวในเตาหลังเผาฉีกปริมาณทองแดงซึ่งสามารถละลายได้ใน

ไทเทเนียมจะค่อยๆลดลง อะตอมทองแดงส่วนเกินจึงถูกผลักออกมาเกิดเป็นสารประกอบกับไทเทเนียมซึ่งปรากฏบริเวณโครงสร้างยูเทคตอยด์บริเวณขอบเกรน

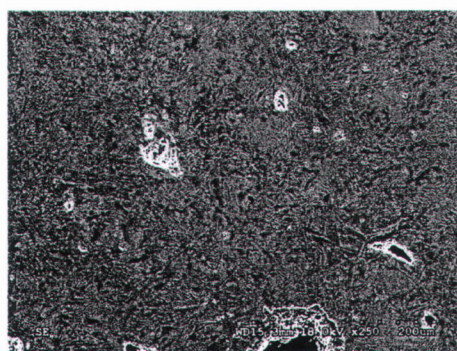
จากผลวิเคราะห์แบบจุดพบว่าโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu มีปริมาณทองแดงที่ละลายในเนื้อพื้นไทเทเนียม 1.92 และ 1.77% โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าส่วนผสมจะต่างกันแต่ปริมาณทองแดงที่สามารถละลายในเนื้อพื้นไทเทเนียมได้มีค่าคงที่ ดังนั้นโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงมากยังมีอะตอมของทองแดงที่ถูกผลักออกมาเกิดเป็นสารประกอบ Ti_2Cu ได้มากซึ่งเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาค



(a)



(b)



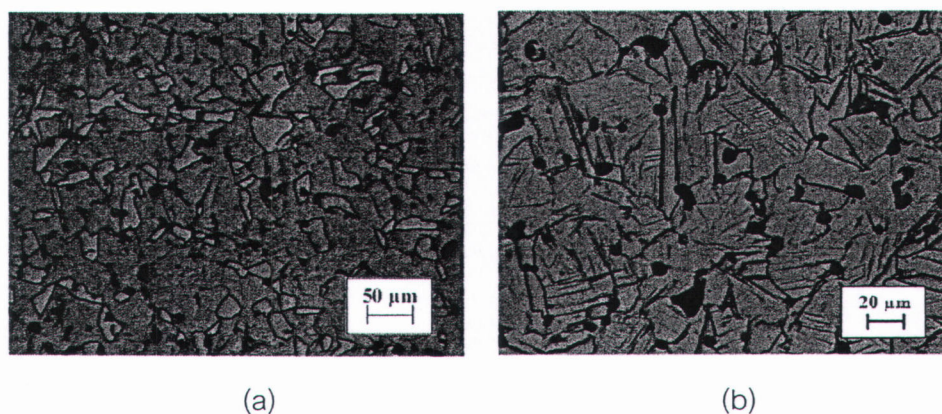
(c)

รูปที่ 4.5.14 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (250X) (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu; (c) Ti-15Cu

จากรูปที่ 4.5.14 เห็นได้ชัดว่าโลหะผสม Ti-2Cu มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดและ Ti-15Cu มีปริมาณรูพรุนที่มากและมีขนาดใหญ่ที่สุดและเมื่อดูจากแผนภูมิสมดุลเฟสพบว่า Ti-15Cu มีช่วงที่มีเฟส β เพียงอย่างเดียวอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แคบซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วไม่เหมาะที่จะนำมาทำการบ่มแข็งเนื่องจากขั้นตอนการทำ Solution treatment หรือการทำให้ชิ้นงานมีเฟสเดียวกันทั้งหมดจะทำได้ยากดังนั้นโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่

อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. ซึ่งเป็นตัวแทนของโลหะผสมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์และความแข็งแรงสูงสุดตามลำดับ จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ Solution treatment และบ่มแข็งต่อไป

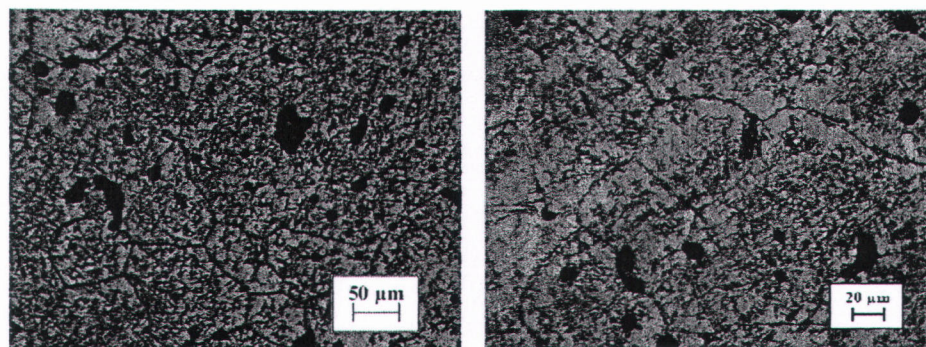
โลหะผสมที่ผ่านการเผานี้ถูกนำมาผ่านกระบวนการ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอนจากนั้นทำการเย็นตัวในน้ำ เป้าหมายของขั้นตอนนี้คือยับยั้งการเกิดสารประกอบ Ti_2Cu เพื่อให้ได้สารละลายของแข็งซึ่งอึดตัวยิ่งยวด



รูปที่ 4.5.15 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง ของโลหะผสม Ti-2Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) 100X; (b) 200X

จากรูปที่ 4.5.15 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-2Cu ซึ่งผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. พบว่าจะพบเฟสสองเฟสปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ได้แก่ เฟสพื้นสีเทาอ่อนและเฟสซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสีเทาเข้มซึ่งมีรอยขีดข่วนมีลักษณะคล้ายเข็มบนเฟสนี้ นอกจากนี้ยังไม่พบสารประกอบ Ti_2Cu ซึ่งปรากฏให้เห็นในรูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการเผานี้

จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการทำ Solution treatment ทำให้ปรากฏเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายเข็มของเฟส α (Martensitic α) และเฟสพื้นสีเทาอ่อนซึ่งก็คือเฟส β ซึ่งหลงเหลืออยู่ การที่โครงสร้างสุดท้ายไม่ใช่เฟส β ทั้งหมดอาจเป็นเพราะปริมาณของทองแดงซึ่งเป็นธาตุ β -stabilizing มีไม่เพียงพอ [3] หรือทองแดงอาจไม่ใช่ธาตุ β -stabilizing ที่ดีพอที่จะรักษาเฟส β เอาไว้ได้ทั้งหมดหลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว



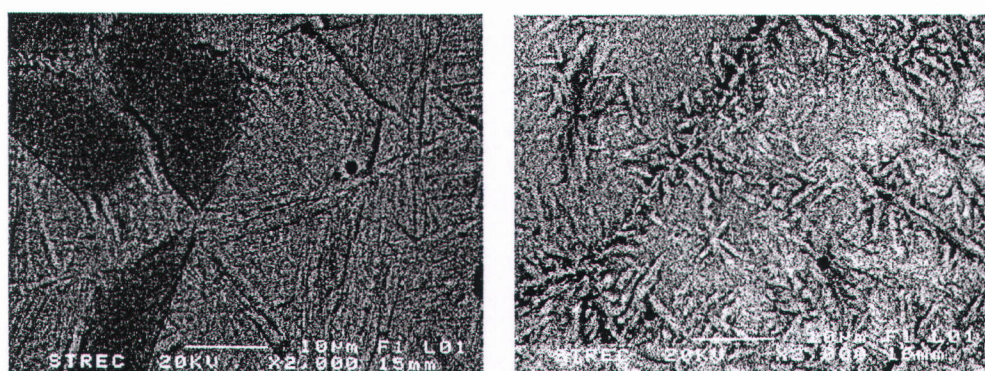
(a)

(b)

รูปที่ 4.5.16 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง ของโลหะผสม Ti-10Cu ที่ผ่านการ
ทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) 100X; (b) 200X

จากรูปที่ 4.5.16 พบว่าไม่ปรากฏเฟสพื้นที่เป็นสัเทอออนหรือเฟส β ซึ่งหลงเหลืออยู่หรือ
หรืออาจพบในปริมาณเล็กน้อยปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเข็มที่ปรากฏ
มีความละเอียดมากกว่าในรูปที่ 4.5.15

ปริมาณทองแดงซึ่งเพิ่มขึ้นจะทำให้เหลือเฟส β ซึ่งเป็นเฟสพื้นสัเทอออนเพิ่มขึ้นซึ่งใน
รูปที่ปรากฏจะขัดกับความเป็น β - stabilizer ของทองแดง



(a)

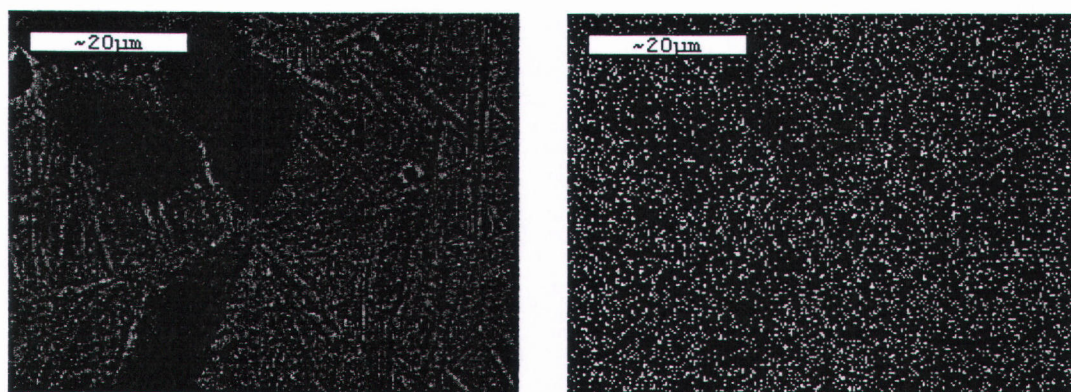
(b)

รูปที่ 4.5.17 รูปถ่ายโหมด Back-scatter จาก SEM (2000X) ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254
MPa เผาฉีกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5
ชม. (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu

จากรูปที่ 4.5.17 แสดงรูปถ่ายจาก SEM ในโหมด Back-scatter ของโลหะผสมไทเทเนียม
และทองแดงที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาฉีกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และทำ Solution

treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. รูปที่ 4.5.17 (a) บริเวณที่เป็นเฟสสีดำคือเฟส β ซึ่งมีทองแดงละลายอยู่ 0.69% โดยน้ำหนัก บริเวณที่สว่างคือโครงสร้างแบบเข็มของ α ซึ่งมีทองแดงละลายอยู่ 2.62% โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ EDS ส่วนรูปที่ 4.5.17(b) แสดงโครงสร้างแบบเข็มของ α ซึ่งปรากฏอยู่ทั่วทั้งงานโดยมีทองแดงละลายอยู่ 9.55% โดยน้ำหนักซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณทองแดงที่ผสมลงไปและโครงสร้างแบบเข็มในรูป 4.5.17 (b) มีความละเอียดมากกว่ารูป (a)

จากรูปที่ 4.5.17 (a) และ (b) พบว่าไม่ปรากฏเฟส Ti_2Cu ซึ่งมีความสว่างมากดังรูปที่ 4.5.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีสารประกอบหลงเหลืออยู่หลังการทำ Solution treatment จากรูปที่ 4.5.17 (a) โครงสร้างแบบเข็มของ α มีความสว่างกว่าเฟส β เนื่องจากมีปริมาณทองแดงละลายอยู่มากกว่าเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบเข็มของรูปที่ 4.5.17 (b) มีความสว่างมากกว่า 4.5.17 (a)



(a)

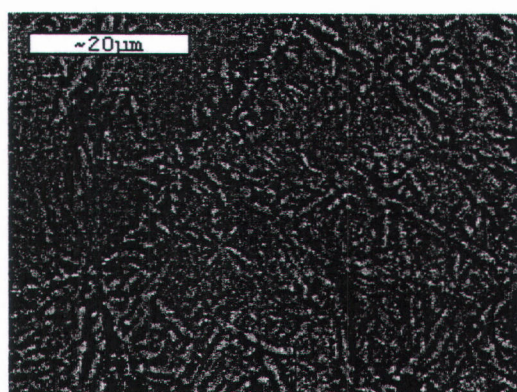
(b)

รูปที่ 4.5.18 รูปถ่ายจาก SEM ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) BSE; (b) Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกัน

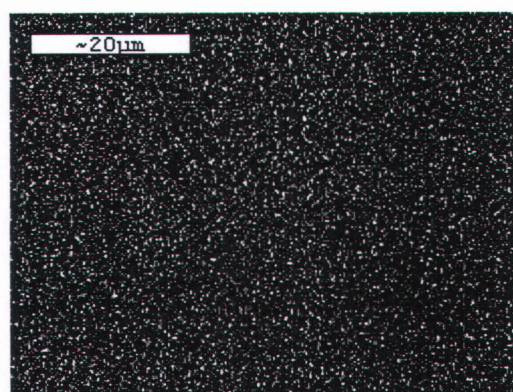
จากรูปที่ 4.5.18 (a) แสดงรูปถ่ายจาก SEM ในโหมด Back-scatter ของโลหะผสม Ti-2Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. บริเวณเฟสสีดำคือเฟส β และบริเวณที่สว่างกว่าคือโครงสร้างแบบเข็มของ α เช่นเดียวกับรูป 4.5.17 (a) และจากรูป 4.5.18 (b) แสดงรูป Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกันโดยจุดสีขาวคืออะตอมของทองแดงซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวบนเนื้อพื้นอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.5.18 เมื่อศึกษาจากแผนภูมิสมมูลเฟสระหว่างไทเทเนียมและทองแดงพบว่ามีความเป็นไปได้ที่ทองแดงจะละลายใน β ได้น้อยกว่าใน α (ทองแดงละลายในเฟส α และ β

ของไทเทเนียมได้มากที่สุดที่ 2.1 และ 17% โดยน้ำหนักตามลำดับ) และจากผลวิเคราะห์จาก EDS ระบุว่าทองแดงที่ละลายใน β และโครงสร้างแบบเข็มของ α มีค่าไม่ต่างกันมากนัก รูป Mapping ที่ปรากฏจึงมีอะตอมทองแดงกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ



(a)



(b)

รูปที่ 4.5.19 รูปถ่ายจาก SEM ของ Ti-10Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชม. และทำ Solution treatment ที่ 1000 °C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) BSE; (b) Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกัน

จากรูปที่ 4.5.19 (a) แสดงรูปถ่ายจาก SEM ในโหมด Back-scatter ของโลหะผสม Ti-10Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่ 1000 °C เป็นเวลา 0.5 ชม. ซึ่งพบโครงสร้างแบบเข็มของ α ทั่วทั้งเนื้อพื้นและอาจพบเฟสสีดำหรือเฟส β เล็กน้อยบริเวณขอบเกรน ส่วนรูปที่ 4.5.19 (b) แสดงให้เห็นจุดสีขาวหรืออะตอมของทองแดงซึ่งกระจายอยู่ทั่วโครงสร้างแบบเข็มและมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.5.18 (b)

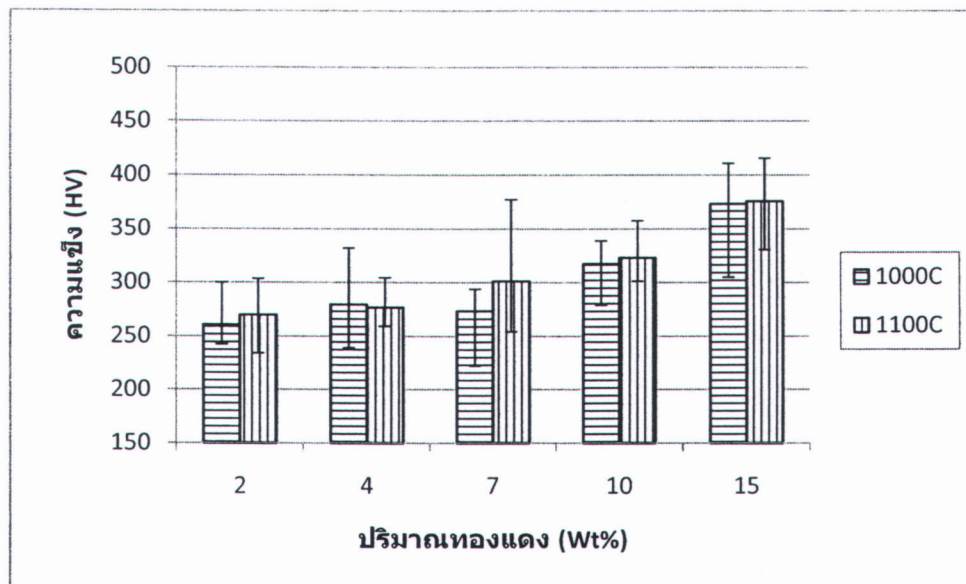


4.6 ความแข็ง

ตารางที่ 4.6.1 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ เวลา และแรงอัดแตกต่างกัน

โลหะผสม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	แรงอัด (MPa)	ความแข็งเฉลี่ย (HV 0.1)
Ti-2Cu	1000	1	127	230.6
			254	260.82
		0.5	254	254.94
	1100	1	254	270.12
Ti-4Cu	1000	1	127	257.48
			254	279.72
		0.5	254	272.7
	1100	1	254	276.9
Ti-7Cu	1000	1	127	273.7
			254	273.8
		0.5	254	274.04
	1100	1	254	301.16
Ti-10Cu	1000	1	127	330.84
			254	317.2
		0.5	254	289.94
	1100	1	254	323.04
Ti-15Cu	1000	1	127	358.68
			254	373.2
		0.5	254	310.44
	1100	1	254	375.66

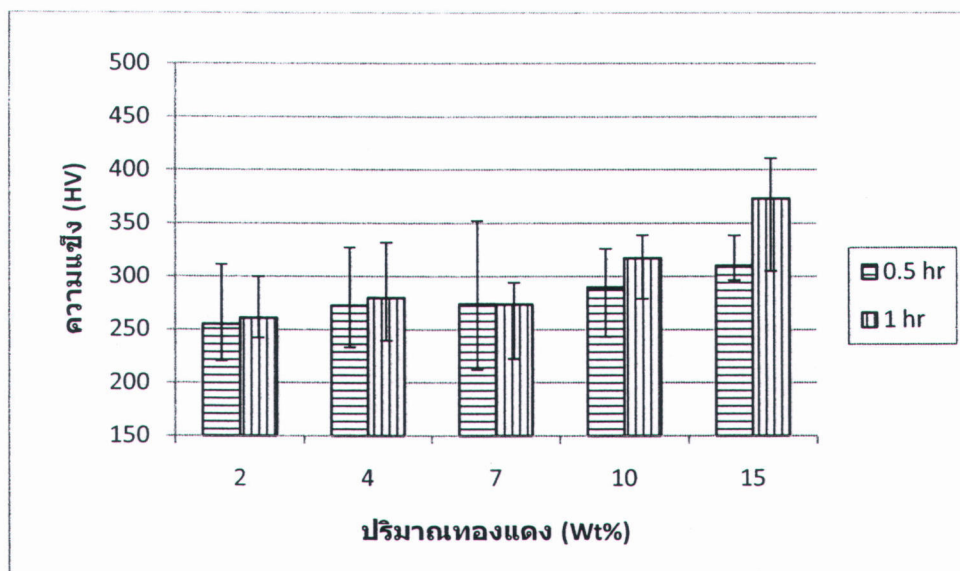
ความแข็งของชิ้นงานซึ่งผ่านการเผาผนึกด้วยเงื่อนไขต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 4.6.1 ชิ้นงาน Ti-15Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 375 HV ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 4.6.1) เวลาในการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณทองแดงในโลหะผสมมากกว่า 10% โดยมวลขึ้นไป (รูปที่ 4.6.2) และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงอัดที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.6.3)



รูปที่ 4.6.1 ความแข็งของโลหะผสมผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผืนเป็นเวลา 1 ชม.

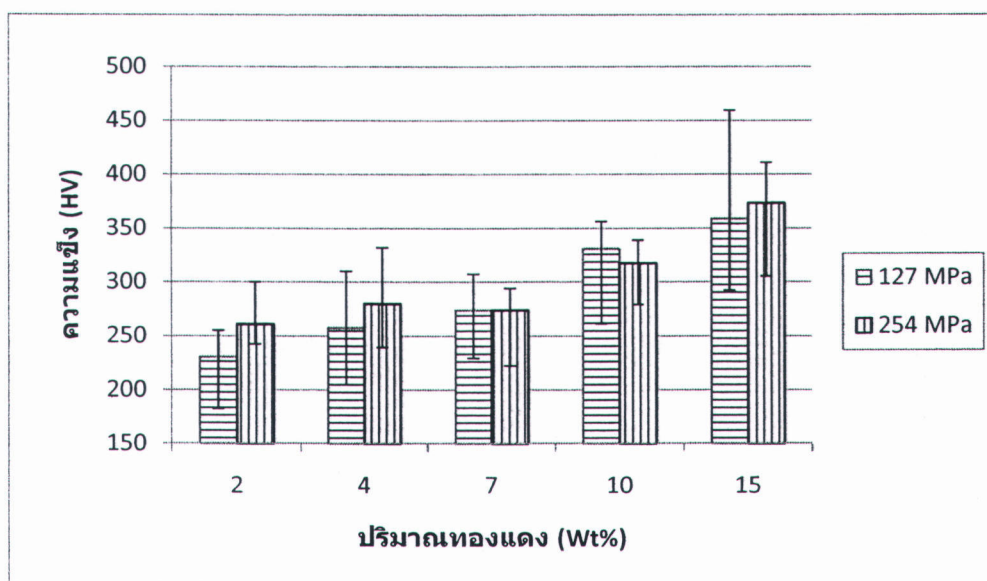
ปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้เกิดสารประกอบ Ti_2Cu ในโครงสร้างยูเทคตอยด์เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นเฟสที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสพื้น อีกทั้งผลของกลไกการเพิ่มความแข็งแบบ Solid solution strengthening ซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงอีกด้วย

ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก $1000^{\circ}C$ เป็น $1100^{\circ}C$ ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดง ทำให้ไม่พบทองแดงที่ยังทำปฏิกิริยาไม่หมดในโครงสร้างจุลภาค เป็นผลให้ทองแดงสามารถแพร่และเกิดเป็นสารประกอบ Ti_2Cu ได้ทั้งหมด ทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคตอยด์เพิ่มขึ้น ความแข็งจึงเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณทองแดงที่ยังหลอมเหลวไม่หมดที่พบในโครงสร้างจุลภาคมีปริมาณไม่มากนัก ผลของการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.6.2 ความแข็งของโลหะผสมผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผืนที่อุณหภูมิ 1000 °C

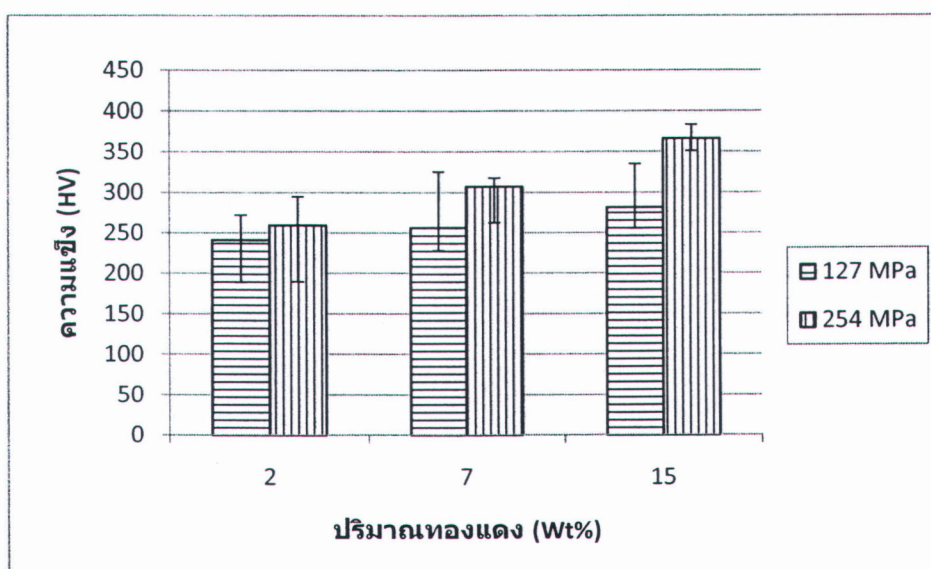
ผลของเวลาในการเผาผืนต่อความแข็งที่ได้รับแสดงไว้ในรูปที่ 4.6.2 เวลาในการเผาผืนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเฉพาะชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 10% โดยมวลขึ้นไป เนื่องจากปริมาณทองแดงที่มากจึงจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในการเผาที่มากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดงต่ำ เพื่อให้เกิดสารประกอบ Ti_2Cu ได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาผืนในชิ้นงานที่มีทองแดงต่ำกว่า 10% โดยมวลค่าความแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะเปลี่ยนแปลงมากในชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 10% โดยมวลขึ้นไป



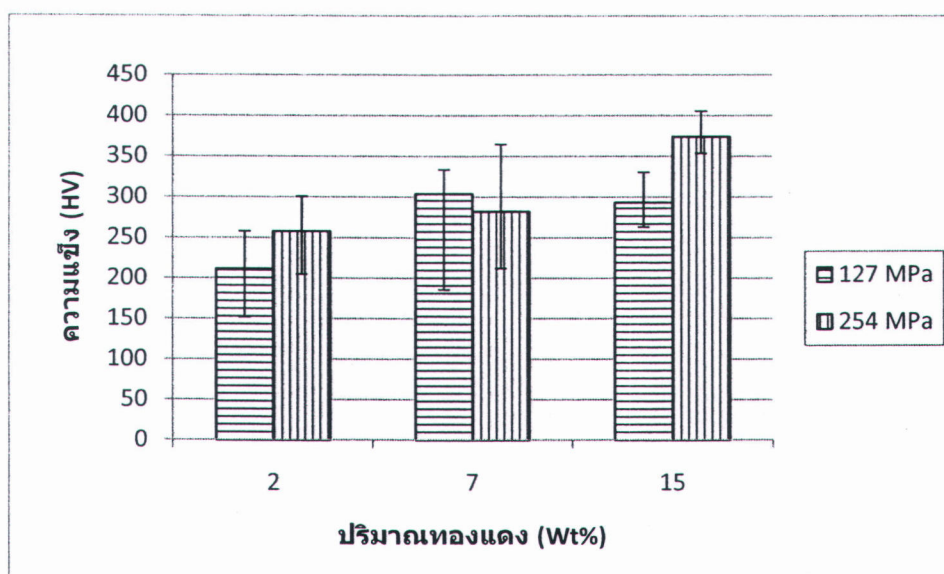
รูปที่ 4.6.3 ความแข็งของโลหะผสมเผาผืนที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชม.

จากรูปที่ 4.6.3 การเพิ่มขึ้นของแรงอัดทำให้อนุภาคผงโลหะทั้งสองชนิดอยู่ใกล้ชิดติดกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคว่าชิ้นงานซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa มีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าที่แรงอัด 127 MPa เป็นผลให้การแพร่ในระหว่างการเผาผนึกเป็นไปได้ดีกว่า เกิดโครงสร้างยูเทคตอยด์ได้ดีกว่าค่าความแข็งจึงเพิ่มขึ้น

ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มเติม โดยทำการเผาผนึกที่เวลา 4 ชม. ด้วยอุณหภูมิ 1000°C และ 1100°C ความแข็งที่วัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6.4 และ 4.6.5

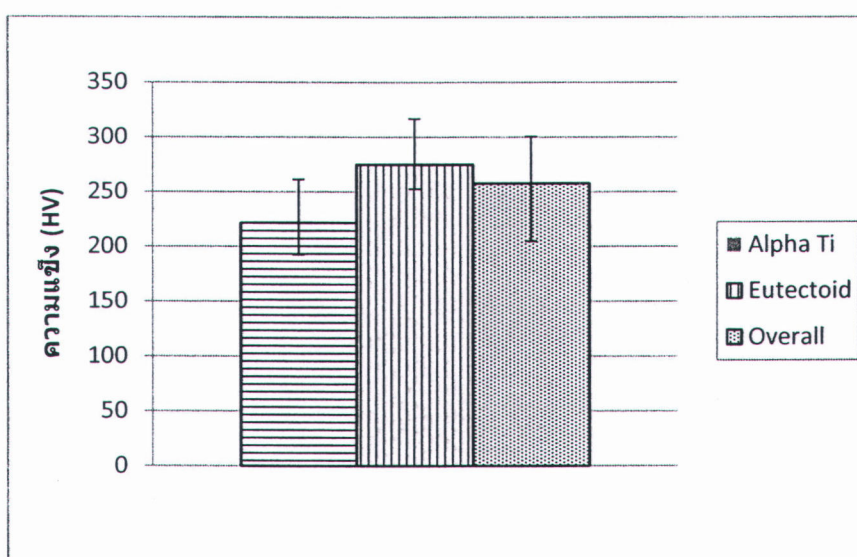


รูปที่ 4.6.4 ความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม.



รูปที่ 4.6.5 ความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.

จากรูปที่ 4.6.4 และ 4.6.5 พบว่าชิ้นงาน Ti-15Cu ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 374.06 HV การเผาผนึกที่ทั้งสองอุณหภูมิค่าความแข็งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงและแรงอัดที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างการเผาผนึกที่อุณหภูมิทั้งสองพบว่าค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน

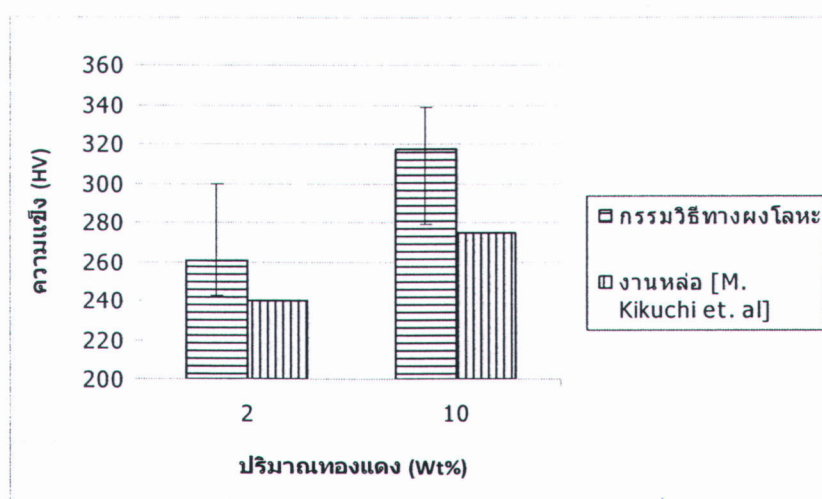


รูปที่ 4.6.6 ความแข็งที่บริเวณต่างๆของโลหะผสม Ti-2Cu ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.

รูปที่ 4.6.6 แสดงความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆของโลหะผสม Ti-2Cu ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. โดยความแข็งบริเวณเฟสพื้น α -Ti และโครงสร้างยูเทคตอยด์ซึ่งใช้แรงกด 25 กรัมวัดได้ 221.52 และ 275 HV ตามลำดับ และความแข็งโดยรวมซึ่งใช้แรงกด 100 กรัมวัดได้ 257.8 HV

ความแข็งบริเวณโครงสร้างยูเทคตอยด์มีค่าสูงกว่าเฟสพื้น α -Ti เนื่องจากโครงสร้างยูเทคตอยด์ประกอบด้วยสารประกอบ Ti_2Cu ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสพื้น α -Ti สำหรับความแข็งโดยรวมจะมีค่าระหว่างความแข็งของทั้งสองบริเวณ

Kikuchi และคณะวิจัยจากประเทศญี่ปุ่น [5] ได้ผลิตโลหะผสมไทเทเนียมและทองแดง โดยกรรมวิธีการหล่อโดยโลหะผสมซึ่งถูกนำไปวัดความแข็งแบบวิกเกอร์มีส่วนผสมที่เหมือนกับโลหะผสมที่ผลิตในงานวิจัยนี้ได้แก่ Ti-2Cu และ Ti-10Cu โดยความแข็งของ Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผลิตโดยการหล่อวัดได้ 240 และ 275 HV ตามลำดับ สำหรับความแข็งของชิ้นงานโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผลิตโดยกรรมวิธีทางผงโลหะเท่ากับ 260.8 และ 317.2 HV ตามลำดับ โดยความแข็งของชิ้นที่ผลิตโดยวิธีทั้งสองแสดงในรูปที่ 4.6.7

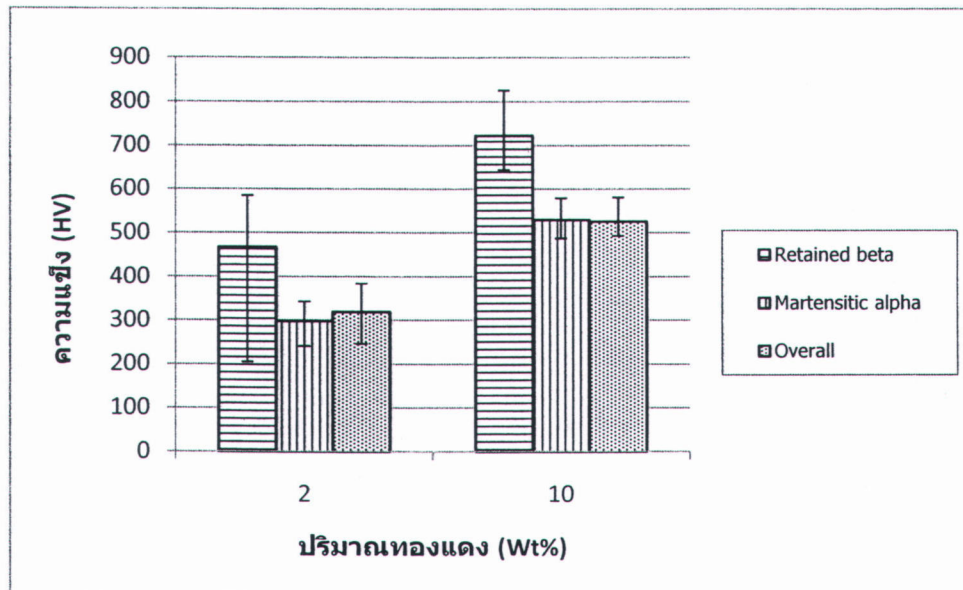


รูปที่ 4.6.7 ความแข็งของโลหะผสมซึ่งผลิตด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะและงานหล่อ [M. Kikuchi et. al]

ความแข็งของโลหะผสมซึ่งผลิตโดยกรรมวิธีทางผงโลหะมีค่ามากกว่าโลหะผสมที่ผลิตโดยการหล่อทั้งสองส่วนผสมเนื่องจากโครงสร้างของโลหะผสมซึ่งผลิตโดยกรรมวิธีทางผงโลหะมีความละเอียดมากกว่า

โลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาฉีกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. ถูกเลือกมาเพื่อนำมาทำ Solution treatment ต่อไป โดยความแข็งของ

ชิ้นงานหลังผ่านการทำ Solution treatment ที่วัดได้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่ เฟสพื้นสีเทาอ่อน เฟสสีเทาเข้มซึ่งมีเข็มอยู่บนเฟสนี้โดยใช้แรงกด 25 กรัม (HV0.025) และความแข็งโดยรวมใช้แรงกด 100 กรัม (HV0.1)



รูปที่ 4.6.8 ความแข็งของชิ้นงานในแต่ละเฟสหลังผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม.

ความแข็งของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. แสดงในรูปที่ 4.6.8 พบว่าความแข็งของเฟสพื้นสีเทาอ่อนซึ่งเป็นเฟส β ที่หลงเหลืออยู่มีความแข็งมากกว่าโครงสร้างแบบเข็มของ α มากและความแข็งโดยรวมมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งของโครงสร้างแบบเข็มซึ่งมีอยู่ปริมาณมากกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบความแข็งที่ได้หลังการเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. กับความแข็งที่ได้หลังผ่านการทำ Solution treatment พบว่าเพิ่มขึ้นมาก

การที่เฟสพื้นสีเทาอ่อนของ β มีความแข็งมากกว่าโครงสร้างแบบเข็มของ α เนื่องจากเมื่อศึกษาจากแผนภูมิสมดุลเฟสพบว่าทองแดงสามารถละลายในโครงสร้างแบบ hcp ของ α ได้น้อยกว่าในโครงสร้าง bcc ของ β มากเพราะว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้าง β มีความหนาแน่นน้อยกว่าใน α เป็นผลให้อะตอมของทองแดงแทรกตัวเข้าไปได้มากกว่า ทำให้ให้กลไกการเพิ่มความแข็งแบบ Solid solution strengthening มีผลมากกว่า

ความแข็งที่เพิ่มขึ้นหลังจากการทำ Solution treatment เกิดจากโครงสร้างแบบเข็มของ α ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังผ่านการทำ Solution treatment และพื้นสีเทาอ่อนของ

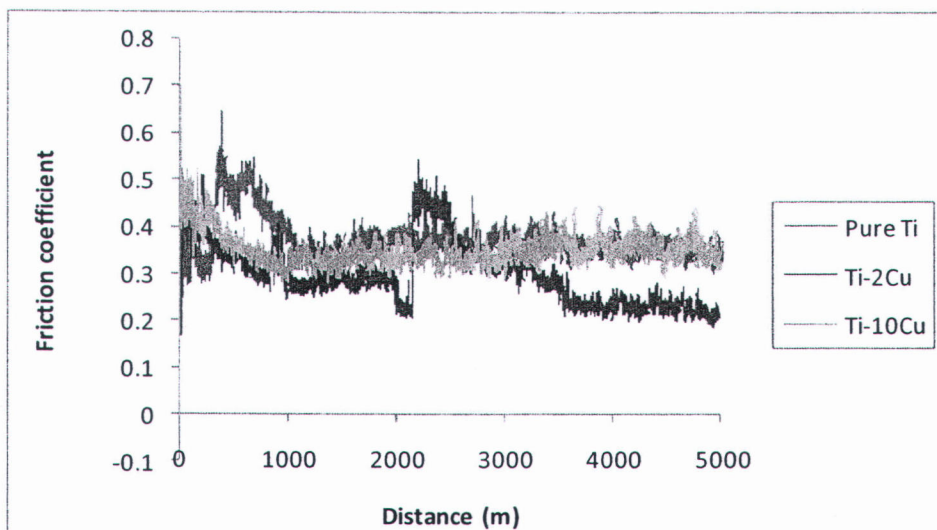
β ซึ่งหลงเหลืออยู่ หลังการเผาผนึกจะพบว่ามีสารประกอบ Ti_2Cu ที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสพื้นแต่หลังจากการทำ Solution treatment พบว่าไม่พบสารประกอบดังกล่าว แสดงว่าอะตอมของทองแดงได้ละลายเข้าไปในโครงสร้างของ α และ β ซึ่งกลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบ Solid solution strengthening ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้มากกว่าการยึดเหนี่ยวกันระหว่างสารประกอบและเฟสพื้น

4.7 ความต้านทานการสึกหรอ

โลหะผสมไทเทเนียมและทองแดง Ti-2Cu และ Ti-10Cu ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่ $1000^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชม. และที่ $1100^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชม. จากนั้นขึ้นงานเผาผนึกที่ $1100^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชม. จะถูกนำมาทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$ เป็นเวลา 0.5 ชม. การทดสอบความต้านทานการสึกหรอจะทำหลังจากการเผาผนึกทั้งสองเงื่อนไข และการทำ Solution treatment โดยใช้จาน 304 Stainless steel เป็นวัสดุในการขัดสีและมีเงื่อนไขในการทดสอบดังนี้

- ความเร็วรอบ 200 rpm
- แรงกด 16 N
- รัศมีในการขัดสี 30 mm
- ระยะขัดสี 5000 m

ค่าที่ได้หลังการทดสอบได้แก่น้ำหนักที่สูญหายหลังการทดสอบ (Mass loss) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) ในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 4.7.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa ผ่าแผ่น ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม.

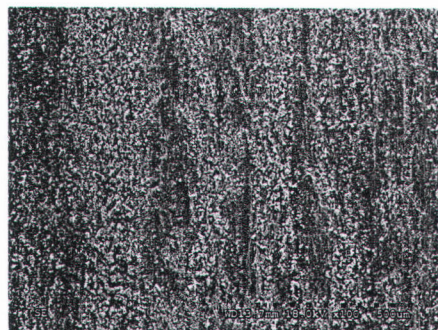
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระหว่างทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa ผ่าแผ่น ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.7.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ Ti-2Cu ในช่วงที่คงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.3 และ Pure Ti กับ Ti-10Cu มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.4 ซึ่งสูงกว่า Ti-2Cu เล็กน้อย

การเติมธาตุผสมในโลหะบริสุทธิ์จะทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นแต่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่มากนัก

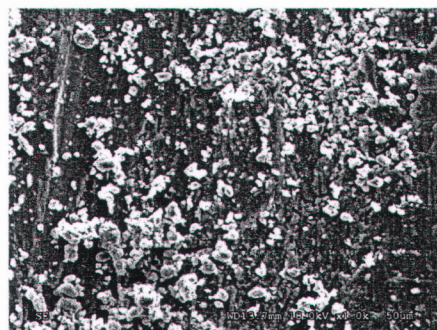
ในช่วงแรกของการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าสูงเนื่องจากเป็นช่วงที่เริ่มเกิดแนวการขีดสี (Wear track) ในทั้งวัสดุที่ใช้ทดสอบและแผ่น 304 Stainless steel นอกจากนี้ยังเกิดจากการที่ฟิล์มออกไซด์ที่มีความหนาในระดับนาโนเมตรถูกทำลายเมื่อเริ่มการทดสอบทำให้เนื้อวัสดุเกิดการขีดสีกันโดยตรงและทำให้กลไกการขีดสีในช่วงแรกเป็นแบบ Adhesive wear

เมื่อทำการทดสอบไปเรื่อยๆ อุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานทดสอบและแผ่นดิสก์ stainless steel จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เริ่มเกิดฟิล์มออกไซด์อย่างรวดเร็วและชั้นฟิล์มออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นนี้จะค่อยหลุดออกจากพื้นผิวในระหว่างการทดสอบและบางส่วนจะกลับมาพอกบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานทำให้เกิดเป็น "Oxide island" ขึ้นมา โดยฟิล์มออกไซด์ที่พอกที่ผิวดังกล่าวจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงซึ่งเมื่อทดสอบไปได้ระยะทางหนึ่ง (1000m จากรูปที่ 4.7.1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าคงที่ซึ่งเป็นอีกคุณลักษณะหนึ่งของการสึกหรอแบบ Oxidative-Abrasive wear

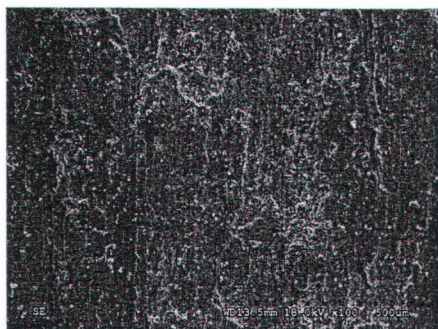
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของกลไกการสึกหรอแบบ Oxidative-Abrasive wear จะอยู่ในช่วง 0.1-0.5 ในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่นซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงที่คงที่ที่ได้หลังการทดสอบจากรูปที่ 4.7.1 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.4 ซึ่งตรงกับช่วงที่เกิดการสึกหรอแบบ Oxidative-Abrasive wear



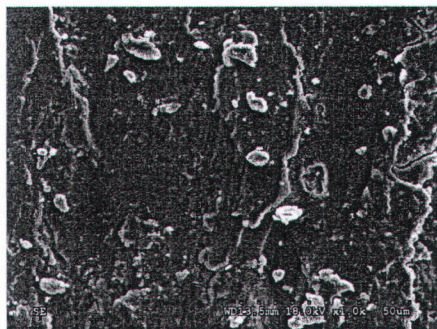
(a)



(b)



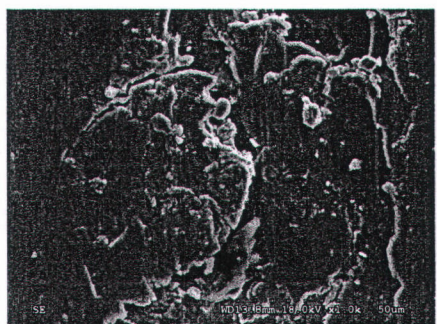
(c)



(d)



(e)

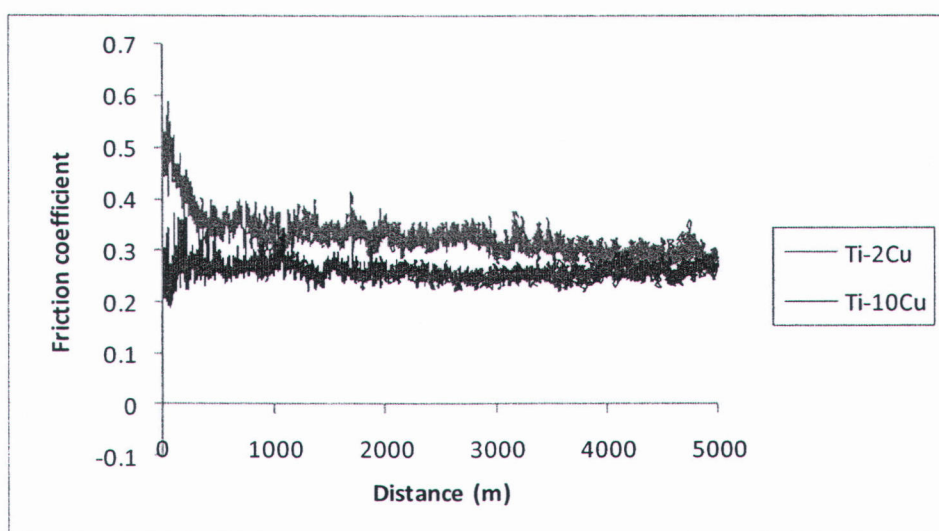


(f)

รูปที่ 4.7.2 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Pure Ti , Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านการเผาขึ้นที่ 1000° C เป็นเวลา 1 ชม และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Pure Ti (a) 100X; (b) 1000X; Ti-2Cu (c) 100X; (d) 1000X; Ti-10Cu (e) 100X; (f) 1000X.

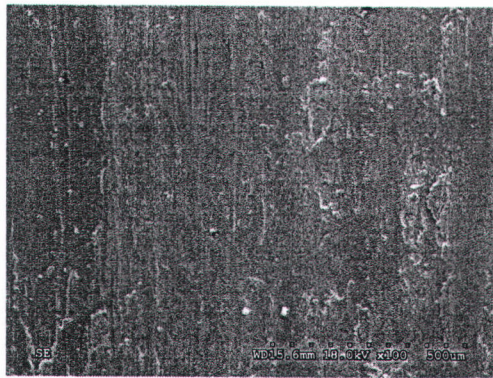
รูปถ่ายพื้นผิวของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Pure-Ti, Ti-2Cu และ Ti-10Cu ผ่านการเผาผืนที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. แสดงในรูปที่ 4.7.2 จากรูปที่ 4.7.2 (a) และ (b) พบว่ามีเศษวัสดุ (Debris) มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวหลุดออกมาในระหว่างการทดสอบและเกาะติดกับพื้นผิวเป็นจำนวนมากซึ่งก็คือออกไซด์ของโลหะและแสดงให้เห็นความเสียหายหลังการทดสอบซึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับ Ti-2Cu ในรูปที่ 4.27 (c) และ (d) และ Ti-10Cu ในรูปที่ 4.27 (e) และ (f)

ความเสียหายหลังการทดสอบจากรูป 4.7.2 พบว่า Pure Ti มีความเสียหายมากที่สุด รองลงมาเป็น Ti-10Cu และ Ti-2Cu ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากจะเกิดความเสียหายหลังทดสอบมาก

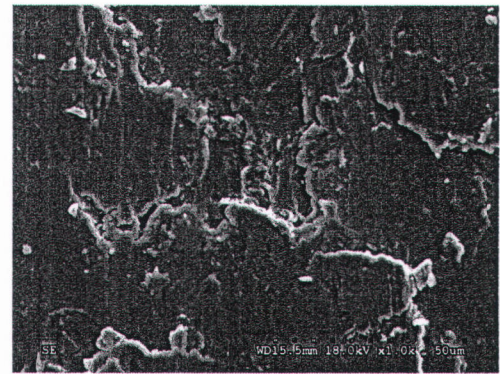


รูปที่ 4.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผืน ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.

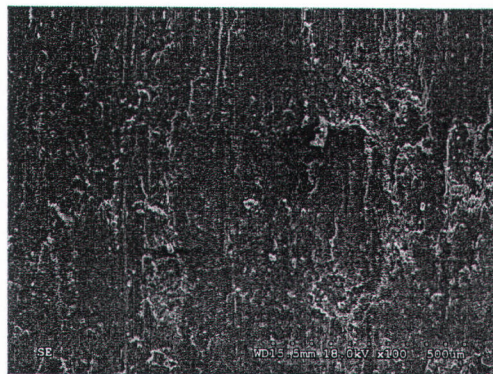
รูปที่ 4.7.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระหว่างทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ Ti-2Cu มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.4 และ Ti-10Cu มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.3



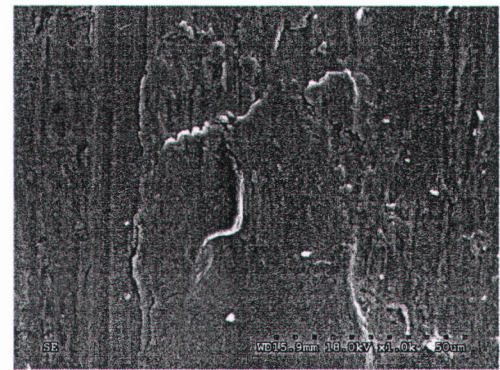
(a)



(b)



(c)

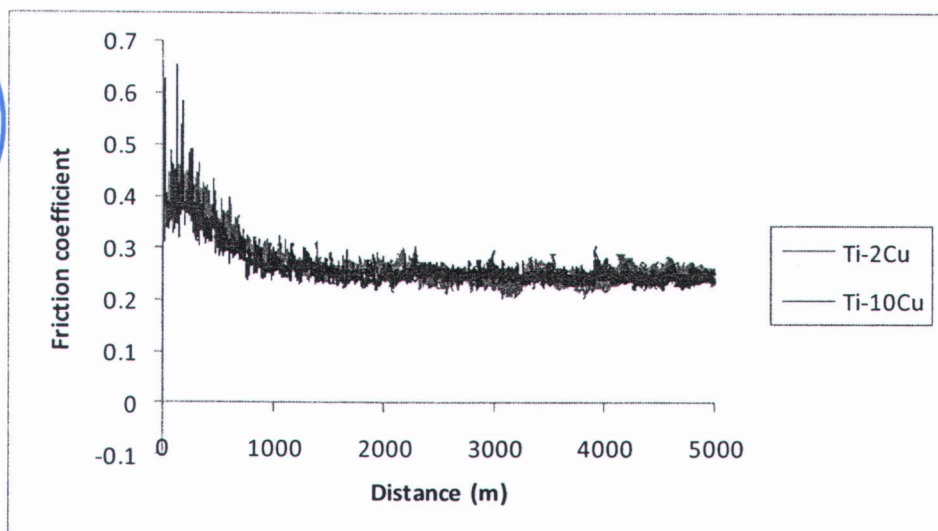


(d)

รูปที่ 4.7.4 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านการเผาผิวกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu (a) 100X; (b) 1000X; Ti-10Cu (c) 100X; (d) 1000X.

รูปถ่ายพื้นผิวของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu และ Ti-10Cu ผ่านการเผาผิวกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. แสดงในรูปที่ 4.7.4 พบว่าเศษวัสดุที่เกาะติดบนพื้นผิวของชิ้นงานมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.7.2 และความเรียบผิวมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Ti-2Cu และ Ti-10Cu พบว่า Ti-10Cu ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยกว่า Ti-2Cu มีความเรียบผิวมากกว่า [รูปที่ 4.7.4 (b) และ (d)] ซึ่งมีแนวโน้มซึ่งคล้ายคลึงกันกับชิ้นงานที่เผาผิวกที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม.

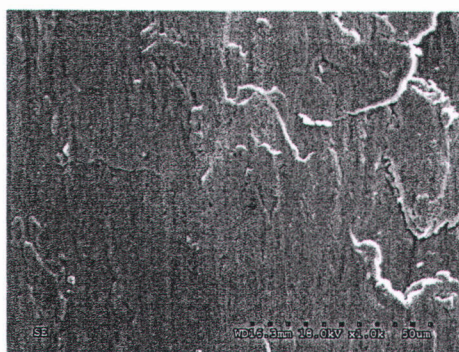
เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเผาผิวกที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. พบว่า Ti-2Cu เผาผิวกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าความเสียหายของพื้นผิวจึงมีมากกว่าเมื่อเทียบกับรูป 4.7.2 (d) ส่วน Ti-10Cu ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยกว่าจะมีความเรียบผิวที่มากกว่าเมื่อเทียบกับรูป 4.7.3 (f)



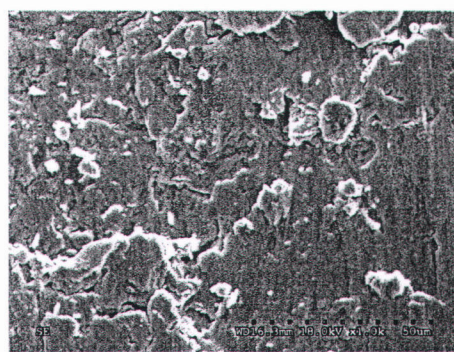
รูปที่ 4.7.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม.

โลหะผสม Ti-6Al-4V เป็นเกรดที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมไทเทเนียมและทองแดงซึ่งผลิตโดยกรรมวิธีการหล่อพบว่ามีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าโดยวัดจากมวลที่สูญหายไปหลังทดสอบความต้านทานการสึกหรอ การทำ Solution treatment จะทำให้ความแข็งของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียมและทองแดงให้ดีกว่าโลหะผสม Ti-6Al-4V ได้

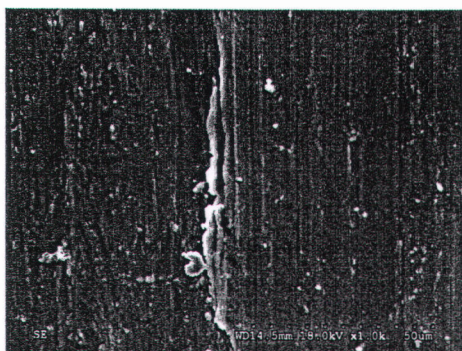
รูปที่ 4.7.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระหว่างทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานซึ่งผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. โลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง 0.2-0.3 ถึงแม้โครงสร้างจุลภาคและความแข็งจะมีความแตกต่างกัน



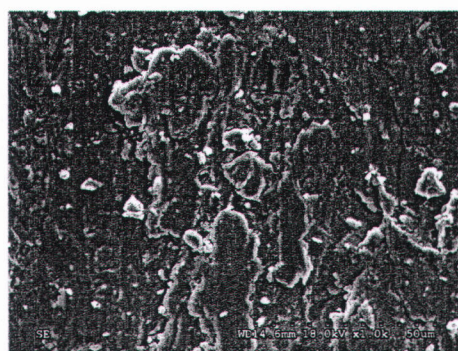
(a)



(b)



(c)



(d)

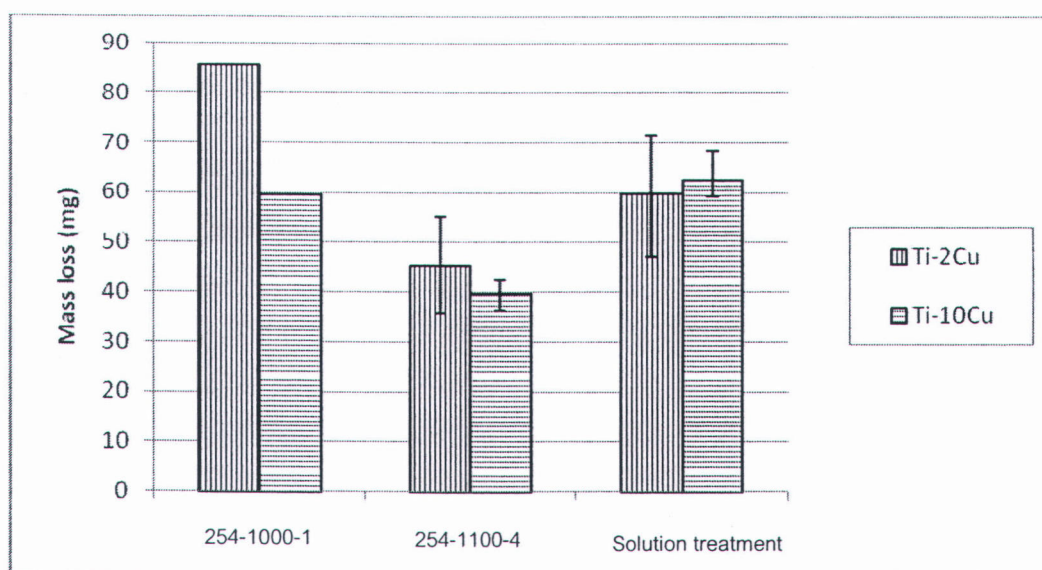
รูปที่ 4.7.6 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Ti-2Cu และ Ti-10Cu(1000X) ที่ผ่านการเผาขึ้นที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu

(a) Smooth (b) Rough; Ti-10Cu (c) Smooth (d) Rough.

รูปถ่ายพื้นผิวของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu และ Ti-10Cu เผาขึ้นที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. แสดงในรูปที่ 4.7.6 พบว่าจะมีทั้งบริเวณเรียบและบริเวณที่หยาบกว่า ในทั้งสองส่วนผสมซึ่งในบริเวณที่หยาบพบได้ตรงบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานและพบในชิ้นงานที่ผ่านการเผานี้ก็อย่างเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบบริเวณที่เรียบและหยาบของทั้งสองส่วนผสมพบว่า Ti-10Cu มีความเรียบมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงที่คงที่ของทั้งสองส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. เพียงอย่างเดียวในบริเวณที่เรียบพบว่า Ti-2Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment มีความ

เรียบผิวมากกว่าและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่าแต่สำหรับ Ti-10Cu จะมีความเรียบผิวใกล้เคียงกันเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7.7 ค่า Mass loss หลังทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

ค่ามวลที่สูญเสียไปหลังผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. และ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. และโลหะผสมที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. แสดงในรูปที่ 4.7.7

โลหะผสมที่สูญเสียมวลหลังทดสอบมากที่สุดคือ Ti-2Cu เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. โดยมวลที่สูญเสียไปเท่ากับ 85.6 มิลลิกรัม และโลหะผสมซึ่งสูญเสียมวลน้อยที่สุดคือ Ti-10Cu เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. โดยมวลที่สูญเสียไปเท่ากับ 38 มิลลิกรัม

จากรูปที่ 4.7.7 พบว่าปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มวลที่สูญเสียหลังการทดสอบลดลงยกเว้นชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment

มวลที่สูญหายของชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. แม้ว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ส่วนผสมเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสิ่งที่แตกต่างกันอีกสิ่งหนึ่งระหว่างการเผาผนึกทั้งสองเงื่อนไขนี้คือชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. จะมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าและมีความสมบูรณ์ของโครงสร้างยูเทคตอยด์มากกว่าเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม.

มวลที่สูญหายของชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เผาผืนที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. ในทั้งสองส่วนผสมถึงแม้จะมีค่าความแข็งที่มากกว่า อาจเกิดจากผลของโครงสร้างจุลภาคซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนจะมีเฟส α -Ti และ Ti_2Cu ซึ่งการมีอยู่ร่วมกันของทั้งสองเฟสนี้จะทำให้ค่า plastic deformation resistance ดีกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment มาโดยมีเฟส α -Ti และ β -Ti

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะบ่งบอกถึงความเสียหายของพื้นผิวหลังจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากจะทำให้พื้นผิวหลังการทดสอบเสียหายมากส่วนมวลที่สูญเสียหลังการทดสอบจะขึ้นกับค่าความแข็งเป็นหลัก ความแข็งมากจะทำให้มวลที่สูญเสียไปลดลง แต่อาจมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องด้วยเช่น ปริมาณรูพรุน ความสมบูรณ์ของโครงสร้างยูเทคตอยด์ และเฟสที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาค ปริมาณรูพรุนที่น้อยและการมีอยู่ของโครงสร้างยูเทคตอยด์ซึ่งช่วยป้องกันการเกิด plastic deformation ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง[9] ทำให้มวลที่สูญเสียหลังการทดสอบลดลง