

3. ผลการทดลอง

ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการ Co-electrodeposition ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง มีผิวเรียบสม่ำเสมอ และชั้นเคลือบไม่หลุดร่อน ยกเว้นในกรณีของชุดชิ้นงานที่ผลิตโดยมี 0.5 μm WC 2 g/l ที่มีรอยแตกบนผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบอยู่ระหว่าง 20-40 μm ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟที่ใช้ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าการผสมผง WC ในน้ำยา electrolyte ไม่ส่งผลโดยเด่นชัดต่ออัตราเร็วในการ ชุบเคลือบของโลหะ NiW ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวของชิ้นงานได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-5 ชิ้นงานที่ผลิตโดยใช้ 3 μm WC 0.2 g/l และความหนาแน่นไฟที่ 0.1 A/cm^2 มีพื้นผิวที่ประกอบด้วยเมตริกของโลหะและกระจัดกระจายไปด้วย nodule ที่มีขนาดใหญ่กว่าผง WC โดย nodule เหล่านี้ติดกันเป็น agglomerate (รูปที่ 2a) เมื่อปริมาณผง WC ที่เติมในน้ำยา electrolyte ได้เพิ่มขึ้นเป็น 1 g/l และ 2 g/l พบว่า ลักษณะผิวเคลือบคล้ายคลึงกับในกรณี 0.2 g/l แต่ nodule มีขนาดเล็กลง (รูปที่ 2b และ 2c)

เมื่อความหนาแน่นไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.15 A/cm^2 (0.2 g/l, 3 μm WC) agglomerate ที่พบในกรณีแรกถูกแทนที่ด้วยพื้นผิวที่มีลักษณะเป็น nodule ขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว (รูป 3a) โครงสร้าง meso-scale ในลักษณะนี้เป็นที่พบโดยทั่วไปสำหรับวัสดุชุบเคลือบที่ผลิตโดยวิธี electrodeposition โดย nodule ดังกล่าวเป็น colony ของผลึกเกรน สำหรับในกรณี NiW นี้ ภายใน nodule ประกอบไปด้วยเกรนในระดับนาโนเมตรที่เกาะกลุ่มรวมกัน เมื่อปริมาณผง WC เพิ่มขึ้นเป็น 1 g/l ขนาดของ nodule ได้ขยายใหญ่ขึ้น ทำให้โครงสร้างพื้นผิววัสดุมีลักษณะคล้ายกระดองเต่า (รูป 3b) และเมื่อเพิ่มปริมาณผง WC เป็น 2 g/l โครงสร้างมีความพรุนอย่างเห็นได้ชัด และประกอบด้วย nodule ที่รวมกันเป็น agglomerate (รูป 3c)

เมื่อเพิ่มความหนาแน่นไฟฟ้าไปอีกเป็น 0.2 A/cm^2 ชิ้นงานที่ผลิตโดยมีผง WC 3 μm ในปริมาณ 0.2 g/l (รูป 4a) มีลักษณะพื้นผิวคล้ายคลึงกับในกรณี 0.15 A/cm^2 ที่มีการเติมผงในปริมาณเท่ากัน (0.2 g/l) (รูป 3a) หากแต่ nodule มีขนาดใหญ่มากขึ้น นอกจากนี้พบว่า ปริมาณของ nodule ที่มีขนาดใหญ่ได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ WC จาก 0.2 g/l เป็น 1 g/l และ 2 g/l (รูป 4b และ 4c)

เมื่อใช้ผง sub-micro WC (0.5 μm) ประกอบกับการจ่ายไฟที่ความหนาแน่น 0.1 A/cm^2 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จากการเติมผง 0.2 g/l ในสารละลาย electrolyte ประกอบด้วย matrix โลหะที่กระจายไปด้วย nodule ขนาดใหญ่ (รูป 5a) เมื่อปริมาณผง WC เพิ่มเป็น 1 g/l ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานประกอบไปด้วย agglomerate ของ nodule พื้นผิวลักษณะเดียวกันนี้เกิดขึ้นในกรณีที่เติมผง WC ในปริมาณ 2 g/l แต่โครงสร้างมีความพรุนมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผง WC

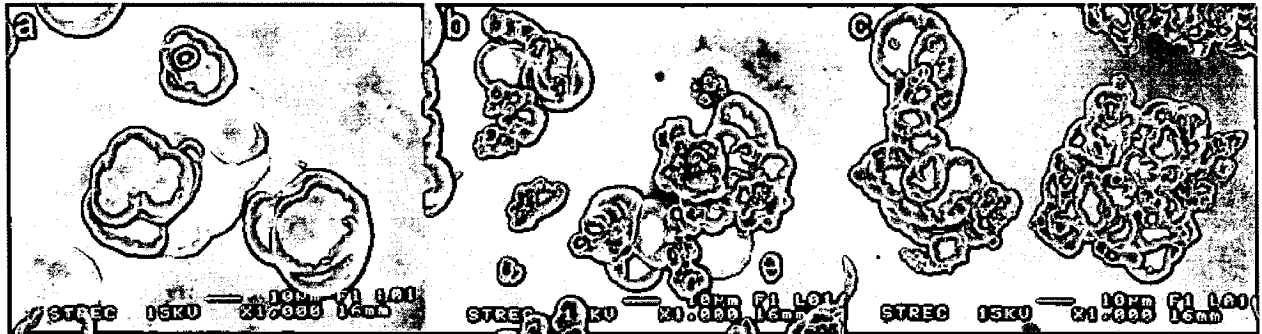


Fig. 2. Surface morphology of Ni-W/micro WC composites processed with a current density of 0.1 A/cm² and WC content of (a) 0.2 g/l, (b) 1 g/l, and (c) 2 g/l in a plating bath.

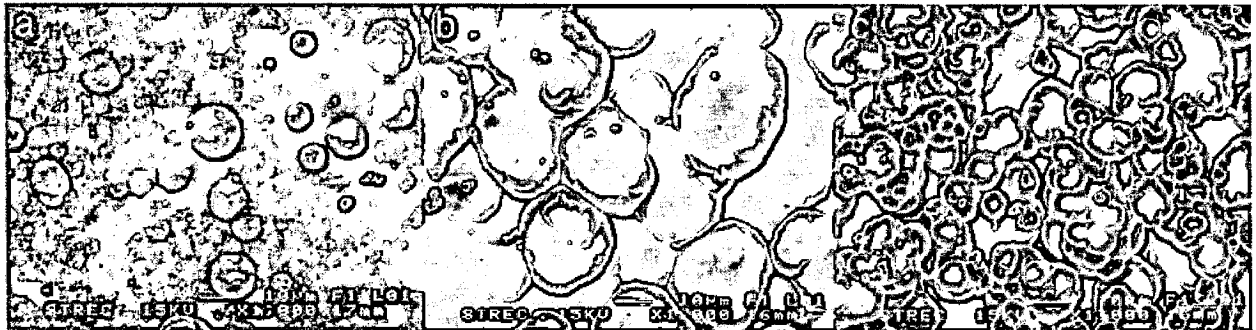


Fig. 3. Surface morphology of Ni-W/micro WC composites processed with a current density of 0.15 A/cm² and WC content of (a) 0.2 g/l, (b) 1 g/l, and (c) 2 g/l in a plating bath.

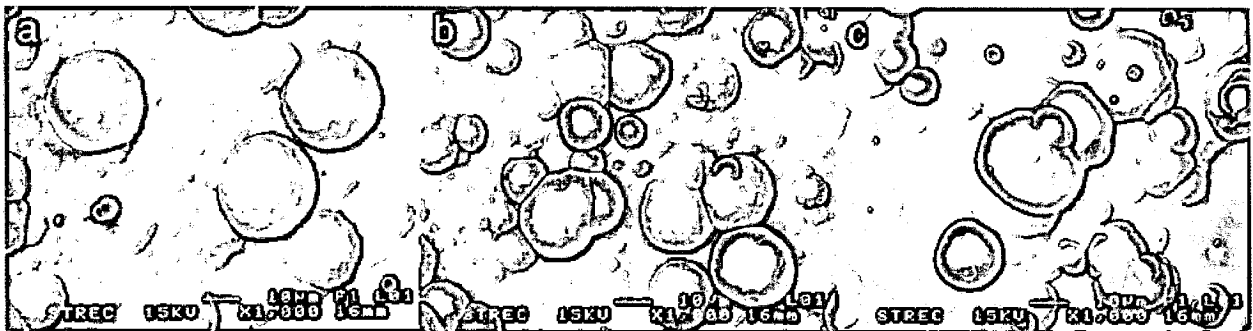


Fig. 4. Surface morphology of Ni-W/micro WC composites processed with a current density of 0.2 A/cm² and WC content of (a) 0.2 g/l, (b) 1 g/l, and (c) 2 g/l in a plating bath.

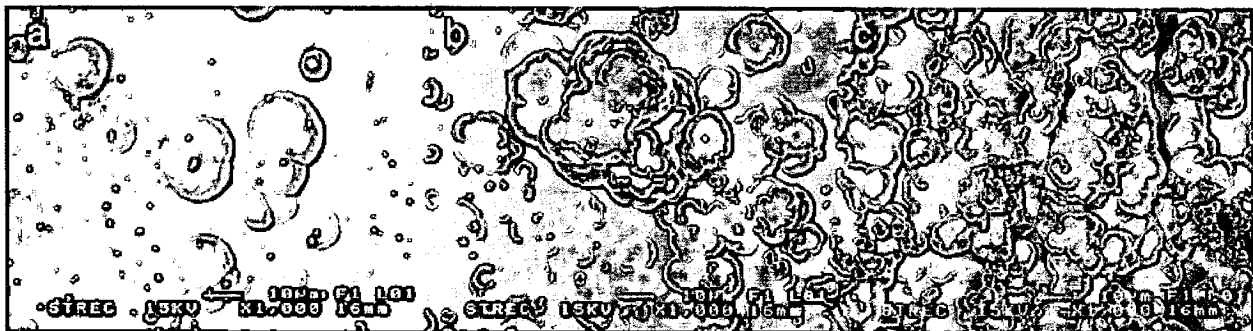


Fig. 5. Surface morphology of Ni-W/sub-micro WC composites processed with a current density of 0.1 A/cm² and WC content of (a) 0.2 g/l, (b) 1 g/l, and (c) 2 g/l in a plating bath.

รูปที่ 6 แสดงปริมาณของผง WC ที่ตกสะสมอยู่ในชั้นเคลือบ NiW เห็นได้ว่า โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณ WC ในชั้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผง WC ที่ผสมในสารละลาย electrolyte นอกจากนี้พบว่า ชั้นงานที่ผลิตขึ้นโดยจ่ายไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูง (0.2 A/cm^2) มีปริมาณ WC ที่ไม่สูงนักเมื่อเทียบกับชั้นงานกลุ่มอื่น ทั้งนี้การศึกษาโครงสร้างของวัสดุด้วยวิธี metallography ได้แสดงให้เห็นว่าผง WC ที่ผสมอยู่ใน NiW กระจายตัวอยู่ในชั้นเคลือบ และไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโลหะ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นงานด้วย EDS ได้แสดงให้เห็นว่า ทุกกลุ่มชั้นงาน มีปริมาณ N และ W ที่สม่ำเสมอ ไม่เว้นแต่ชั้นงานที่ประกอบด้วย matrix และ nodule (รูป 2a-c) นอกจากนี้พบว่า สัดส่วนปริมาณ Ni และ W ไม่ได้ถูกควบคุมด้วยปริมาณ WC ที่ผสมเข้าไป หากแต่ถูกควบคุมด้วยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ สัดส่วนปริมาณของ Ni และ W (Ni-W) ของชั้นงานที่ผลิตด้วยกระแสไฟ 0.1 A/cm^2 , 0.15 A/cm^2 และ 0.2 A/cm^2 มีค่า 75-25, 70-30, and 68-32 (atomic weight) ตามลำดับ

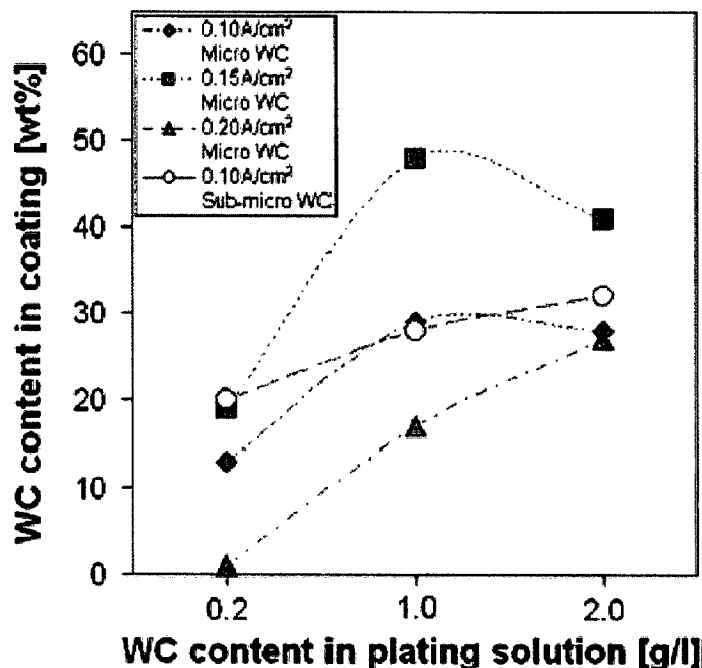


Fig. 6 The content of WC particles in Ni-W/WC composites which were fabricated using different current densities and inclusion sizes, presented as a function of WC content in a plating solution.

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างผลจากการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีคาร์เดียมและไม่เติมผง WC ด้วย X-ray diffraction จะเห็นได้ว่า XRD profile ที่ได้ของสองกรณีมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมี peak Ni(W) ที่ค่อนข้างกว้าง และมี texture (111) ผลที่ได้จึงแสดงให้เห็นว่า เกรนระดับนาโนเมตรของ NiW ยังคงมีอยู่และไม่ได้รับผลกระทบจากการผสมของผง WC

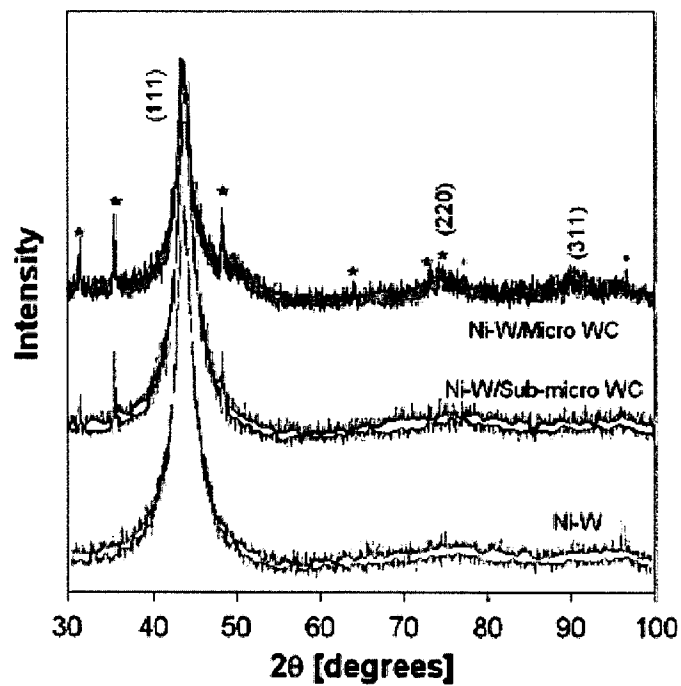


Fig. 7. X-ray diffraction (XRD) patterns of Ni-W specimens that were co-deposited with micro WC (1 g/l) and sub-micro WC particles (1 g/l), and of the specimen without WC addition. All deposits were processed with a current density of 0.1 A/cm². The sign * designates peaks of WC, while the indicated crystallographic planes are of Ni-W alloys.

รูปที่ 8 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความแข็งวัสดุ เมื่อไม่มีการผสม WC พบว่าชั้นงานที่ผลิตขึ้นด้วยความหนาแน่นไฟฟ้า 0.1, 0.15 และ 0.2 A/cm² มีความแข็ง 2.8, 6.5 และ 6.1 GPa ตามลำดับ เมื่อเติมผง WC ในปริมาณ 1 g/l ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุได้เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเพิ่มสูงขึ้นได้ถึงกว่า 4 เท่า และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ WC ในน้ำยา electrolyte ไปเป็น 2 g/l พบว่า ชั้นงานที่ผลิตด้วยผงขนาด 3 μm และใช้ความหนาแน่นไฟฟ้า 0.1 A/cm² มีค่าความแข็งที่สูงขึ้น ในทางกลับกันความแข็งของชั้นงานที่ผลิตด้วยผงขนาด 0.5 μm และ 0.1 A/cm² มีค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงจาก 1 g/l เป็น 2 g/l นอกจากนี้พบว่า ปริมาณผง WC ในน้ำยา electrolyte ไม่มีอิทธิพลต่อความแข็งของชั้นงานที่ผลิตด้วยความหนาแน่นไฟฟ้า 0.2 A/cm² ทั้งนี้ชั้นงาน 2 g/l WC 0.15 A/cm² มีความเปราะและไม่สามารถทำการวัดค่าความแข็งได้

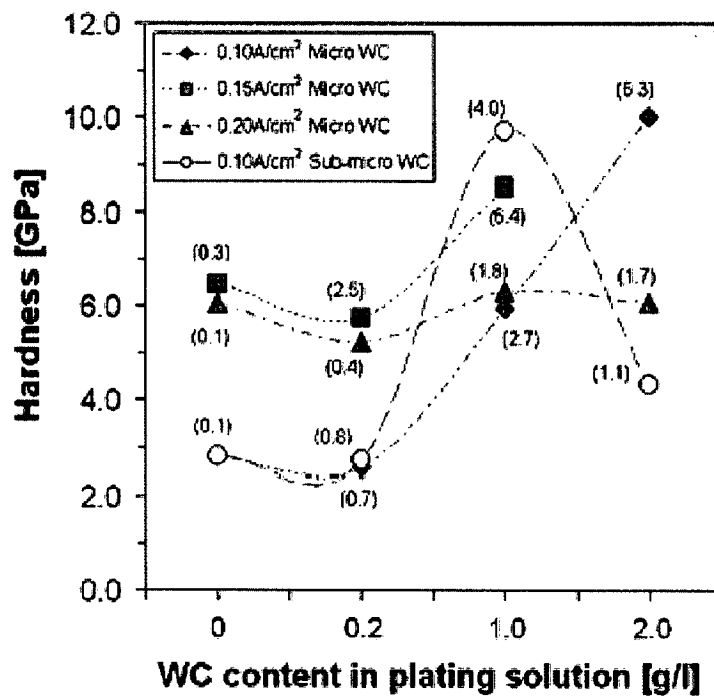


Fig. 8. The hardness of Ni-W/WC composites which were fabricated using different current densities and inclusion sizes, presented as a function of WC content in a plating solution. The standard deviations of the measurements are indicated next to the data points.

รูปที่ 9, 10 และ 11 แสดงลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน Ni-WWC ที่ทำการผลิตด้วยเทคนิค Co-Electrodeposition โดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง และมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการจ่ายไฟฟ้า คือ ค่ากระแสไฟสูงสุด (I_p) ค่า duty cycle (θ) และค่าความถี่ (V) อย่างเป็นระบบ โดยภาพรวมแล้วพบว่า ตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวมีผลต่อลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะหลักๆ กล่าวคือ ในลักษณะแรก พื้นผิวมีความคล้ายคลึงกับที่พบในกรณีการจ่ายไฟแบบ กระแสตรง โดยประกอบด้วย nodule ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดผง WC (เช่นในกรณี $I_p = 0.4 \text{ A/cm}^2$, $\theta = 50 \%$, $V = 10 \text{ Hz}$) ในลักษณะที่ 2 ผง WC จับตัวกันเป็นก้อนขนาดประมาณ $50 \mu\text{m}$ และกระจาย โดยทั่วพื้นผิว (เช่นในกรณี $I_p = 0.4 \text{ A/cm}^2$, $\theta = 10 \%$, $V = 10 \text{ Hz}$) ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการจ่าย กระแสไฟฟ้าแบบช่วงมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของผง WC ในชั้นเคลือบ Ni-W

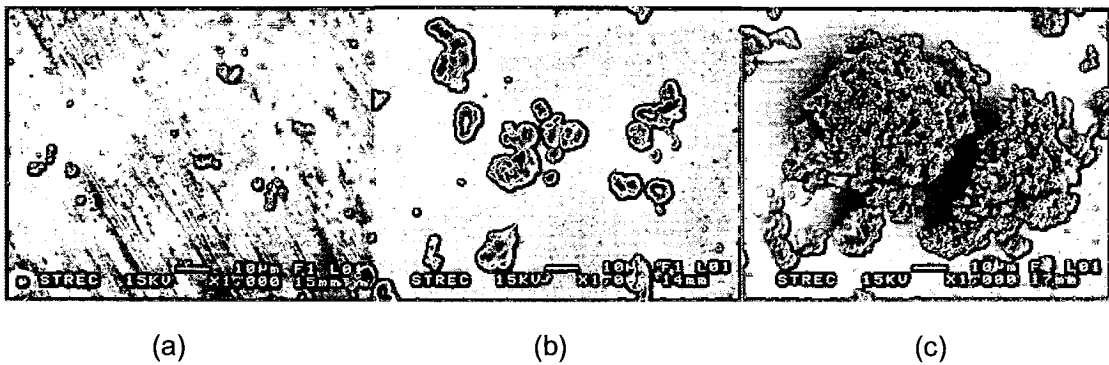


Fig. 9. Surface morphology of Ni-WWC processed with pulse current with $I_p = 0.1 \text{ A/cm}^2$, $v = 100 \text{ Hz}$, $\theta =$ (a) 10%, (b) 30%, (c) 50%

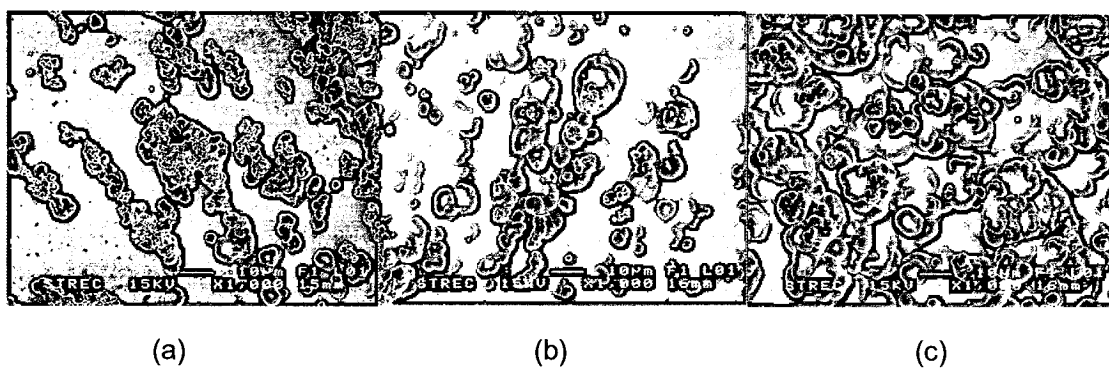


Fig. 10. Surface morphology of Ni-WWC processed with pulse current with $I_p = 0.4 \text{ A/cm}^2$, $v = 100 \text{ Hz}$, $\theta =$ (a) 10%, (b) 30%, (c) 50%

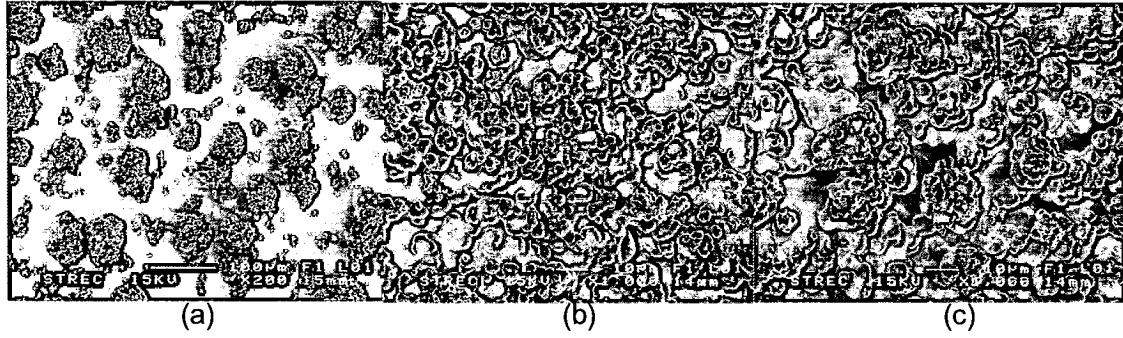


Fig. 11. Surface morphology of Ni-WWC processed with pulse current with $I_p = 0.4A/cm^2$, $v = 10Hz$, $\theta =$ (a)10%, (b)30%, (c) 50%

รูปที่ 12 แสดงปริมาณของ WC ที่ตกสะสมอยู่ในชั้นเคลือบ NiW เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง เห็นได้ว่าตัวแปรในการจ่ายกระแสไฟแบบช่วงทั้ง 3 ที่กล่าวข้างต้นมีผลต่อปริมาณของ WC ในชั้นเคลือบเป็นอย่างมาก และในบางกรณีมีปริมาณ WC ที่สูงกว่าในกรณีของการผลิตโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง ผลที่ได้นี้จะทำการวิเคราะห์และนำเสนอในหัวข้อถัดไป

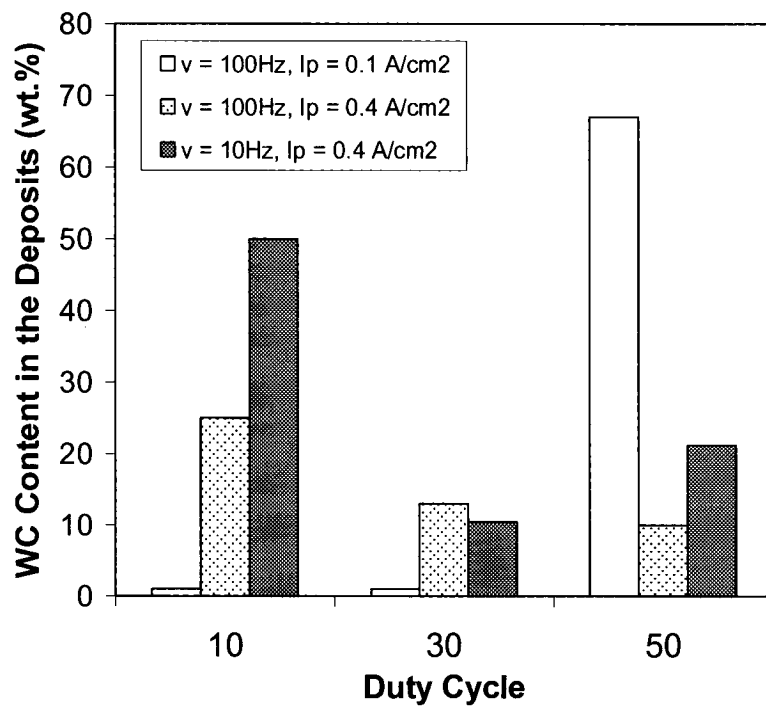


Fig.12. The content of WC particles in Ni-WWC composites fabricated with pulse current with various peak currents, duty cycles, and frequencies.