การเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กทำแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการ TD

ผศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย
รศ.ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์
นส.ศิริรัตน์ สมพันธุ์
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำนำ

เป็นที่ทราบกันว่าแม่พิมพ์มีราคาแพงมาก จำเป็นที่จะต้องยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยทั่วไปแล้วแม่พิมพ์ต้องทนทานต่อการสึกหรอ จึงใช้เหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงด้วยการชุบแข็งและอบคืนตัวเหล็กกล้า แต่ก็ยืดอายุได้เพียงขีดจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของแม่พิมพ์เพื่อให้ทนทานต่อการสึกหรอด้วยการเคลือบและแพร่ซึมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อน (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion TRD)[1] ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบและแพร่ซึมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อน กล่าวคือทำให้เกิดปฏิกิริยาของธาตุที่มี Affinity สูงกับธาตุคาร์บอนหรือไนโตรเจนมาเกาะที่ผิวชิ้นงาน กับธาตุคาร์บอนหรือไนโตรเจนจากเนื้อชิ้นงาน สร้างชั้นคาร์ไบด์หรือไนตรายด์ที่ผิวชิ้นงาน วิธีการทำ TRD ยังแบ่งออกเป็นวิธีใช้เกลือหลอมเหลวกับวิธีใช้ผง ในวิธีที่ใช้เกลือหลอมเหลวนั้นมีกระบวนการ TD ซึ่งเป็นเทคโนโลยี่การเคลือบชั้นคาร์ไบด์โดยการจุ่มชิ้นงานลงในเกลือหลอมเหลว

กระบวนการ TD ย่อมาจาก Toyota Diffusion Coating Process ดั้งเดิมได้รับการพัฒนามาจากศูนย์วิจัยกลางของโตโยต้า วิธีนี้เป็นการสร้างชั้นคาร์ไบด์โดยการจุ่มชิ้นงานอย่างเช่นเหล็กกล้าลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศ ขณะเดียวกันก็สามารถทำการชุบแข็งชิ้นงานภายในกระบวนการได้ด้วย การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการ TD นั้นเมื่อเทียบกับ CVD และ PVD แล้วใช้เครื่องมือราคาถูกกว่าและการทำงานง่ายกว่า สามารถที่จะใส่หรือนำชิ้นงานออกมาได้ง่าย การชุบแข็งหรือการอบชุบความร้อนอื่น ๆ สามารถทำได้พร้อมกันไป นอกจากนี้ยังสามารถเคลือบซ้ำลงไปบนชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการ TD มาแล้วได้ สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้ง่าย และชั้นเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอดีด้วย[1-4]

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิจัยการเคลือบพื้นผิวด้วยกระบวนการ TD โดยเคลือบชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นได้เลือกเหล็ก D 2 ตามมาตรฐาน ASTM (หรือ SKD 11 ตามมาตรฐาน JIS) เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนได้เลือกเหล็ก H 13 (หรือ SKD 61) และเหล็กกล้าความเร็วสูงได้เลือกเหล็ก M 2 (หรือ SKH 51) เหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์เหล่านี้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีปริมาณคาร์บอนสูง สามารถเคลือบผิวเป็น

วาเนเดียมคาร์ไบด์ได้โดยตรง คณะผู้วิจัยจึงเลือกทดลองบางส่วนของกระบวนการ โดยศึกษาปัจจัยบางตัวต่อการเคลือบและการทดลองทั้งกระบวนการตั้งแต่การให้ความร้อนก่อนเคลือบผิวด้วยชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ และการอบชุบความร้อนหลังเคลือบผิวกับเหล็ก SKD 11 เพื่อเป็นพื้นฐานของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการ TD ต่อไป

วิธีการทดลอง

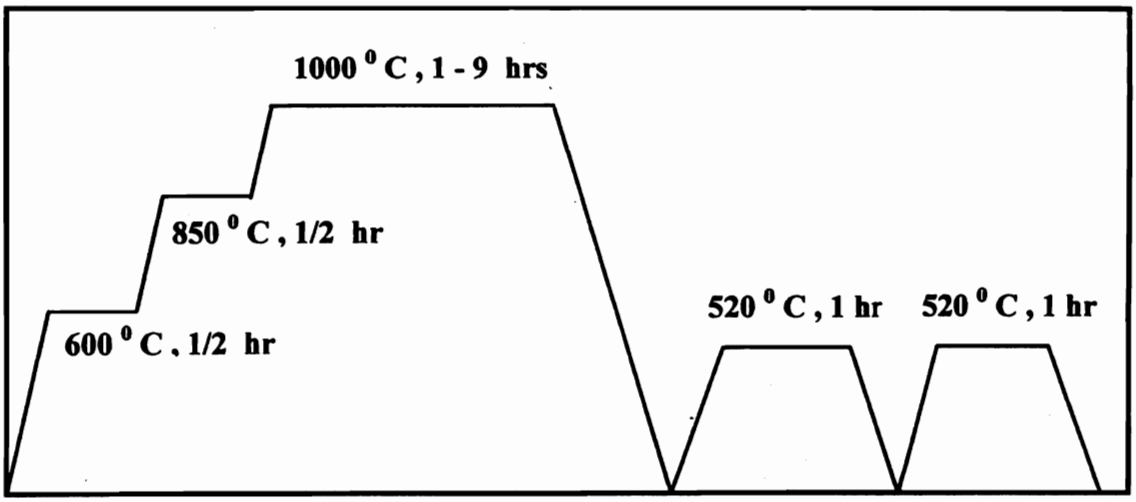
การทดลองในขั้นนี้ต้องการหาวิธีเคลือบผิวให้ได้เป็นชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ก่อน จึงใช้ตัวอย่างชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดเป็น 1 นิ้ว X 1 นิ้ว ทั้งนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกเป็นการเคลือบผิวเหล็ก SKD 11 เพื่อหาวิธีเคลือบผิวให้เป็นชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ ส่วนชุดที่สองใช้ผลการทดลองจากชุดแรกในการเคลือบผิวเหล็ก SKD11, SKD 61 และ SKH 51 3 ชนิดพร้อมกัน เพื่อตรวจสอบผลของชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นกับเหล็ก SKD 61 และ SKH 51 เทียบกับเหล็ก SKD 11 เหล็กกล้าทั้ง 3 ชนิดมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยการขัดผิวที่เป็นสนิมออกให้ผิวสะอาด เตาเกลือที่ใช้ในการทดลองมีอ่างเกลือทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม มีแผงควบคุมในการควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่แช่ชิ้นงานไว้ในอ่างเกลือ โดยการใช้เทอร์โมคัพเพิลใส่ไว้ในอ่างเกลือ วัสดุที่ใช้ในการเคลือบก็มีผงบอ-แรกซ์ เฟอร์โรวาเนเดียมและอะลูมิเนียม อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวคือ 1000 °C ซึ่งเป็นขีดจำกัดสูงสุดของเตาเกลือที่ใช้อยู่ โดยการแปรผันเวลาแช่ตั้งแต่ 1 ถึง 9 ชั่วโมง การทดลองชุดแรกคือ การเคลือบผิวเหล็ก SKD11 โดยไม่สนใจการอบชุบความร้อนก่อนและหลังการเคลือบชิ้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ ได้ทำการทดลองหาอิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อการเกิดชิ้นเคลือบ โดยการเติมและไม่เติมอะลูมิเนียมในการเคลือบผิวเหล็ก SKD 11 นี้ ส่วนการทดลองชุดที่สองซึ่งเคลือบผิวเหล็กกล้าทั้ง 3 ชนิดนั้น มีการอบชุบความร้อนดังรูปที่ 1 คือ การอุ่นชิ้นงาน (Preheat) ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเตาอบชุบ (Muffle Furnace) โดยให้มีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านภายในเตาอบชุบ จากนั้นจะอุ่นที่ 850 °C เป็นเวลา 30 นาทีในเตาเกลือและเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 °C ตามเวลาที่กำหนดไว้ หลังจากที่แช่ชิ้นงานไว้ครบกำหนดเวลาแล้ว นำชิ้นงานออกจากเตาเกลือปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการอบคืนตัว 2 ครั้งที่อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นสุดท้ายนั้นทำการขจัดบอแรกซ์ที่ติดผิวชิ้นงานออกโดยอุ่นในน้ำอุ่น

ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ TD แล้วนำมาตัดตามภาคตัดขวาง อัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างเพื่อตรวจสอบผิวเคลือบใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (SEM) การวิเคราะห์ธาตุบนชั้นเคลือบใช้เครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)

ผลการทดลองและข้อคิดเห็น

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จุ่มในอ่างเกลือที่ไม่เติมอะลูมิเนียม รูปนี้มีกำลังขยาย 1000 เท่า ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดทางซ้ายมือของรูปเป็นโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD 11 ทางขวามือของรูปเป็นเรซินที่นำมาอัดตัวอย่างจะเห็นได้ว่าไม่มีชั้นเคลือบที่ผิวชิ้นงานเลย ส่วนรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จุ่มในอ่างเกลือที่เติมอะลูมิเนียม จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีชั้นเคลือบอยู่ที่ผิวชิ้นงานเหล็ก SKD11 จึงกล่าวได้ว่าอะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นเคลือบบนผิวเหล็ก



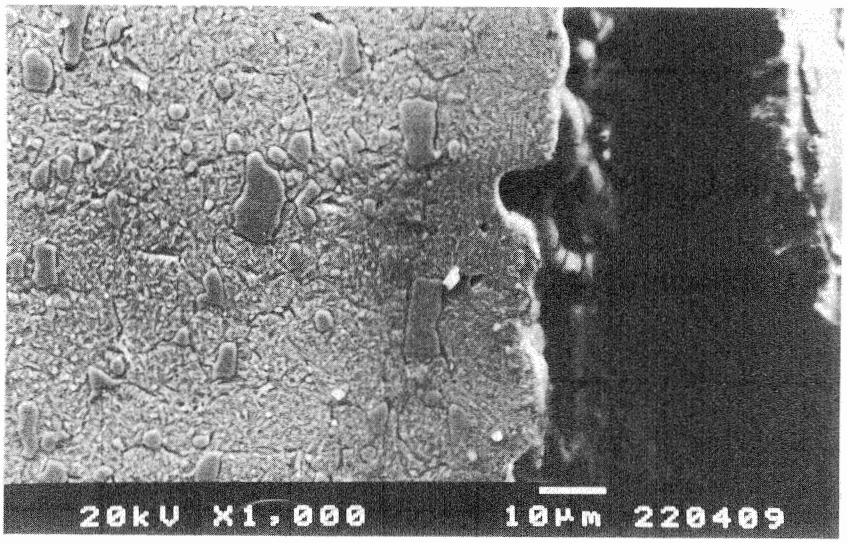
รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการอบชุบความร้อนในกระบวนการ TD

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ 3 ชนิด

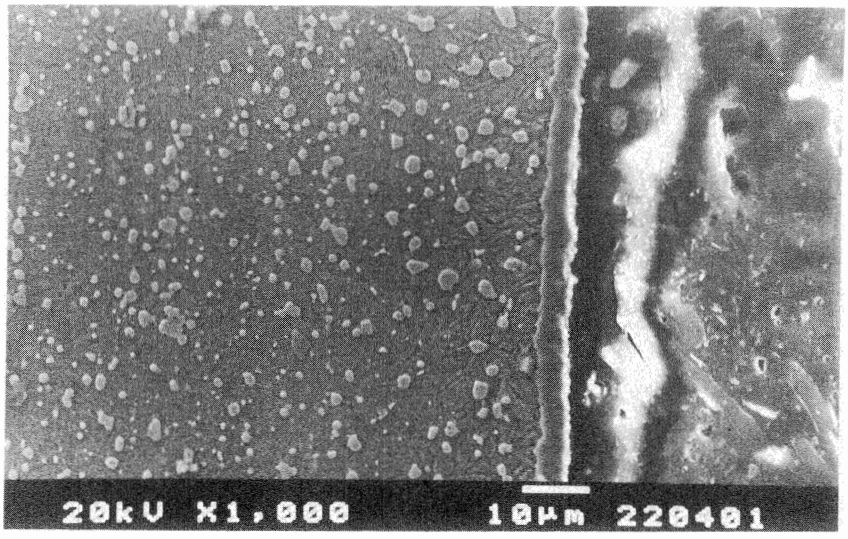
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Co	Cu	Ni	W
D2	1.40	0.302	0.275	0.025	0.010	11.11	0.70	0.764	0.045	0.208	0.272	-----
H13	0.32	0.898	0.340	0.020	0.003	4.75	1.35	0.880	-----	0.069	0.253	-----
M2	0.78	0.388	0.211	0.029	0.015	4.00	4.94	1.750	0.660	0.139	0.249	6.64

อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่จุ่มในอ่างเกลือที่เติมอะลูมิเนียม แต่ไม่เกิดชั้นเคลือบก็มีอีก 2 กรณีคือ กรณีที่ผิวชิ้นงานไม่สะอาดคือเป็นสนิมดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงผิวชิ้นงานด้านที่ไม่ได้ผ่านการขัดให้สะอาดก่อนนำมาเคลือบผิว และกรณีที่ผิวชิ้นงานมีอะลูมิเนียมเกาะอยู่ที่ผิวดังรูปที่ 5 ทั้ง 2 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา จะเห็นได้ว่าอะลูมิเนียมเกาะติดแน่นและกินลึกเข้าไปในเนื้อเหล็ก ทำให้บริเวณนี้ไม่เกิดชั้นเคลือบขึ้นมา

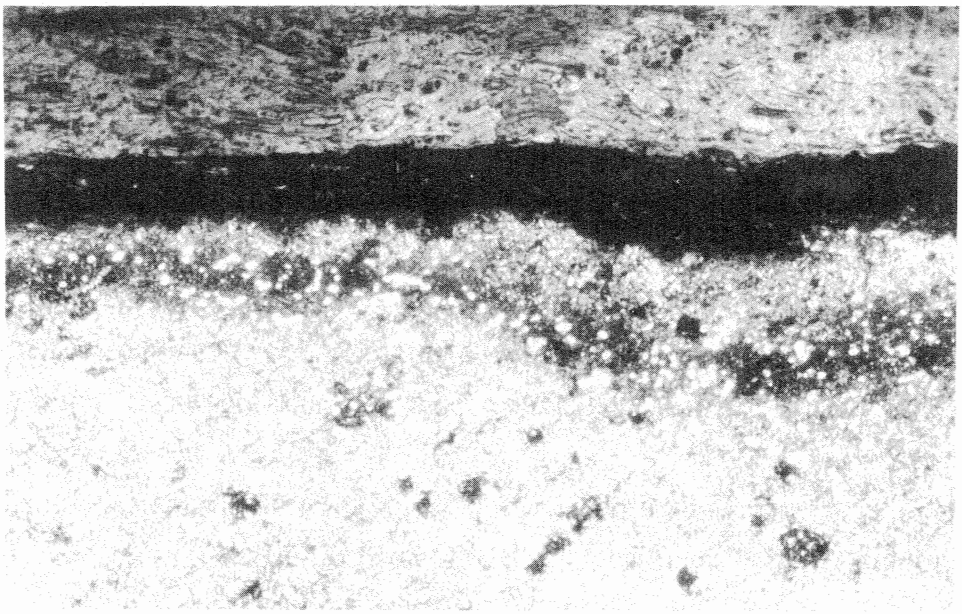
จากการที่เติมอะลูมิเนียมแล้วเกิดชั้นเคลือบนั้น เป็นไปได้ว่าอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นรีดิวเซอร์ โดยการรีดิวส์วานาเดียมออกไซด์[2] ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของเฟอร์โรวาเนเดียมกับบอแรกซ์ภายในอ่างเกลือ ทำให้มีวาเนเดียมอยู่รอบ ๆ ชิ้นงานซึ่งรวมตัวกับคาร์บอนที่แพร่ซึมออกมาจากภายในเนื้อเหล็กฟอร์มตัวเป็นชั้นบางๆ ของวานาเดียม



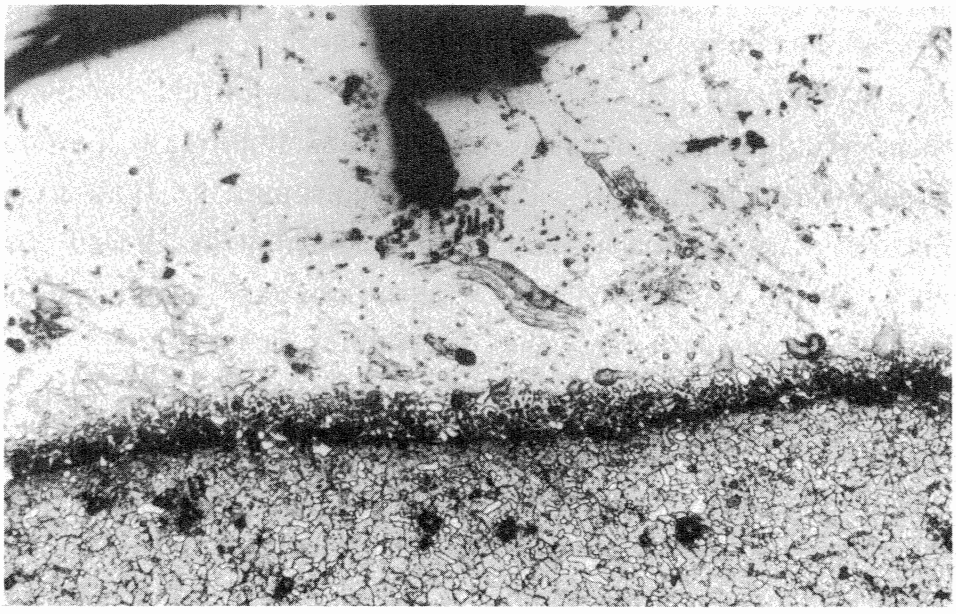
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จุ่มลงในอ่างเกลือที่ไม่เติมอะลูมิเนียม



รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จุ่มลงในอ่างเกลือที่เติมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4 แสดงผิวชิ้นงานที่สกปรกจึงไม่เกิดชั้นเคลือบ (กำลังขยาย 100 เท่า)



รูปที่ 5 แสดงผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดชั้นเคลือบเนื่องจากมีอะลูมิเนียมเกาะอยู่ที่ผิวชิ้นงาน (กำลังขยาย 100 เท่า)

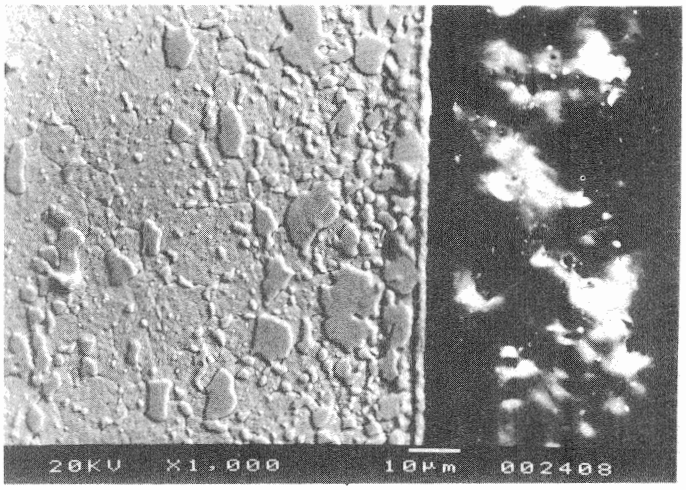
คาร์ไบด์และชั้นเคลือบค่อยๆ หนาขึ้นเรื่อยๆ จากการแพร่ซึมอย่างต่อเนื่องของคาร์บอนจากเนื้อเหล็กมายังชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นก่อน และจากวาเนเดียมในอ่างเกลือที่ผิวชั้นเคลือบ หากไม่เติมอะลูมิเนียมลงไปในอ่างเกลือ ก็จะทำให้วาเนเดียมยังคงอยู่ในรูปของวาเนเดียมออกไซด์อยู่และเกิดชั้นของวาเนเดียมคาร์-ไบด์ขึ้นมาได้ยาก ในกรณีที่ผิวชิ้นงานไม่สะอาดเนื่องจากมีสนิมอยู่นั้น ชั้นสนิมย่อมขัดขวางวาเนเดียม ไม่ให้รวมตัวกับคาร์บอนที่แพร่ซึมมาใกล้ผิวเหล็ก จึงไม่เกิดชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ขึ้นมา

รูปที่ 6 แสดงความเปลี่ยนแปลงของความหนาชั้นเคลือบเมื่อแช่ไว้ที่ 1000 °C เป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ดังรูป a, b และ c ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามเวลาในการแช่ที่อุณหภูมิ 1000 °C ในอ่างเกลือ โดยได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 1.9, 5.2 และ 12.4 ไมครอน ตามเวลาที่แช่ไว้ 1, 4 และ 9 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อนำเอาค่าของความหนาชั้นเคลือบและเวลาที่แช่ไว้ที่อุณหภูมิ 1000 °C มาพล็อตเป็นกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 2 จะได้ผลดังรูปที่ 7 กล่าวคือความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาที่แช่ไว้โดยมีหน่วยของเวลาเป็นชั่วโมง

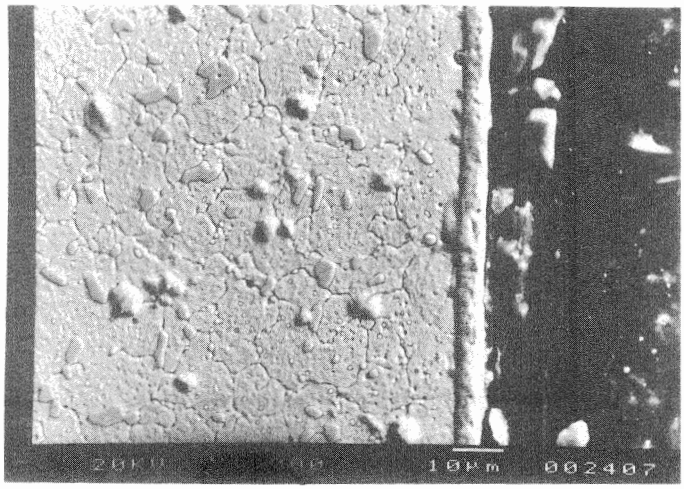
สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณชั้นเคลือบด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยรูป a เป็นรูปโครงสร้างจุลภาคแสดงเนื้อพื้นของเหล็กทางซ้าย ชั้นเคลือบเป็นแนวยาวที่หนาค่อนข้างสม่ำเสมออยู่ตรงกลางและเรซินที่ใช้อัดตัวอย่างอยู่ทางขวา ส่วนรูป b,c และ d เป็นรูป X-ray image แสดงบริเวณที่มีธาตุวาเนเดียม, ธาตุเหล็กและธาตุคาร์บอนตามลำดับ ในรูป b บริเวณที่แสดงจุดสีขาวคือบริเวณที่มีธาตุวาเนเดียมอยู่บริเวณที่เป็นชั้นเคลือบจะเป็นสีขาวมาก แสดงว่าเป็นวาเนเดียมตรงชั้นเคลือบมาก ส่วนในเนื้อเหล็กมีจุดสีขาวอยู่บ้าง แสดงว่ามีวาเนเดียมอยู่ในเนื้อเหล็ก จากตารางที่ 1 ก็แสดงไว้ว่ามีวาเนเดียมในอยู่เหล็ก SKD 11 อยู่ ส่วนบริเวณเรซินที่มีจุดสีขาวอยู่บ้างนั้นเข้าใจว่าเป็น noise ที่เครื่องตรวจจับได้ ในความเป็นจริงไม่น่าจะมีวาเนเดียมอยู่ในเรซิน รูป c ก็คล้ายกับรูป b ต่างกันเพียงแต่ว่าจุดขาวแสดงบริเวณที่มีธาตุเหล็กอยู่ จะเห็นว่าบริเวณเนื้อเหล็กมีจุดขาวมากคือมีธาตุเหล็กอยู่มาก บริเวณชั้นเคลือบมีจุดขาวอยู่น้อยมากก็มีธาตุเหล็กอยู่น้อยมาก ส่วนบริเวณเรซินก็น่าจะเป็น noise ที่เครื่องตรวจจับได้ (a) 1 ชม. (b) 4 ชม. และ (c) 9 ชม. เช่นกัน สำหรับรูป d นั้นปรากฏว่ามีคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็ก ซึ่งอาจอยู่ในสภาพของคาร์ไบด์หรือละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคาร์บอนอยู่ในชั้นเคลือบและมีคาร์บอนอยู่ในเรซินมาก จากผลของการวิเคราะห์ธาตุเหล่านี้พอจะบอกได้ว่า บริเวณที่เป็นชั้นเคลือบนั้นเป็นชั้นของวาเนเดียมคาร์ไบด์

รูปที่ 9 แสดงผลของการเคลือบผิวเหล็กกล้า 3 ชนิดคือ SKD 11, SKD 61 และ SKH 51 โดยรูป a คือเหล็ก SKD 11 รูป b คือ SKD 61 และรูป c คือ SKH 51 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กทั้ง 3 ชนิดไม่เท่ากัน กล่าวคือ บนผิวเหล็ก SKD11 ชั้นเคลือบหนา 12.3 ไมครอน บนผิวเหล็ก SKD61 ชั้นเคลือบหนา 8.6 ไมครอน และบนผิวเหล็ก SKH51 ชั้นเคลือบหนา 7.2 ไมครอน เหล็ก SKD 11 ที่ได้จากการทดลองที่ไม่แสดงรอยแตกแต่อย่างใด เนื่องจากได้มีการอุ่นชิ้นงาน 2 ชั้นที่ 600 °C และ 850 °C เพื่อไม่ให้มีความเครียดภายในเนื้อเหล็กมาก และหลังจากการเย็นตัวในอากาศแล้วก็ยังทำการอบคืนตัว 2 ครั้งอีกด้วย อย่างไรก็ตามเหล็ก SKH51 มีรอยแตกอยู่ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอุ่นชิ้นงาน การชุบแข็งโดยการเย็นตัวในอากาศและอุณหภูมิการอบคืนตัวที่ใช้นั้นเหมาะสมกับเหล็กเกรด SKD 11 แต่ไม่เหมาะสมกับเหล็ก M2 ผลของการแตกร้าวนี้แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ

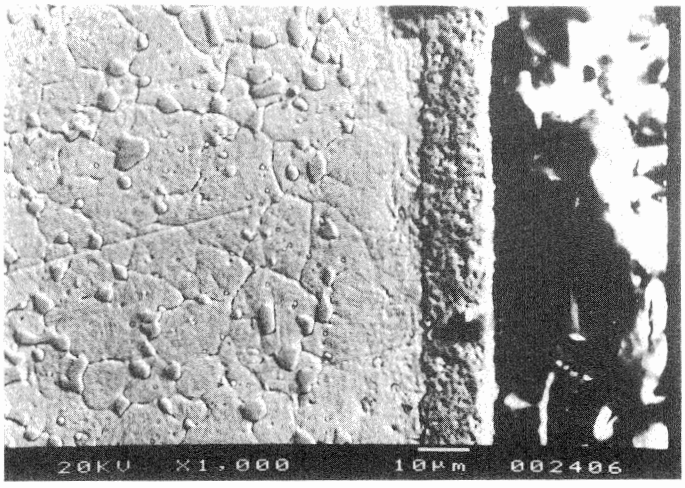
(a)



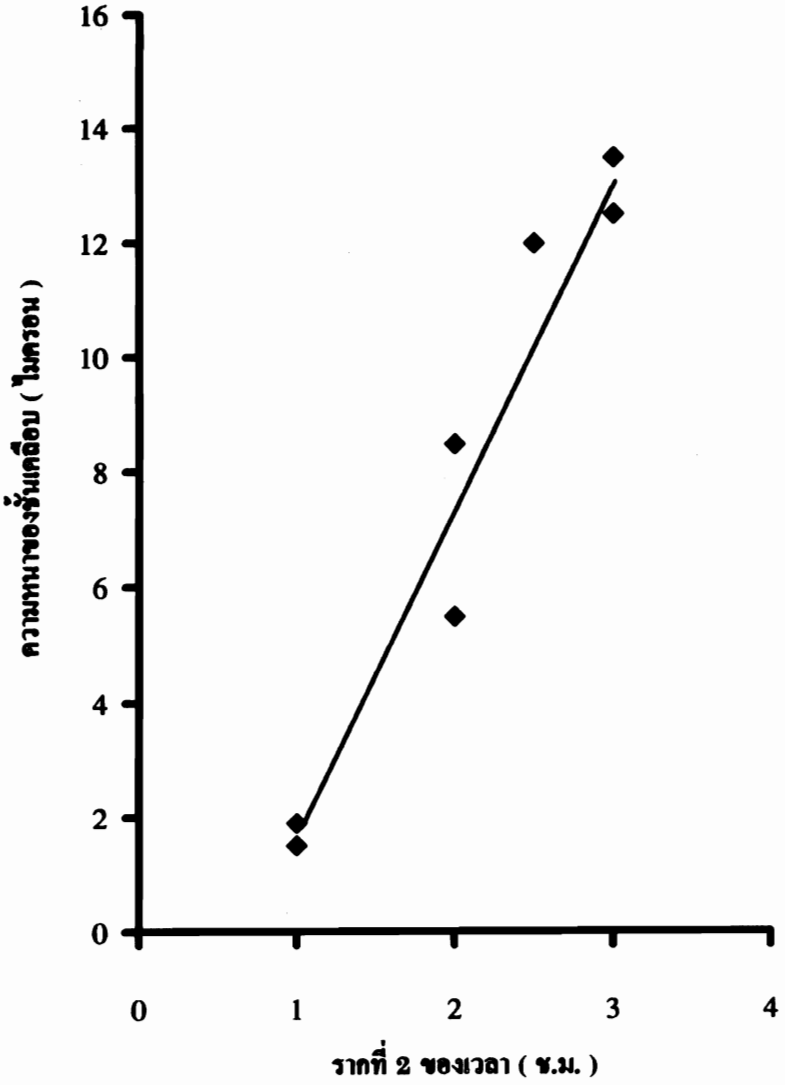
(b)



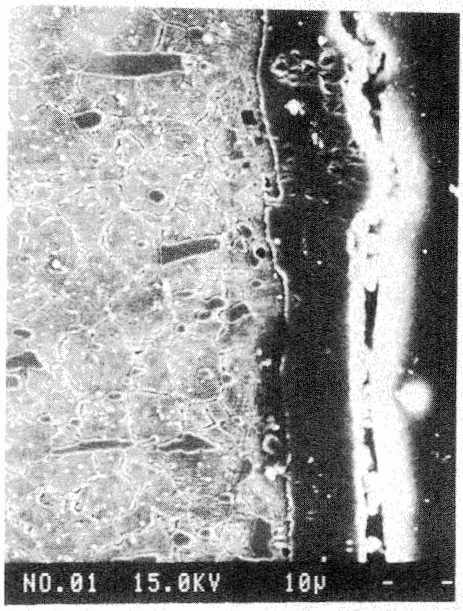
(c)



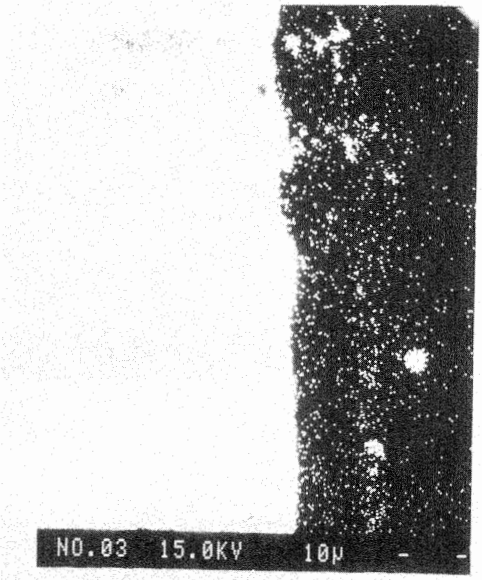
รูปที่ 6 แสดงความหนาชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่แช่ไว้ที่ 1000˚C เป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง



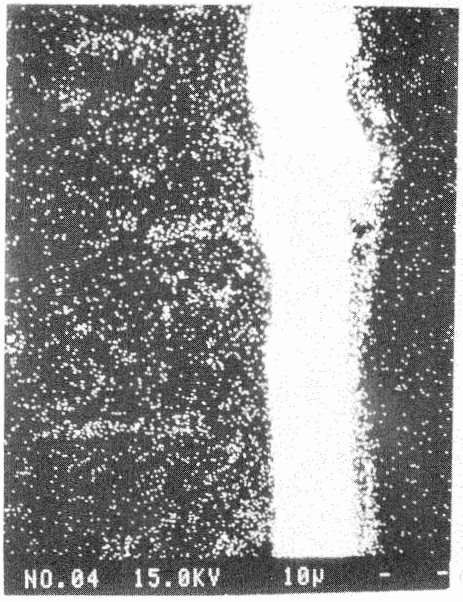
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชั้นเคลือบกับเวลาที่แช่ไว้ที่



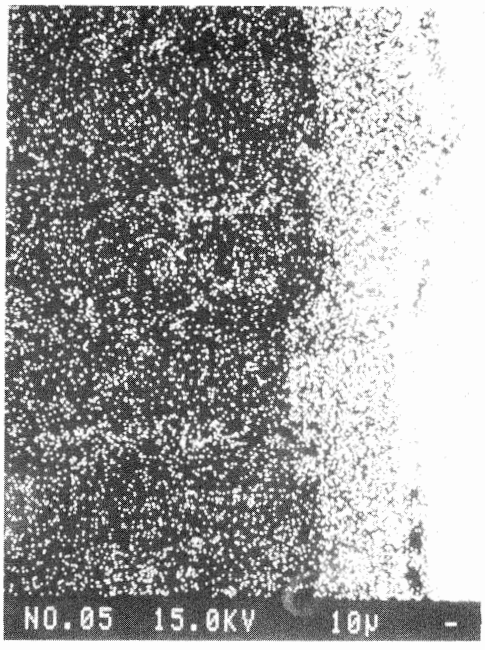
(a) ภาพแสดงชั้นเคลือบ



(b) ภาพ X-ray image ของธาตุ Fe

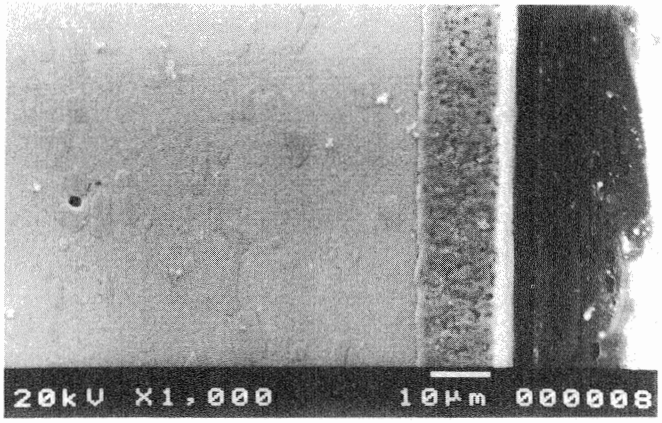


(c) ภาพแสดง X-ray image ของธาตุ V

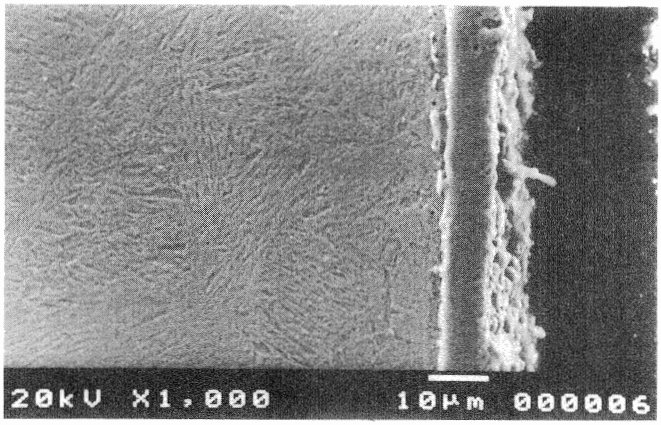


(d) ภาพแสดง X-ray image ของธาตุ C

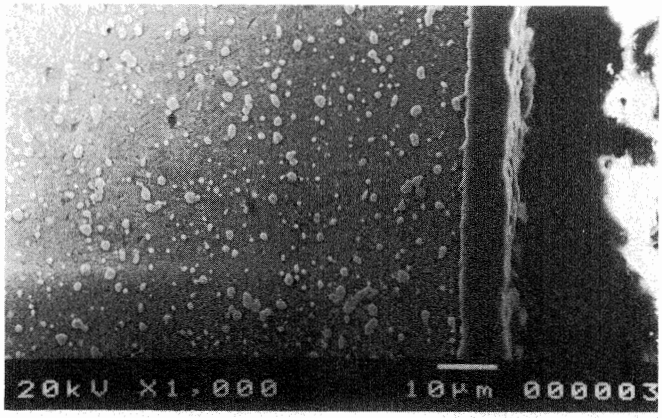
รูปที่ 8 แสดงการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วย EPMA



(a) เหล็ก SKD 11



(b) เหล็ก SKD 61



(c) เหล็ก SKH 51

รูปที่ 9 แสดงชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าทำเครื่องมือ 3 ชนิดคือ (a) เหล็ก SKD 11, (b) เหล็ก SKD 61 และ (c) เหล็ก SKH 51

ด้วยกระบวนการ TD นั้นจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจต่อการอบชุบความร้อนเหล็กกล้าที่จะนำมาเคลือบผิวให้เป็นชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ เพื่อปรับใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบชุบความร้อนก่อนและหลังการเคลือบผิว

บทสรุป

1. ผิวชิ้นงานที่จะเคลือบต้องสะอาดปราศจากสนิม

2. การเติมอะลูมิเนียมทำให้เกิดชั้นเคลือบขึ้นมาโดยอะลูมิเนียมอาจทำหน้าที่เป็นรีดิวเซอร์ก่อให้เกิดวาเนเดียมมารวมตัวกับคาร์บอนที่ผิวเหล็กกลายเป็นชั้นเคลือบขึ้นมา อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมที่เกาะที่ผิวเหล็กก็ขัดขวางการฟอร์มตัวของชั้นเคลือบได้

3.ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าที่ทำการทดลองเป็นชั้นของวาเนเดียมคาร์ไบด์ โดยความหนาของชั้นเคลือบนี้หนาขึ้นตามช่วงเวลาที่แช่ไว้ที่อุณหภูมิ 1000 °C

4. กระบวนการ TD ใช้เคลือบผิวเหล็กทำแม่พิมพ์ SKD11, SKD61 และ SKH51 ได้

เอกสารอ้างอิง

1. H. Tachikawa และ T. Arai: เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (ภาษาญี่ปุ่น) ปีที่ 5 ฉบับที่ 10 หน้า 20 ปี ค.ศ.1990

2. Geoffrey Hayle: High Speed Steel, Butterworth&Co(Publishers)Ltd. 1988, p.178

3. H.C.Child: "Surface Treatments for Tribology Problems" in Coatings for High Temperature Applications Edited by E. Lang, Applied Science Publishers 1983, p.395

4. T.Arai: J.Heat Treating 1 , 1979, p.16