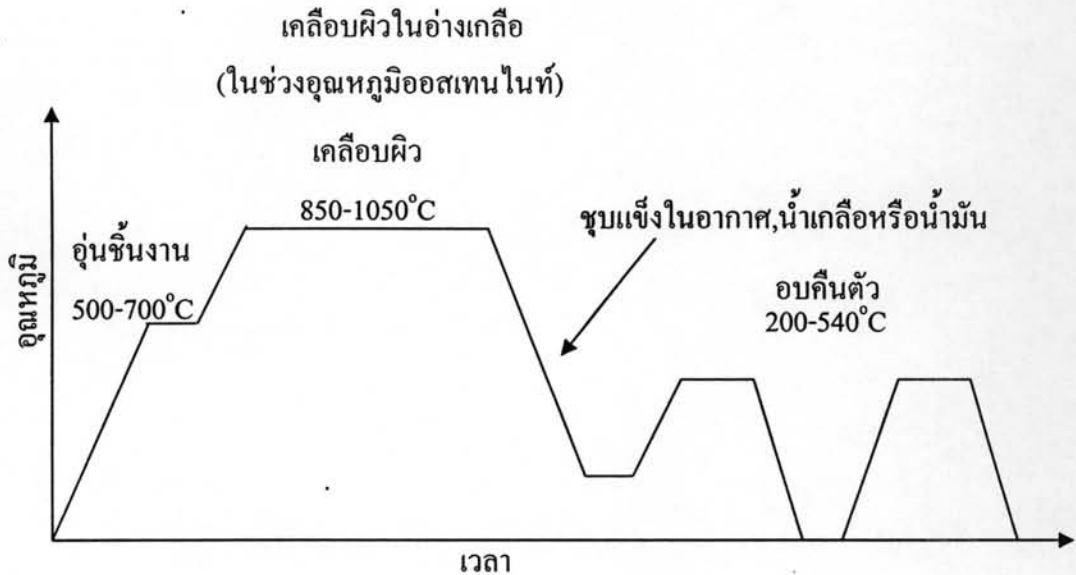


## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการ TD

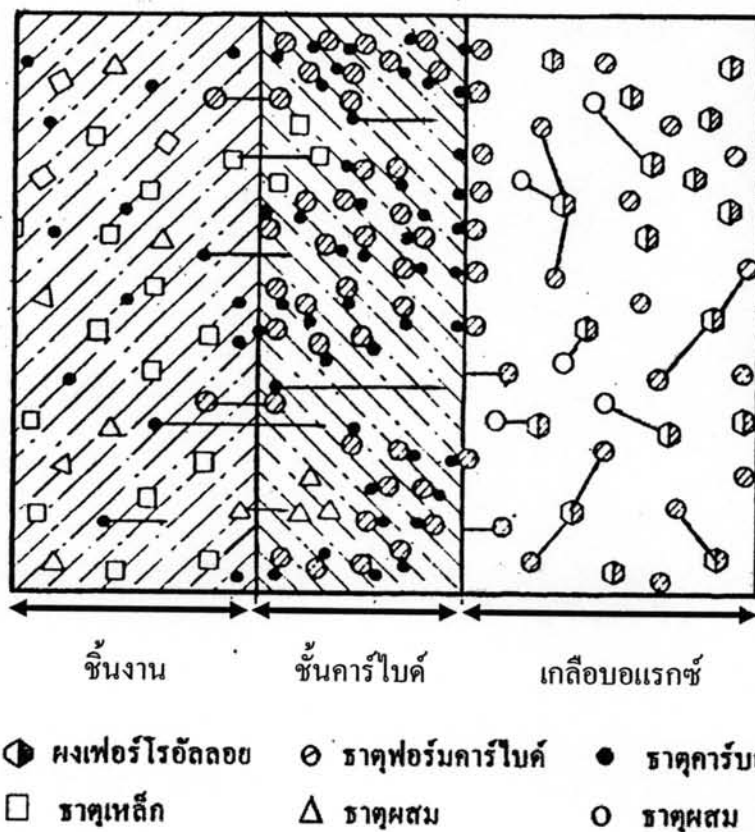
การเคลือบด้วยกระบวนการ TRD เป็นวิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบและการแพร่ซึมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อน ขั้นตอนทั่วไปของการอบชุบความร้อนในกระบวนการ TRD แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนทั่วไปของการอบชุบความร้อนในกระบวนการ TD

กลไกและขั้นตอนการเคลือบผิว TRD จะทำในอ่างเกลือหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 850-1,050°C (1560-1920°F) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ (Austenitizing temperature) ของเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ, เหล็กกล้าคาร์บูไรซิ่ง และเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยใช้เวลาในการเคลือบผิวประมาณ 0.5-10 ชั่วโมงจะให้ความหนาประมาณ 3-15 ไมครอนก่อนที่จะผ่านกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการ TRD นั้นจะมีการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 500-700 °C เพื่อที่จะลดการบิดเบี้ยว (Distortion) ของชิ้นงาน โดยภายหลังการเคลือบผิวแล้วสามารถที่จะทำการชุบแข็ง (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลภายในเนื้อชิ้นงานได้ทันที

หลักการของการเกิดชั้นเคลือบแสดงไว้ใน รูปที่ 2.2 โดยผงเฟอร์ไรต์ลอยที่เติมลงในอ่างเกลือจะละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้อะตอมของธาตุที่จะฟอร์มคาร์ไบด์กระจายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวและรวมตัวกันกับอะตอมของธาตุคาร์บอนที่แพร่ซึมออกมาจากภายในเนื้อโลหะมาที่ผิวเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์ขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นเคลือบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอ่างเกลือ, เวลาในการเคลือบผิว, ชนิดของวัสดุที่นำมาเคลือบ (โดยเฉพาะปริมาณคาร์บอน) และชนิดของชั้นคาร์ไบด์ การเคลือบด้วยกระบวนการ TRD นั้นสามารถนำไปเคลือบบนเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์หรือบนเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยเกินไปได้โดยการนำไปเพิ่มคาร์บอนที่ผิว(Carburizing) ก่อนนำไปเคลือบชั้นเคลือบที่ทำได้ในกระบวนการนี้มีชั้นเคลือบคาร์ไบด์ (VC) ไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) โครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_7C_3$ )



รูปที่ 2.2 หลักการของการเกิดชั้นเคลือบคาร์ไบด์บนชิ้นงานด้วยกระบวนการเคลือบ TRD

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Arai และ S. Harper[1] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการ TD พบว่าความหนาของชั้นเคลือบถูกกำหนดโดยจำนวนของอะตอมคาร์บอนและอะตอมไนโตรเจนที่สามารถแพร่ซึมออกมาจากชนิดเหล็กที่ใช้ทำเนื้อพื้น หากว่ามีจำนวนของ

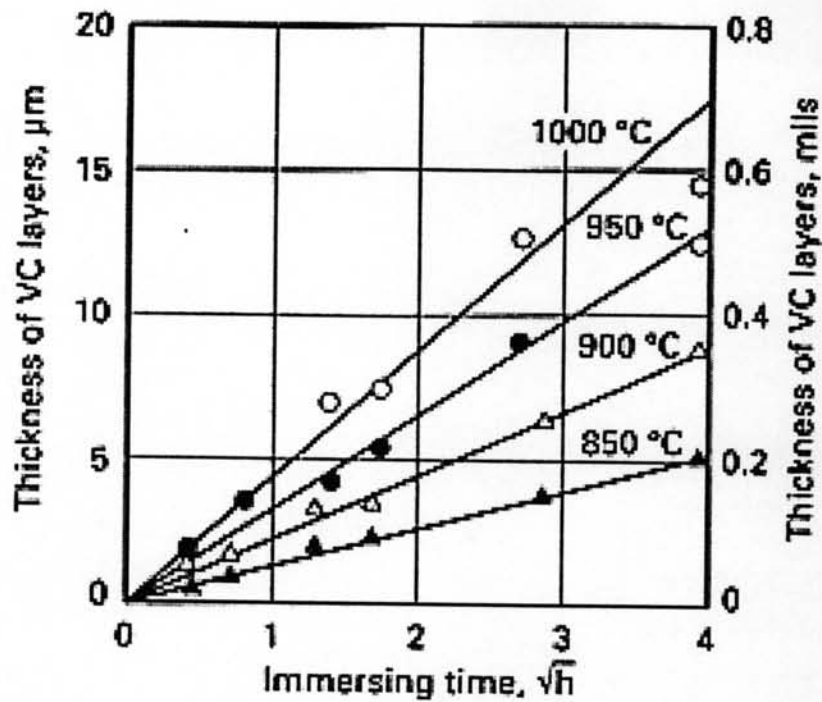
อะตอมธาตุที่ฟอร์มคาร์ไบด์และไนไตรด์มากพอ อะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนก็สามารถรวมตัวกับธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนที่แพร่ซึมออกมาเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวชิ้นงาน จำนวนที่เพียงพอของธาตุฟอร์มคาร์ไบด์ เช่น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์โรวานเดียม หรือวานเดียมเพนทอกไซด์กับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโบรอนคาร์ไบด์สำหรับการเกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ หรือ Cr มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก  $\text{NH}_4\text{Cl}$  สำหรับการเกิดชั้นเคลือบโครเมียมคาร์ไบด์ แม้ว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมีผลมาจากจำนวนของธาตุฟอร์มคาร์ไบด์แล้วยังพบว่าความหนาชั้นเคลือบยังขึ้นกับอุณหภูมิในการเคลือบ เวลาในการเคลือบ ชนิดของเหล็กที่นำมาเคลือบผิวและชนิดของชั้นคาร์ไบด์ ในกระบวนการเคลือบผิวนี้ อุณหภูมิและเวลามีผลต่อความหนาชั้นเคลือบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.1

$$d^2/t = K = K_0 \exp(-Q/RT) \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

d	=	ความหนาชั้นเคลือบ (ซ.ม.)
t	=	เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (วินาที)
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซ.ม. <sup>2</sup> /วินาที)
$K_0$	=	ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซ.ม. <sup>2</sup> /วินาที)
Q	=	Activated energy (จูล/โมล)
T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเคลวิน)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูล/โมล-เคลวิน)

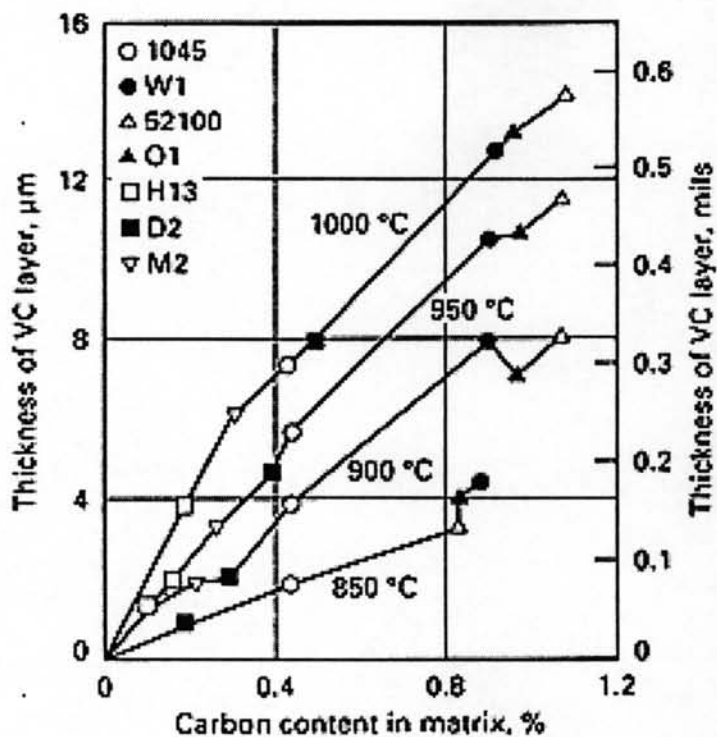
โดยค่า Q ที่ได้จากการทดลอง สำหรับวานเดียมคาร์ไบด์ ไนโอเบียมคาร์ไบด์ และโครเมียมคาร์ไบด์ มีค่าประมาณ 192, 209 และ 167 กิโลจูล/โมล ตามลำดับค่า R คือค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล-เคลวิน และค่า  $K_0$  มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กกล้าเพิ่มขึ้น

T. Arai และ S. Harper[1] ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 เทียบกับอุณหภูมิของอ่างเคลือบอบแรกซ์หลอมเหลวที่เติมผงเฟอร์โรวานเดียมในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเวลาในการเคลือบโดยเลือกที่จะทดลองในช่วงอุณหภูมิ 800-1250 °C พบว่าความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3

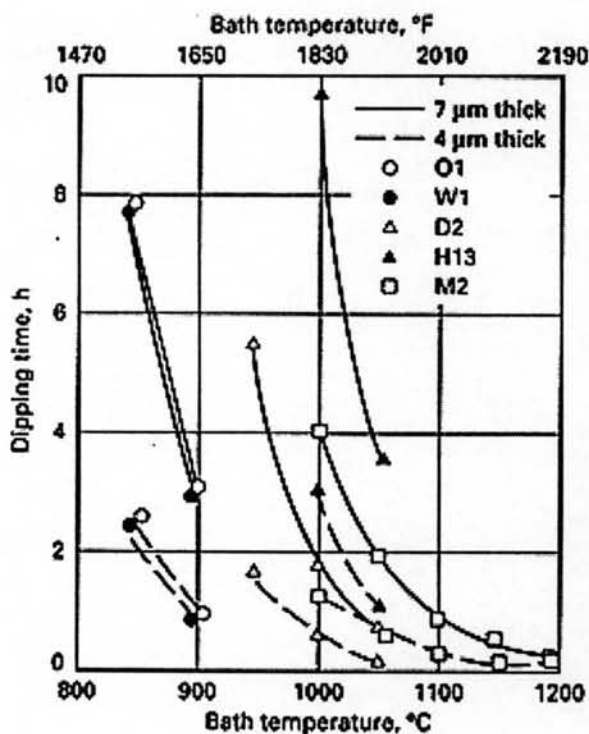


รูปที่ 2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาของชั้นเคลือบ VC ในเกลือบอบแรกซ์ หลอมเหลวที่มีผง Fe-V 20 wt% บนชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ W1

นอกจากนี้ความหนาชั้นเคลือบยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นออสเทนไนท์ (Austenite matrix) จากการทดลองพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าชนิดต่างๆ และอุณหภูมิการเคลือบผิว โดยถ้าปริมาณคาร์บอน หรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นด้วย โดยเหล็กกล้าผสมถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นไปจะเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นออสเทนไนท์ ซึ่งมีผลทำให้อัตราการแพร่ของอะตอมคาร์บอนในเนื้อเหล็กเพิ่มขึ้น และจะทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้เวลาที่จะใช้ในการเคลือบให้ได้ความหนาตามที่ต้องการนั้นก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการเคลือบผิวนั้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ผลของปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ต่อความหนาของชั้นเคลือบ VC ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่มีผง Fe-V 20 wt% ที่เวลาเคลือบผิว 4 ชั่วโมง



รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิอ่างเกลือและชนิดของเหล็กต่อเวลาในการเคลือบที่ทำให้ได้ชั้นเคลือบ VC หนา 7 และ 4 ไมครอนในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว

H.C. Child S.A. Plumb J.J. McDermott [2] ได้ทำการศึกษาการเคลือบผิวโดยใช้ Crucible Stainless Steel ขนาดเล็กใส่บอแรกซ์ 1 กิโลกรัม กับเฟอร์โรวานเดียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาด 100 mesh) แล้วให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่มีการออกซิไดซ์สูง จะได้ผลึกบอแรกซ์ ลักษณะสีดำกับวานเดียมออกไซด์และไม่มีชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ เกิดบนผิวชิ้นงานและถ้าเติมอะลูมิเนียม จำนวน 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงสู่อ่างเกลือจะทำให้ได้ชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าควรทำให้สภาพของเตาเกลือมีการออกซิไดซ์ซึ่งให้น้อยที่สุด

ในภายหลังพบว่าในอ่างเกลือที่มีการละลายอยู่ของวานเดียมเพนทอกไซด์ จะไม่มีการฟอร์มชั้นคาร์ไบด์ จะเห็นว่าในอ่างเกลือที่มี  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  ต้องการตัวรีดิวซ์ซึ่งเพื่อช่วยในการฟอร์มชั้นคาร์ไบด์ ในงานทดลองระยะหลังๆนิยมใช้ Crucible Graphite ซึ่งน่าจะช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน

H.C. Child S.A. Plumb J.J. McDermott [2] ยังได้ทำการทดลองโดยใส่บอแรกซ์ขนาด 2 กิโลกรัม ให้ความร้อนแล้วปกคลุมด้วยอาร์กอน ผลึกบอแรกซ์ที่ได้มีลักษณะสีเขียวถูกนำไปตรวจสอบพบว่ามีวานเดียม 2% ละลายอยู่และพบว่าเป็น  $\text{V}_2\text{O}_5$  การทดลองเกี่ยวกับความสามารถในการละลายในรูปออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆของวานเดียม ในโอเบียมและโครเมียมในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการละลายของธาตุที่ใช้ฟอร์มคาร์ไบด์ในบอแรกซ์หลอมเหลว[2]

อุณหภูมิ (°C)	วานเดียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ไนโอเบียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	โครเมียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
900	1.4	-	1.4
950	1.8	3.5	3.6
1000	2.4	-	-
1050	2.8	3.9	4.5

เป็นไปได้ว่าเฟอร์โรอัลลอยด์ไม่มีการละลายในรูปโลหะในอ่างเกลือบอแรกซ์แต่จะเกิดการออกซิไดซ์ก่อน โดยมีความชื้น 4% ละลายอยู่ในผงบอแรกซ์และมีการหลอมในระหว่างการหลอมก็อาจจะมีโอกาสที่ความชื้นเหล่านี้เกิดออกซิเดชันได้ การเกิดออกซิเดชันสามารถเกิดได้ที่



บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับบอแรกซ์หลอมเหลวได้อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอ่างเกลือได้รับการกวนซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศก็จะเร่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ดีขึ้น

จากผลดังกล่าว อ่างเกลือจะทำงานได้ดีหากมี  $V_2O_5$  และไม่ทำงานเมื่อมี วานเนเดียมเพนทอกไซด์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าพลังงานอิสระของการเกิดออกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ -124 และ -109 กิโลแคลอรีต่อกรัม โมลของวานเนเดียมตามลำดับ

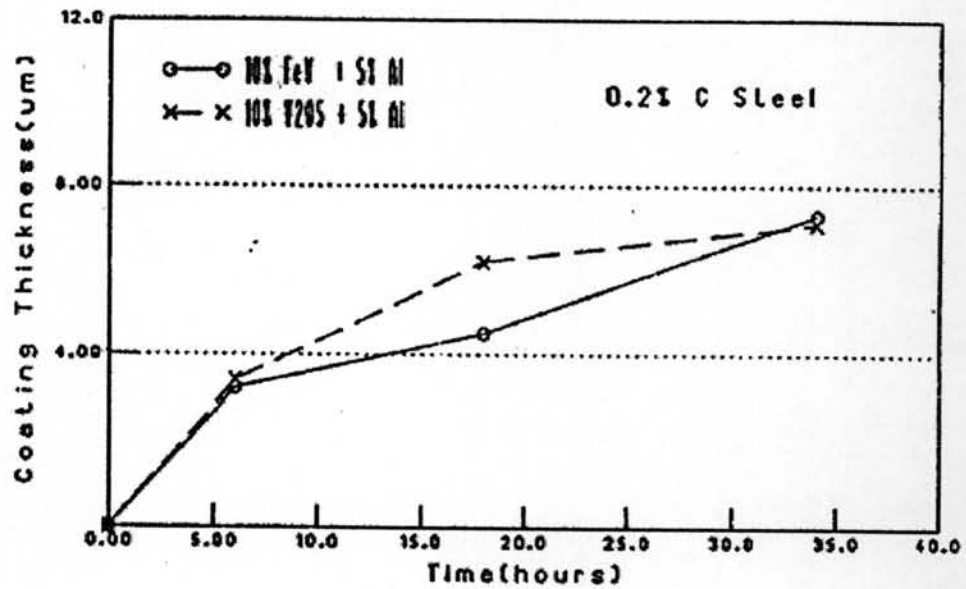
S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris[3] ได้ทำการศึกษาสภาวะการเคลือบที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาในเตาเกลือ โดยใช้เฟอร์โรวานเนเดียม ตั้งแต่ 1-1.5 กิโลกรัม (ขนาด 0.5 mm.) เปรียบเทียบกับ วานเนเดียมเพนทอกไซด์ (ขนาด 0.5 mm.) เติมนลงในอ่างเกลือที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยชิ้นงานทดสอบมีปริมาณคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองชิ้นงานเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการเคลือบเป็นเวลา 7 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $950^{\circ}\text{C}$  เติมเฟอร์โรวานเนเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วัดความหนาชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์เฉลี่ยได้ประมาณ 10 ไมครอน บางกรณีก็ไม่พบชั้นเคลือบคาร์ไบด์ และพบว่าน้ำหนักของชิ้นงานหายไปบางส่วน ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชัน กรณีที่ทดลองโดยเติมเพียงวานเนเดียมเพนทอกไซด์พบว่าไม่มีการเกิดชั้นเคลือบหลังผ่านการเคลือบผิวไปแล้ว 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  จากผลที่ได้ดังกล่าวเป็นการยืนยันผลการทดลองของ H.C. Child[2] ที่มีการเกิดออกซิเดชันมากเกินความจำเป็นในอ่างเกลือที่เติม เฟอร์โรวานเนเดียมและทำให้ไม่เกิดชั้นเคลือบในอ่างเกลือที่มีวานเนเดียมเพนทอกไซด์

การเติมอะลูมิเนียมสู่เตาเกลือเพื่อลดการเกิดออกซิเดชัน โดยอะลูมิเนียม จะทำหน้าที่เป็นรีดิวเซอร์ในอ่างเกลือ บางกรณีอะลูมิเนียม ถูกนำมาใช้เป็นรีดิวเซอร์ในอ่างเกลือบอร์โรไนซิง

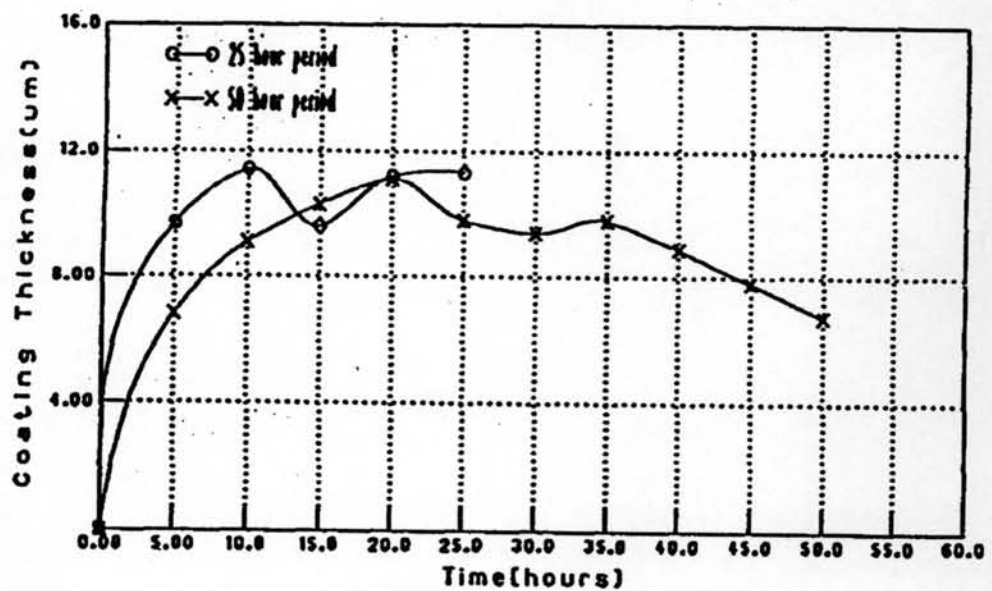
จากความสัมพันธ์ดังกล่าว S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris[3] จึงทำการศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานเนเดียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับวานเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับชิ้นงานที่มีคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6, 12 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับพบว่าเกิดชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์ ความหนาเท่ากันในช่วงแรก ส่วนในช่วงที่สองชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ในกรณี วานเนเดียมเพนทอกไซด์ จะหนากว่า และช่วงสุดท้ายความหนาชั้นเคลือบมีแนวโน้มเท่ากันแสดงความหนาชั้นเคลือบดังภาพที่ 2.6

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาในอ่างเกลือต่อความหนาของชั้นเคลือบด้วยการคงอุณหภูมิเตาเกลือไว้ที่  $950^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 25 หรือ 50 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ใช้มีคาร์บอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลาชิ้นละ 5 ชั่วโมง โดยชิ้นงานในแต่ละกรณีเมื่อครบ 5 ชั่วโมงชิ้นงานจะถูกดึงออกจากเตาเกลือและชิ้นงานชุดต่อไปก็จะถูกนำลงสู่เตาเกลือต่อกันไปเรื่อยๆจนครบในแต่ละกรณี โดยความหนาชั้น

เคลือบที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน สามารถเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการเคลือบและเริ่มคงที่ที่ 25 ชั่วโมงและหลังจาก 35 ชั่วโมงความหนาชั้นเคลือบจะเริ่มลดน้อยลง ดังรูปที่ 2.7



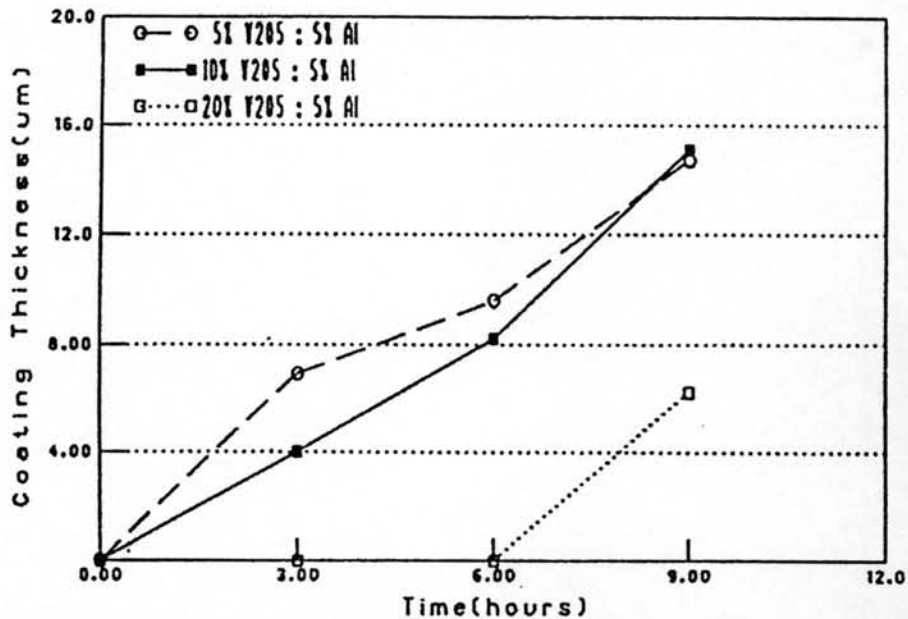
รูปที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบระหว่างสารฟอรัมคาร์ไบด์ Fe-V และ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ที่ใช้ Al 5 wt% ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 2.7 ผลของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา 25 และ 50 ชั่วโมง โดยชั้นงานเคลือบครั้งละ 5 ชั่วโมง

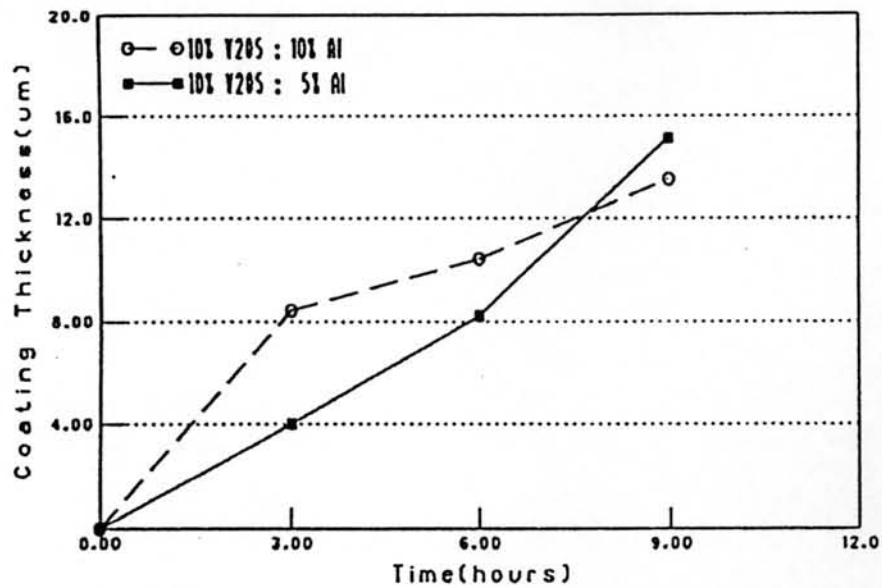


S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ทำการศึกษาอิทธิพลของการแปรผันปริมาณของ  $V_2O_5$  5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยคงปริมาณ Al ไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยกรณีของ  $V_2O_5$  ที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ชั้นความหนาใกล้เคียงกัน โดยในช่วงเริ่มต้นกรณีที่ใช้  $V_2O_5$  5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ชั้นความหนากว่า ส่วนในกรณีใช้  $V_2O_5$  20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏชั้นเคลือบสำหรับช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการเคลือบดังแสดงในรูปที่ 2.8



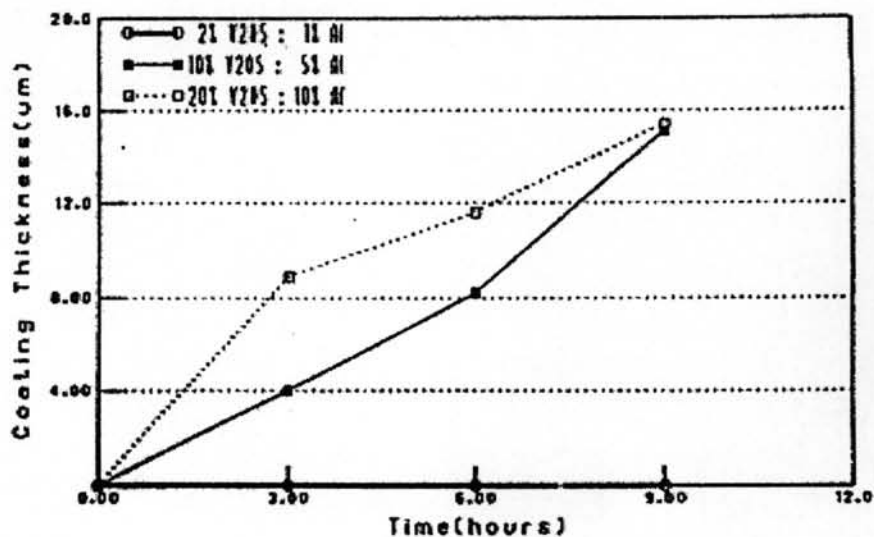
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณวานาเดียมเพนทอกไซด์ต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสที่ใช้เวลาในการเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ทำการศึกษาอิทธิพลของการแปรผันปริมาณ Al โดยทำการแปรผันปริมาณ Al 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้  $V_2O_5$  10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยกรณีที่เติม Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลของชั้นเคลือบหนากว่ากรณีที่ใช้ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทั้งสองกรณีให้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากันหลังจากผ่านการเคลือบไปแล้ว 7 ชั่วโมงและที่ช่วงสุดท้ายของการเคลือบ 9 ชั่วโมงให้ผลความหนาที่แตกต่างกันประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง

กรณีการเคลือบที่ใช้  $V_2O_5$  จำนวน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับการใช้  $V_2O_5$  20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการใช้  $V_2O_5$  จำนวน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่เติม  $V_2O_5$  จำนวน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ความหนามากที่สุดในขณะที่ไม่มีชั้นเคลือบเกิดขึ้นเลยในกรณีที่เติม  $V_2O_5$  จำนวน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al จำนวน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณ  $V_2O_5$  และ Al ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง ( $V_2O_5$ : Al = 2:1)

ประสงค์ และคณะ[5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ AI ต่อการเกิดชั้นเคลือบ VC บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2, H13 และ M2 ด้วยกระบวนการ TRD โดยใช้ Fe-V จำนวน 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว โดยแปรผันเวลาในการเคลือบ 1 ถึง 9 ชั่วโมง พบว่าชั้นงานที่ทำการศึกษาในอ่างเกลือที่เดิม AI เป็นตัวรีดิวซ์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดชั้นเคลือบ VC ขึ้น ส่วนชั้นงานที่ทำการศึกษาโดยไม่ใช้รีดิวเซอร์จะไม่เกิดชั้นเคลือบ พบว่าความหนาชั้นเคลือบ VC เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ T. Arai และ S. Harper<sup>(3)</sup> ที่ทำการทดลองการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 โดยใช้ผง Fe-V จำนวน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ซึ่งแสดงว่าอัตราการเกิดชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอน

สุรพล พรนิมิตรธรรม [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 โดยกระบวนการ TRD พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ คือเติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ AI 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยถ้าไม่เติม AI ลงในอ่างเกลือจะไม่เกิดชั้นเคลือบ แต่ถ้าเติม AI เกินไปก็จะทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาลดลงและถ้าเติมมากเกินไปจะไม่เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เลย แต่จะเกิดชั้นเหล็กบอไรด์แทน เนื่องจากปริมาณตัวรีดิวซ์ที่มากเกินไปที่เหลือจากการรีดิวซ์  $Nb_2O_5$  จะไปรีดิวซ์  $B_2O_3$  ซึ่งโบรอนมีขนาดอะตอมเล็กจึงแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ ซึ่งจะขัดขวางการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนจากในเนื้อชิ้นงานไปที่ผิว ทำให้ไนโอเบียมไม่สามารถจับตัวกับคาร์บอนให้เป็นชั้นเคลือบคาร์ไบด์ได้ ความหนาชั้นเคลือบขึ้นอยู่กับปริมาณไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ถ้าไนโอเบียมละลายไม่อิ่มตัวในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวจะทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาน้อยลง

ธนศักดิ์ นิลสนธิ[7] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ Fe-V และ  $V_2O_5$  เป็นสารที่ให้ธาตุวานาเดียมต่อชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวและเข้าเหล็กกล้าไร้สนิม กรณีใช้ Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับ AI 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าชั้นเคลือบ VC หรือชั้นเหล็กบอไรด์ หรือไม่มีชั้นเคลือบเกิดขึ้น ขึ้นกับการละลายของ Fe-V และ AI กรณีเกิดชั้นเคลือบ VC เนื่องจาก Fe-V อาจจะละลายอยู่ในรูป  $V_2O_5$  จึงเกิดชั้น VC บนผิวชิ้นงาน กรณีเกิดชั้นบอไรด์มีสาเหตุเกิดจากการเก็บผง Fe-V ไว้เป็นเวลานานเกินไป จนเกิดออกไซด์กับเหล็ก ทำให้ขัดขวางไม่ให้วานาเดียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลว AI ที่เติมลงไปจึงไปรีดิวซ์โบรอนออกไซด์จนเกิดชั้นบอไรด์ กรณีไม่เกิดชั้นเคลือบสาเหตุเกิดจากไม่เกิด  $V_2O_5$  ในบอแรกซ์และสูญเสีย AI จากการเติมที่ไม่ดีพอ กรณีใช้  $V_2O_5$  10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับแปรผันปริมาณ AI 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณ AI อย่างไรก็ตามการเติม AI ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีโอกาสก่อให้เกิดชั้นเหล็กบอไรด์