

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโลหะผสมนิกเกิลซึ่งใช้เป็นลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) และ เหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม)

##### 2.1.1 นิกเกิล [2]

โลหะนิกเกิลถูกค้นพบในศตวรรษที่ 18 โดยพนักงานเหมืองในเขตแซกซันนี (Saxony) ของประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันได้พยายามถลุงแร่ทองแดงแล้วได้พบโลหะสีขาวซึ่งถลุงยากจึงเรียกโลหะชนิดนี้ว่า โอลด์ นิกค์ คอปเปอร์ (Old Nick's Copper) หรือ คูฟเฟอร์-นิกเกิล (Kupfer-Nickel) ต่อมา A.F. Cronstedt ซึ่งทำงานในกรมเหมืองแร่ของประเทศสวีเดน (Swedish Department of Mines) ด้วยความอยากรู้อยากเห็นทำให้เขาทดลองแยกและวิเคราะห์ ธาตุชนิดใหม่แล้วตั้งชื่อธาตุใหม่นี้ว่า นิกเกิล ห้าปีต่อมาหลังจากการค้นพบธาตุนิกเกิลนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ Von Engestrom ได้พบว่า นิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลักในโลหะผสมระหว่างนิกเกิลและเงิน (Nickel-Silver)

นิกเกิลเป็นธาตุที่มีประโยชน์มากมายและสามารถละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์กับทองแดง นิกเกิลมีระบบผลึกเป็น Face Centered Cubic (FCC) สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการเติมธาตุผสม การตกตะกอนของคาร์ไบด์ และการตกตะกอนของเฟสแกรนมาไฟร์ม ( $\gamma'$ )

##### การเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติมธาตุผสม [3, 4]

โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน วาเนเดียม และอะลูมิเนียม ทั้งหมดเป็นธาตุที่ผสมเพิ่มความแข็งแรงให้กับนิกเกิลได้ เนื่องจากมีขนาดอะตอมแตกต่างจากขนาดอะตอมของนิกเกิลประมาณ 1-13%

### การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของคาร์ไบด์

คาร์บอนที่อยู่ในนิกเกิลจะเกิดการรวมตัวกับธาตุอื่นๆเกิดเป็นคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่พบส่วนใหญ่คือ MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  โดยทั่วไป MC จะมีขนาดใหญ่และกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ  $M_6C$  จะตกตะกอนตามขอบเกรนใช้ในการควบคุมขนาดเกรน เมื่อเกิดตามขอบเกรนจะส่งผลเสียต่อความเหนียว  $M_7C_3$  จะเกิดเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงส่วนใหญ่จะเป็น  $Cr_7C_3$  จะเป็นประโยชน์เมื่อเกิดการตกตะกอนแบบไม่ต่อเนื่อง จะทำให้วัสดุเปราะเมื่อเกิดการตกตะกอนเป็นกลุ่มและอยู่ตามขอบเกรน  $M_{23}C_6$  จะเกิดการตกตะกอนเมื่อใช้งานที่ 760-980 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มจะตกตะกอนตามขอบเกรน ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติกลของโลหะผสมนิกเกิล

### การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเฟสแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ )

การตกตะกอนของแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ,  $Ni_3(Al,Ti)$ ) จะทำให้เกิดการไม่เข้ากัน (Mismatch) ทำให้เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ความแข็งของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ) เพิ่มขึ้น แกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ) จะตกตะกอนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ปริมาณของแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่ผสม คือ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ไนโอเบียม แทนทาลัม แกรมมาไฟรึมสามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นตะกอน  $Ni_3X$  ได้ขึ้นอยู่กับธาตุผสมถ้ามีปริมาณไทเทเนียมอยู่มากจะเปลี่ยนไปเป็นอิตา ( $\eta$ ,  $(Ni_3Ti)$ ) ทำให้คุณสมบัติกลเปลี่ยนแปลงและเมื่อมีปริมาณของไนโอเบียมอยู่มากพออิตา ( $\eta$ ) จะเปลี่ยนไปเป็น แกรมมาดอบเบิลไฟรึม ( $\gamma''$ ,  $(Ni_3Nb)$ ) ทั้งแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ,  $Ni_3(Al,Ti)$ ) และแกรมมาดอบเบิลไฟรึม ( $\gamma''$ ,  $(Ni_3Nb)$ ) จะทำให้ค่าความแข็งแรงสูงเช่นเดียวกัน

#### 2.1.2 อินโคเนล 625 [4]

เป็นโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัมและมีการผสมไนโอเบียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุโดยไม่ต้องทำการอบชุบความร้อน โลหะผสมชนิดนี้ด้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนได้หลายแบบ ด้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้เป็นอย่างดี นิยมใช้งานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเดินเรือทะเล ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625 [4]

ธาตุ	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb/ Ta	Ti	Al	C	Mn	Si	Cu
ปริมาณ	64.6	21.9	9.00	0.24	3.59	0.23	0.12	0.01	0.01	0.50	0.07

คุณสมบัติกลของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625 ที่อุณหภูมิห้อง [4]

ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	930 MPa
ความเค้นคราก (Yield Strength 0.2% offset)	517 MPa
เปอร์เซ็นต์ยืดตัว (Elongation in 50 mm)	42.5
มอดุลัสของการยืดหยุ่น (Elastic Modulus)	207 GPa
ความแข็ง (Hardness)	190 HRB

### 2.1.3 อินโคเนล 617 [4]

เป็นโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม ซึ่งมีความแข็งแรงและต้านทานต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง การผสมอะลูมิเนียมจะช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โลหะผสมชนิดนี้ต้านทานต่อการกัดกร่อนได้หลายแบบ ใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุปกรณ์สำหรับกรรมวิธีการอบชุบความร้อน และใช้ในกระบวนการผลิตกรดไนตริก ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617 [4]

ธาตุ	Ni	Cr	Mo	Co	Fe	Ti	Al	C	Mn	Si	Cu
ปริมาณ		20.28	8.3	10.55	0.31	0.38	0.95	0.05	0.13	0.13	0.006

คุณสมบัติกลของโลหะผสมอินโคเนล 617 ที่อุณหภูมิห้อง [4]

ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 755 MPa

ความเค้นคราก (Yield Strength 0.2% offset) 350 MPa

เปอร์เซ็นต์ยืดตัว (Elongation in 50 mm) 58.0

มอดุลัสของการยืดหยุ่น (Elastic Modulus) 211 GPa

ความแข็ง (Hardness) 173 HRB

ตะกอนหรือเฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617 เมื่อถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง คือ  $\gamma'$ - $[\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})]$ ,  $\gamma''$ - $[\text{Ni}_3\text{Nb}]$ . ตารางที่ 2.3 แสดงตะกอนหรือเฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617

ตารางที่ 2.3 เฟสต่างๆ และระบบผลึกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617 เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง [3, 4]

เฟส	ระบบผลึก
$\gamma'$ -[Ni <sub>3</sub> (Al,Ti)]	FCC
$\gamma''$ -[Ni <sub>3</sub> Nb]	BCT
$\eta$ -[Ni <sub>3</sub> Ti]	HCP
$\delta$ -[Ni <sub>3</sub> Nb]	Orthorhombic
$\mu$ -phase	Rhombohedral
$\sigma$ -phase	Tetragonal
MC	Cubic
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	FCC
M <sub>6</sub> C	FCC
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Hexagonal
MN	Cubic

### 2.1.5 เหล็กกล้า P22 [5]

เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียม โมลิบดีนัม ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ด้านทานต่อการคืบ ความแข็งแรงของเหล็กกล้าชนิดนี้มาจากการละลายของทั้ง โครเมียมและโมลิบดีนัม และคาร์ไบด์ที่เกิดตามขอบเกรนช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน เหล็กกล้าชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในการด้านทานต่อการคืบเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 560°C อย่างไรก็ตามความแข็งแรงการคืบ (Creep strength) ของเหล็กชนิดนี้จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กที่ด้านทานการคืบเกรดอื่น

เช่น เหล็กกล้า P91 ทำให้ต้องออกแบบใช้งานที่ความหนาแน่นมากกว่า เมื่อใช้งานลักษณะเดียวกัน แนวเชื่อมเหล็กชนิดนี้เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเสียหายจากการเปราะด้วยการอบคืนตัว (Temper-embrittlement) ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า P22

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P22) [5]

ธาตุ	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
ปริมาณ	0.07	0.6	0.3	<0.02	<0.02	2.25	1.0

การใช้งาน [5]

เหล็กกล้าชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในโรงกลั่นน้ำมันเนื่องจากต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (Sulfidation) ที่อุณหภูมิ 250-450 °C และยังใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากต้านทานต่อการทำลายด้วยก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Attack)

### 2.1.6 เหล็กกล้า P91 [5]

ในช่วงปี 1950 ได้มีการพัฒนาเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 9% โดยน้ำหนักขึ้นมาเพื่อใช้ทำหม้อต้มไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า (Power Boiler) เป็นเหล็กกล้าที่ทนทานการคืบดีกว่าเหล็กกล้า P22 ต่อจากนั้นในปี 1974 Oak Ridge Nation Laboratory (ORNL) ได้ปรับปรุงเหล็กกล้าผสม 9% โครเมียม ขึ้นโดยผสมวาเนเดียม ไนโอเบียม และไนโตรเจน ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้นานขึ้น ส่วนผสมของเหล็กกล้า P91 แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P91 [3]

ธาตุ	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N
ปริมาณ	0.1	0.5	0.3	<0.01	<0.02	9.0	0.1	1.0	0.08	0.2	0.05

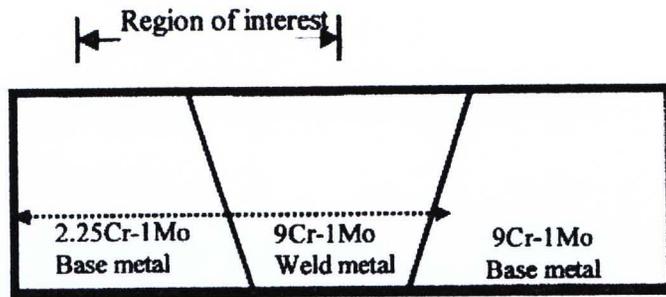
### การใช้งาน [3]

ในช่วงแรกมีการพัฒนาใช้สำหรับทำเป็นหม้อต้มไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า ในปี 1980 เหล็กกล้า P91 ได้เริ่มถูกใช้งานเป็นครั้งแรกสำหรับการใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 321 ใน ทศวรรษ 1990 เหล็กกล้า P91 เป็นวัสดุที่ถูกเลือกใช้ในการเปลี่ยนและการสร้างโรงไฟฟ้าโดยมัก ถูกใช้งานทำเป็นท่อไอน้ำและอื่นๆ เนื่องจากสามารถออกแบบใช้ความหนาที่ลดลง ใช้งานได้ที่ อุณหภูมิและความดันสูง

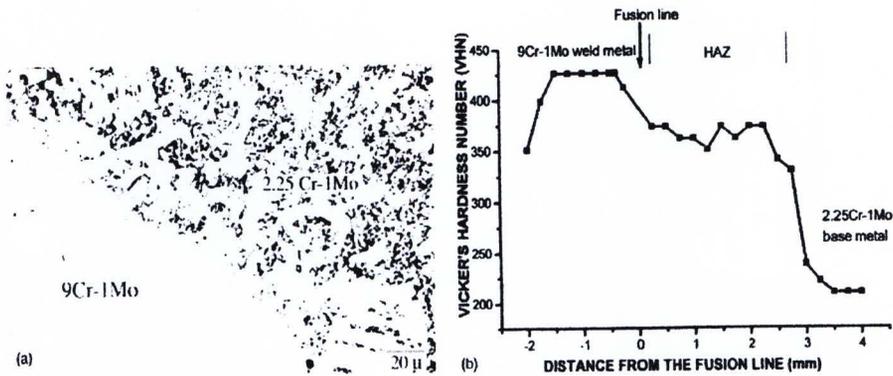
### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91

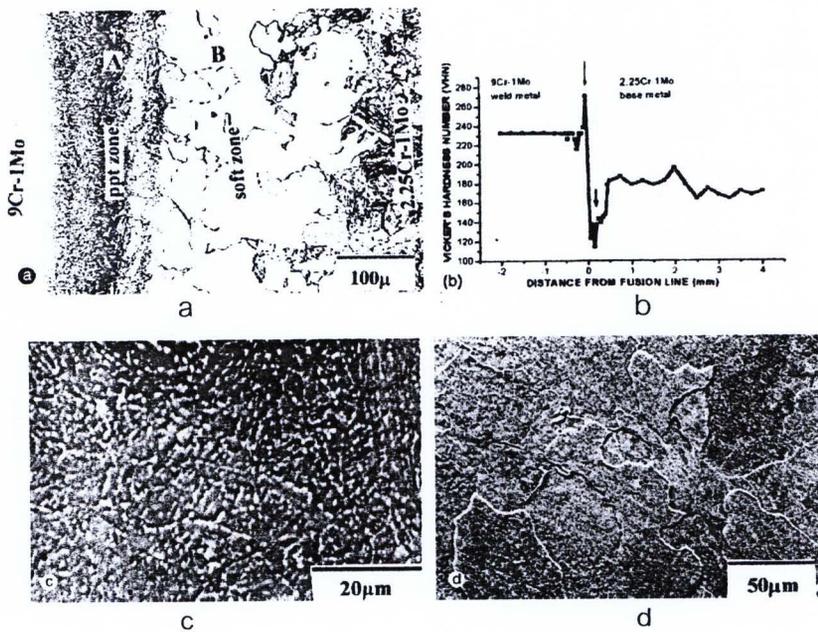
M. Vijayalakshmi และคณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของรอยเชื่อม เหล็ก 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็ก 2.25Cr-1Mo ในบริเวณโลหะพื้นและเนื้อเชื่อมตามแนวเส้นประใน รูปที่ 2.1 และได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K เป็นเวลา 1, 2, 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ผล การศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.2-2.6 จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำเหล็ก 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็ก 2.25Cr-1Mo ไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จะทำให้เกิดคาร์ไบด์ (รูปที่ 2.6) ที่มีโครเมียมอยู่มาก ทางด้านเหล็ก 9Cr-1Mo และเกิดการสูญเสียคาร์บอนด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo เนื่องจากการแพร่ ของคาร์บอนด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo ไปยังด้านเหล็ก 9Cr-1Mo ทำให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในบริเวณที่แข็ง (Hard Zone) (รูปที่ 2.3 c) และเกิดเฟรไรต์ในบริเวณที่อ่อน (Soft Zone) (รูปที่ 2.3 d) ด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo



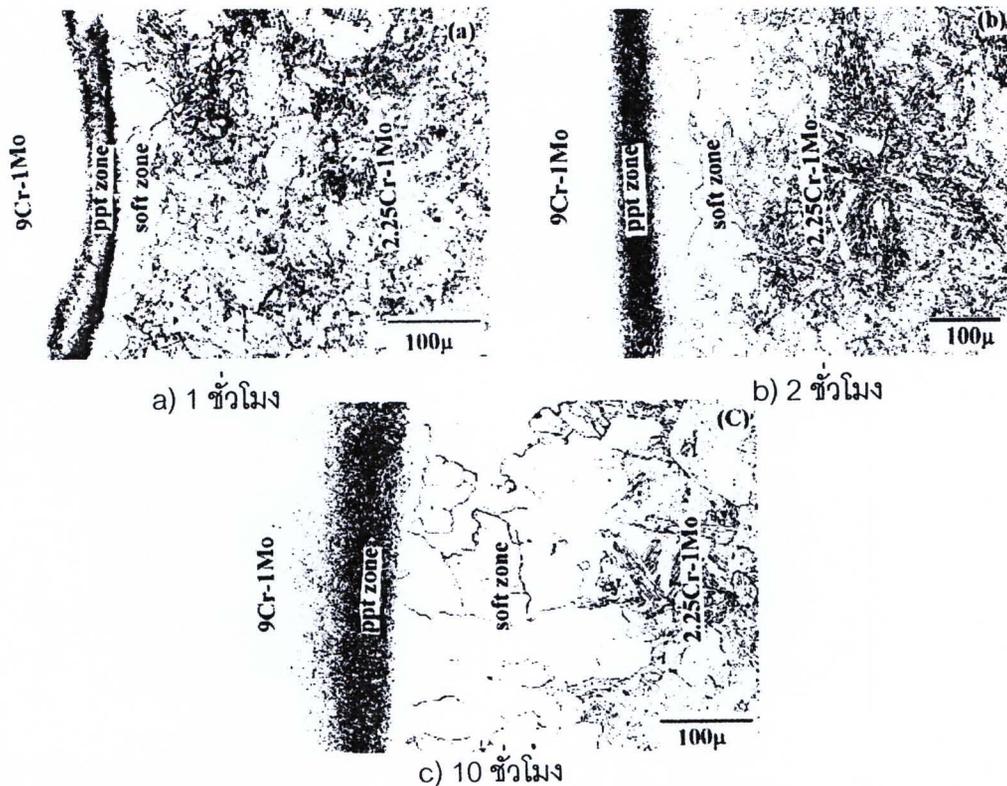
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางแสดงบริเวณของชิ้นงานเชื่อมที่ศึกษาโดย M. Vijayalakshmi และคณะ [6]



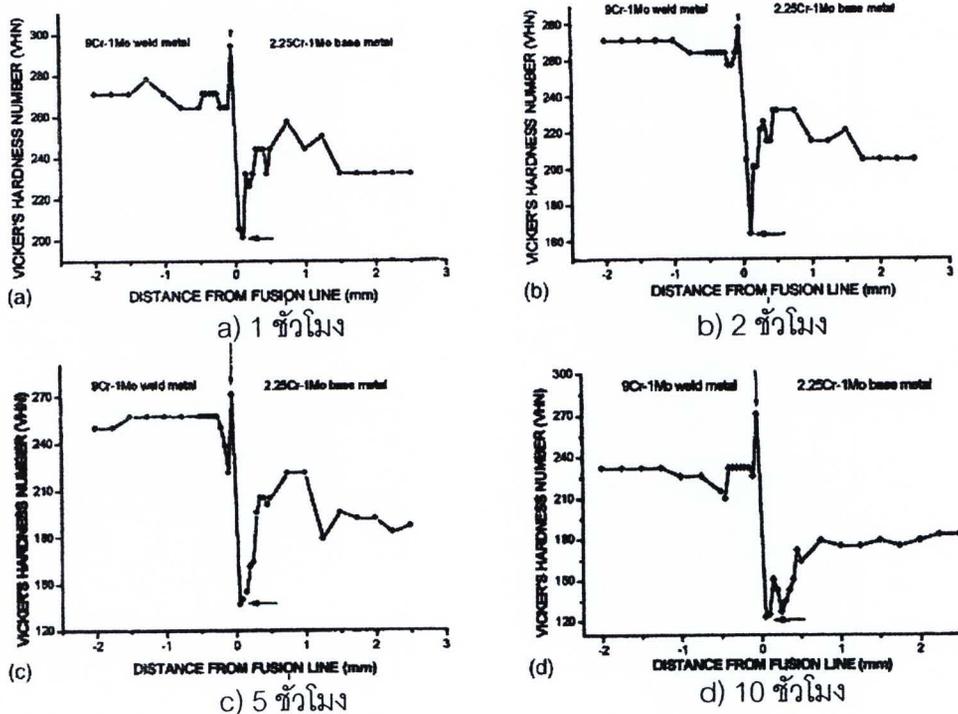
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคและเส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กที่มี 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็กที่มี 2.25Cr-1Mo โดยที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน [6]



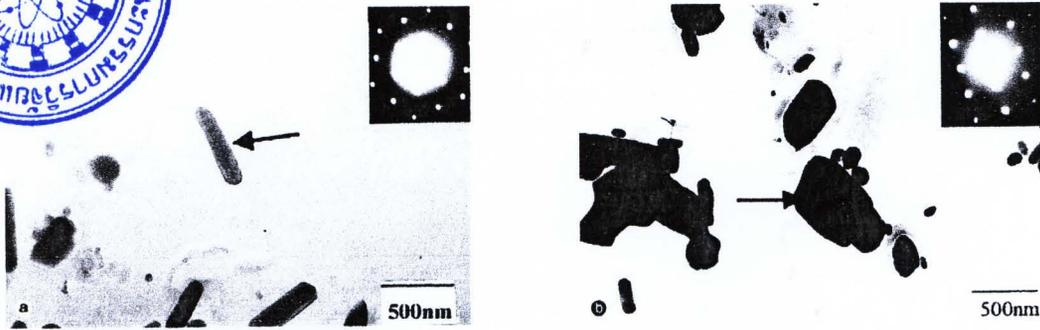
รูปที่ 2.3 a) โครงสร้างจุลภาค b) เส้นแสดงความแข็ง c) ตะกอนคาร์ไบด์ในบริเวณที่แข็ง d) เฟร์ไรต์ในบริเวณที่อ่อนของแนวงานเชื่อมผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K 15 ชั่วโมง [6]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K [6]



รูปที่ 2.5 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K [6]



รูปที่ 2.6 ภาพคาร์ไบด์ที่เกิดในแนวเชื่อมหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [6]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมนิกเกิลซึ่งใช้เป็นลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91

K. Bhanu Sankara Rao และคณะ [7] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 923 และ 1123 K ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.6 การศึกษาของคณะวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว

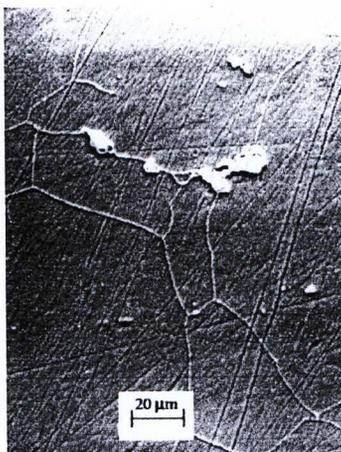
ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของการอบชุบความร้อนของอินโคเนล 625 ตามการทดลองของ K. Bhanu Sankara Rao และคณะ [7]

S. No.	Condition	Aging treatment temperature (K)	Duration (h)	Remarks
1	Service-exposed	-	-	Exposed to ~873 K for ~60000 h
2	Post-service Aging treatment	(i) 923 (ii) 1123	1, 100, 200, 500 1, 10, 30, 100, 200, 500	-
3	Re-solution annealed (1423 K) + aging treatment	(i) 923 (ii) 1123	1, 10, 100, 200, 500 1, 10, 100, 200, 500	-

จากการศึกษาอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแสดงตะกอนคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนดังในรูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงเส้นบริเวณที่เกิดตะกอนแสดงในรูปที่ 2.8 และการวิเคราะห์ตะกอนโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงดังรูปที่ 2.9 เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้วผ่านการอบละลาย (Annealing) ที่อุณหภูมิ 1423 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะมีค่าความเค้นคราก (Yield strength) ลดลงอย่างมาก (รูปที่ 2.10)

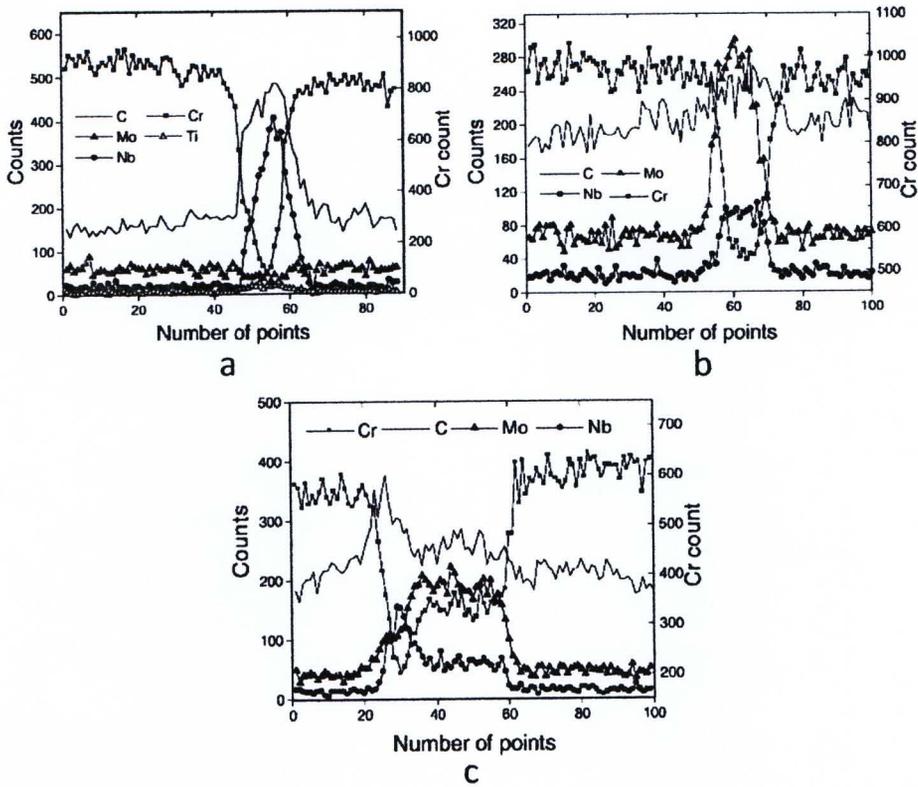
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
ห้องสมุดวิจัย  
วันที่..... 11 ก.ค. 2555 .....  
เลขทะเบียน..... 248485 .....  
เลขเรียกหนังสือ.....

เนื่องมาจากการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของตะกอน  $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$  และแกรวมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ -phase) ดังภาพถ่ายที่ 2.11 เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 923 K ทำให้ค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของแกรวมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ -phase) ตามรูปที่ 2.12 และ 2.13 และพบการตกตะกอนของ  $\delta$ -phase เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.14 แต่ต้องใช้เวลาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนนาน เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1123K จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแกรวมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ -phase) ได้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.15-2.16 คุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน ผ่านการอบอ่อน และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ รูปที่ 2.10 ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7] ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งานนำมาผ่านการอบอ่อนและกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7] ตารางที่ 2.9 แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดและการตกตะกอนเฟสต่าง ๆ หลังการทดลอง

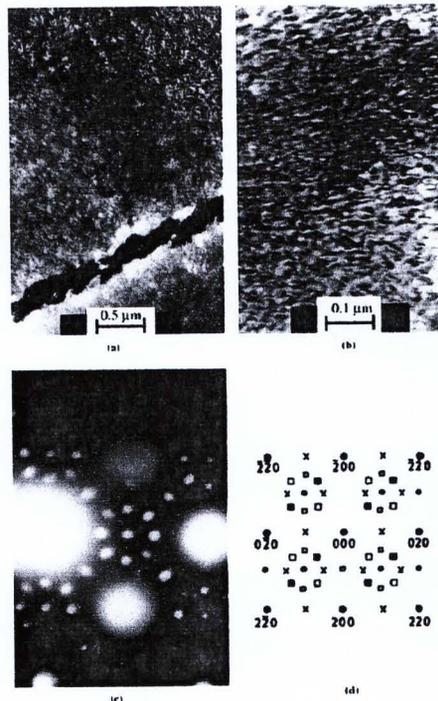


รูปที่ 2.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงคาร์ไบด์ตามขอบและภายในเกรนของโลหะเนื้อ  
พื้นวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว [7]

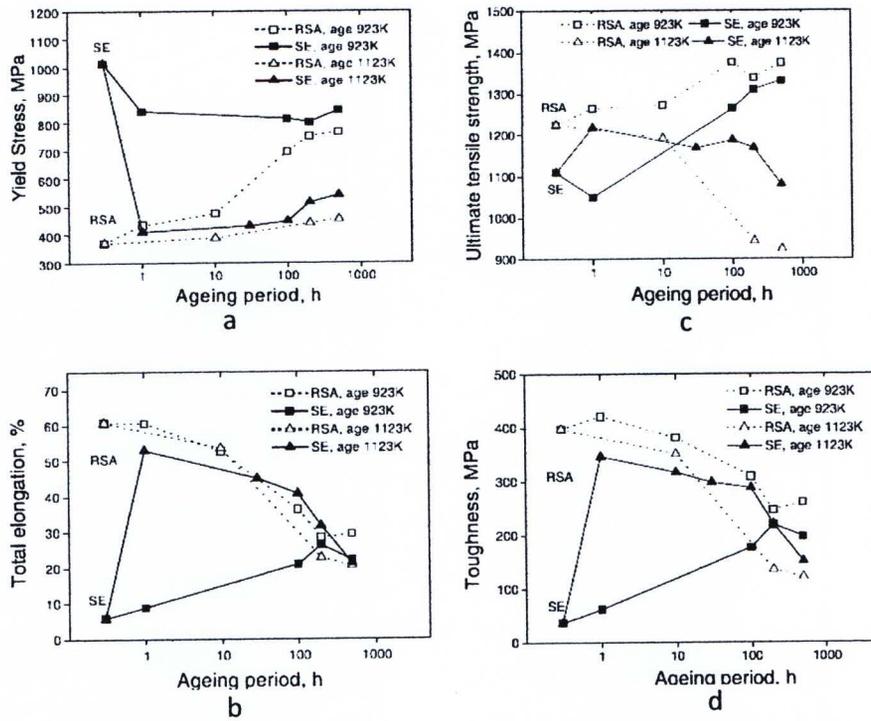




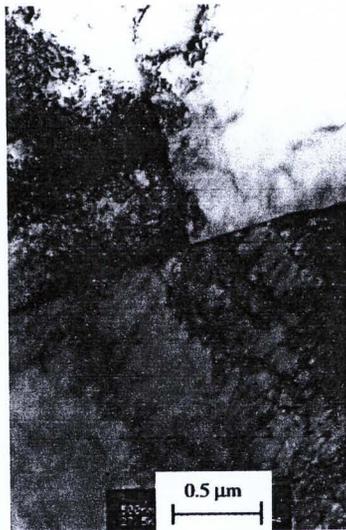
รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์เชิงเส้นบนวัสดุที่ผ่านการใช้งาน a) บริเวณขอบเกรน b) คาร์ไบด์ภายในโลหะพื้นมี Nb และ Mo อยู่มาก c) การกระจายตัวของ Nb และ Mo ในคาร์ไบด์ [7]



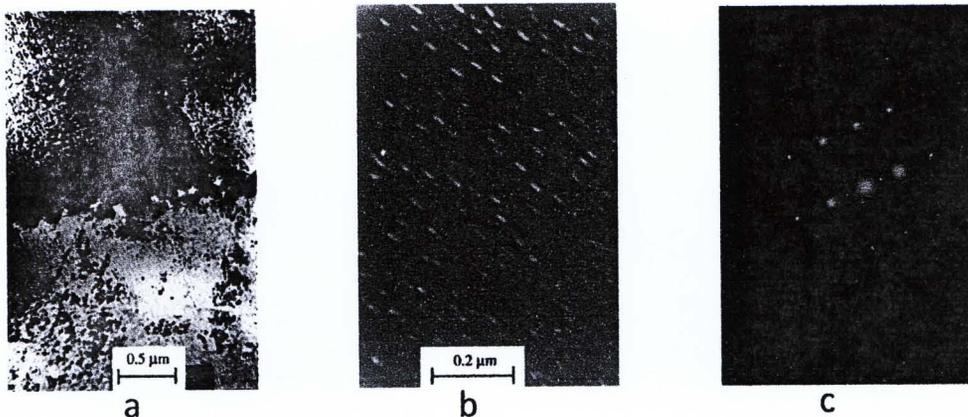
รูปที่ 2.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว a) คาร์ไบด์ตามขอบเกรน b) เฟส Ni<sub>2</sub>(Cr,Mo) c) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของ Ni<sub>2</sub>(Cr,Mo) และแกรมมาตอปเบิลไพร์ม (γ'') d) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของภาพ c) [7]



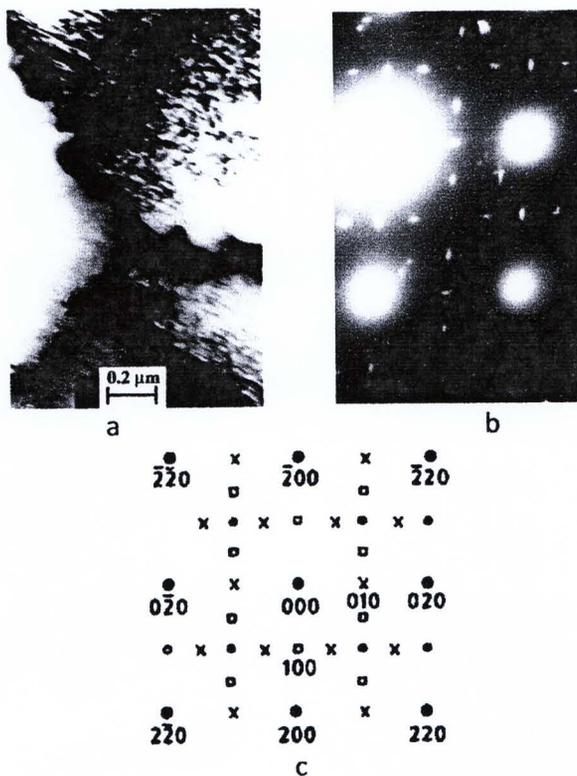
รูปที่ 2.10 กราฟแสดง a) ความเค้นคราก b) ระยะยืด c) ความแข็งแรงสูงสุด d) ความแกร่ง  
คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียด ของ อินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน  
ผ่านการอบอ่อน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]



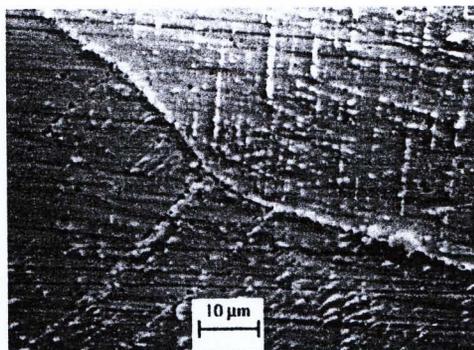
รูปที่ 2.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังการอบอ่อน  
เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1423 K แสดงให้เห็นแต่โลหะเนื้อพื้นและขอบเกรน [7]



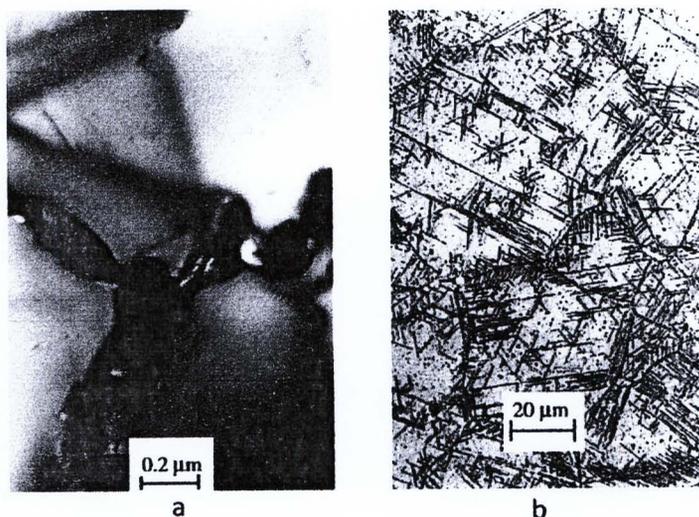
รูปที่ 2.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน a) วัสดุที่ผ่านการใช้งานและผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K ส่วนใหญ่จะเป็นแกรมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) b) แกรมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) c) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของแกรมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) [7]



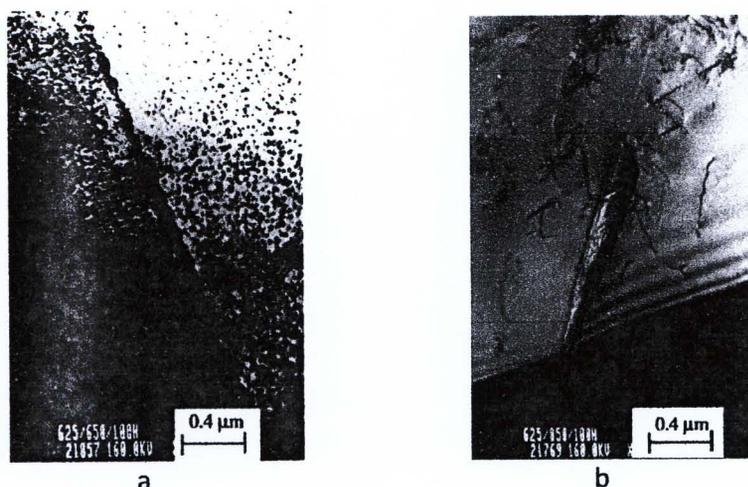
รูปที่ 2.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน และแกรมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) b) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของแกรมมาดอบเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) ไม่พบ  $\text{Ni}_2(\text{Cr}, \text{Mo})$  c) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ b) [7]



รูปที่ 2.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด วัสดุที่ผ่านการใช้งานและการอบชุบ ความร้อน 500 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K แสดงให้เห็นการตกตะกอนของเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) [7]



รูปที่ 2.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1123 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน ไม่พบ  $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$  และแกรมมาตออบเบลิตไพร์ม ( $\gamma''$ ) b) การตกตะกอนของเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) หลังเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมง [7]



รูปที่ 2.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการอบอ่อนภายหลังจากอบชุบความร้อน a) อุณหภูมิ 923 K 100 ชั่วโมง แสดงคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและแกมมาดับเบิลไพรม์ ( $\gamma''$ ) b) อุณหภูมิ 1123 K 100 ชั่วโมง แสดงเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) [7]

ตารางที่ 2.7 ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งานและกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]

Heat treatment condition	YS (MPa)	UTS (MPa)	Total elongation (%)
SE	1013	1110	5.8
SE · 923 K; 1 h	842	1050	8.8
SE · 923 K; 100 h	815	1263	21.0
SE · 923 K; 200 h	803	1310	26.4
SE · 923 K; 500 h	844	1331	22.3
SE · 1123 K; 1 h	410	1218	53
SE · 1123 K; 10 h	426	1171	48.3
SE · 1123 K; 30 h	431	1168	45.1
SE · 1123 K; 100 h	447	1187	40.8
SE · 1123 K; 200 h	515	1169	31.8
SE · 1123 K; 500 h	541	1081	21.4
Virgin material (pre-service condition)	375	1225	60.8

ตารางที่ 2.8 ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งาน การอบอ่อนและกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ [7]

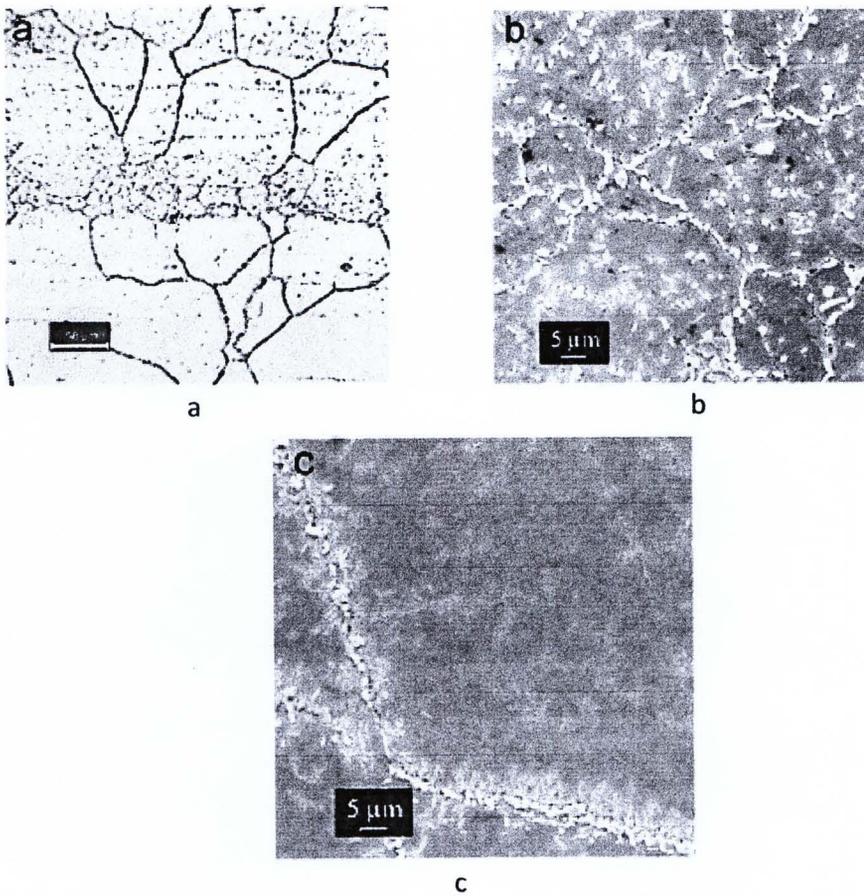
Heat treatment condition	YS (MPa)	UTS (MPa)	Total elongation (%)
RSA	370	1225	60.8
RSA · 923 K; 1 h	434	1265	60.7
RSA · 923 K; 10 h	473	1272	52.8
RSA · 923 K; 100 h	696	1376	36.5
RSA · 923 K; 200 h	750	1337	28.5
RSA · 923 K; 500 h	766	1374	29.4
RSA · 1123 K; 10 h	388	1192	53.6
RSA · 1123 K; 200 h	440	943	22.8
RSA · 1123 K; 500 h	454	925	20.6

ตารางที่ 2.9 ค่าความแข็งแรงสูงสุดและการตกตะกอนเฟสต่าง ๆ หลังการทดลอง [7]

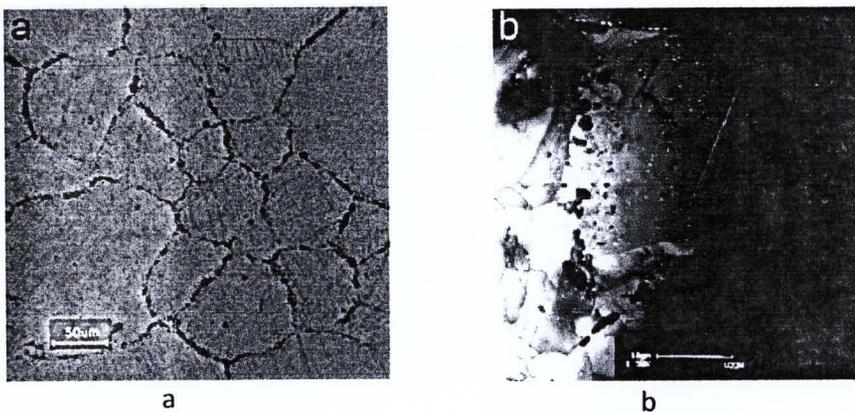
S. No.	Condition	Mechanical properties	Interpretation
1.	SE	Poor ductility (~6%); high YS value	Precipitation of intermetallic phases Ni <sub>2</sub> (Cr,Mo) and $\gamma'$ , continuous grain boundary carbide films
2.	SE + 923 K-1 h	Large ↓ YS; slight ↑ ductility	Dissolution of Ni <sub>2</sub> (Cr,Mo) prominent
3.	SE + 923 K-500 h	↓ YS; ↓ ductility	Precipitation of $\delta$
4.	SE + 1123 K-1 h	↓ YS; ↓ ductility	Dissolution of Ni <sub>2</sub> (Cr,Mo) and $\gamma'$
5.	SE + 1123 K-longer aging	↓ YS; large ↓ ductility	Precipitation of $\delta$
6.	SE + 1423 K-0.5 h	↓ YS; ↑ ductility	Dissolution of all Ni <sub>2</sub> (Cr,Mo), $\gamma'$ and secondary carbides present initially

<sup>a</sup>SE - service-exposed; ↑ increase; ↓ decrease.

Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] ศึกษาการตกตะกอนในโลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) โดยนำโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617 มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า การผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแกรมมาไฟร์ม ( $\gamma'$ , (Ni<sub>3</sub>(Al,Ti)) และเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) การตกตะกอนของเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) และแกรมมาไฟร์มมีส่วนเกี่ยวข้องกัน นอกจากนี้พบการตกตะกอนของ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่าย M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> และเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) และเมื่อนำวัสดุผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะพบว่าแกรมมาไฟร์ม ( $\gamma'$ ) มีปริมาณลดลงทำให้ไม่พบการตกตะกอนของเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ดังผลภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 2.18 ทุกอุณหภูมิและเวลาการทดลองพบการตกตะกอนของ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ((Cr,Co,Ni,Mo)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)



รูปที่ 2.17 โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แสง b), c)  $M_{23}C_6$  และเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ตกตะกอนตามขอบเกรน [8]



รูปที่ 2.18 โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสง b) ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านพบว่ามีการมาไฟรม ( $\gamma'$ ) ลดลง [8]