



ปริทรศนัวรรณกรรม

2.1 โลหะผสมนิกเกิล

โลหะผสมนิกเกิล ใช้งานกว้างขวางในงานที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานความร้อน และการต้านทานการคืบที่อุณหภูมิสูง เป็นโลหะผสมที่มีความซับซ้อนทางโครงสร้างจุลภาค เนื่องมาจากผลของธาตุผสมต่าง ๆ และกรรมวิธีทางความร้อน

2.1.1 กลุ่มธาตุผสมของโลหะผสมนิกเกิล [1,3]

ธาตุผสมต่าง ๆ ในโลหะผสมนิกเกิล สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้ดังนี้

2.1.1.1 กลุ่มที่มีโครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเนื้อพื้น หรือเรียกว่าแกมมา (γ) ประกอบด้วย นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก ทังสเตน และวานาเดียม

2.1.1.2 กลุ่มที่เกิดการตกตะกอน (Precipitate phase, γ') ประกอบด้วย อะลูมิเนียม ไททาเนียม ไนโอเบียม และแทนทาลัม

2.1.1.3 กลุ่มที่แยกตัวอยู่ตามขอบเกรน ประกอบด้วย แมกนีเซียม โบรอน เซอร์โคเนียม และคาร์บอน

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งธาตุผสมออกเป็นอีก 2 กลุ่มย่อยได้ดังนี้

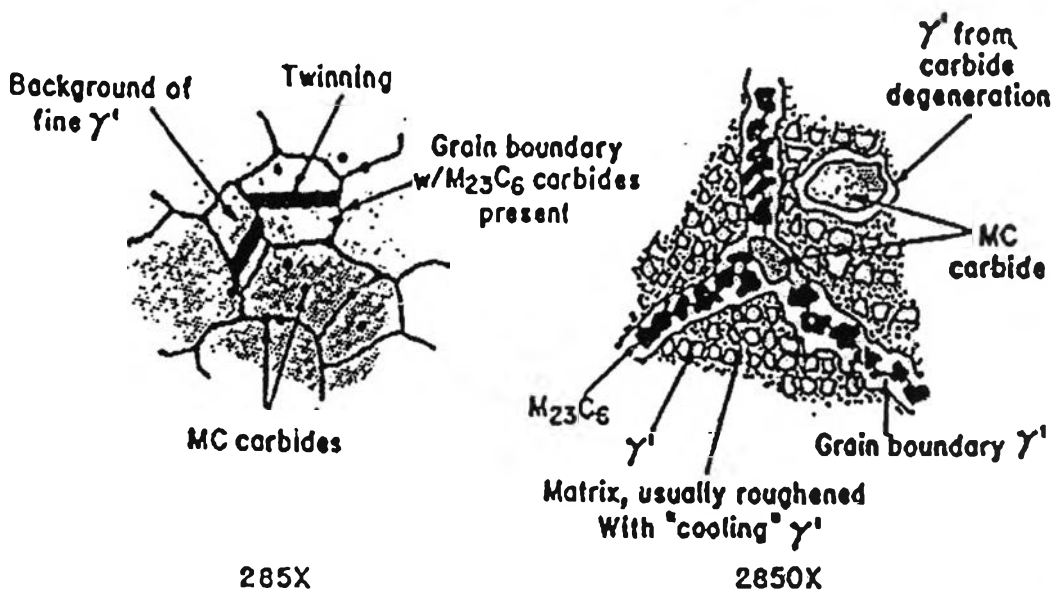
ก. กลุ่มที่มีส่วนสร้างคาร์ไบด์ ประกอบด้วย โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน ไนโอเบียม วานาเดียม แทนทาลัม และไททาเนียม

ข. กลุ่มที่มีส่วนสร้างออกไซด์ ประกอบด้วย โครเมียม และอะลูมิเนียม

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิล

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลโดยทั่วไป แสดงในรูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย

2.1.2.1 เนื้อพื้นออสเทนไนต์ (γ) เนื่องจากนิกเกิลมีโครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์ มีความเสถียรสูง สามารถละลายธาตุผสมอื่นได้ปริมาณมากโดยไม่เกิดเฟสที่มีผลเสียต่อคุณสมบัติ เนื้อพื้นออสเทนไนต์สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยกลไกการผสมธาตุ (Solid solution strengthening) ธาตุที่ผสม ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน โคบอลต์ เหล็ก ไททาเนียม และอะลูมิเนียม ธาตุผสมเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมต่างไปจากนิกเกิลประมาณ 1-13 %



รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของโลหะผสมนิกเกิลแบบใช้แรงขึ้นรูป (Wrought alloys) [1]

2.1.2.2 ตะกอนแกมมาไพรม (γ') กรรมวิธีทางความร้อนเพิ่มความแข็งแรง จะเกิดตะกอนแกมมาไพรมบนเนื้อพื้นในขั้นตอนการชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation hardening) หรือการบ่มแข็ง (Age hardening) แกมมาไพรมมีโครงสร้าง fcc เป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compound) ลักษณะ A_3B โดย A แทนด้วยโลหะผสมที่มีค่าศักย์ทางไฟฟ้าเป็นลบ (เทียบกับ B) ได้แก่ นิกเกิล โคบอลต์ หรือเหล็ก และ B แทนด้วยโลหะผสมที่มีค่าศักย์ทางไฟฟ้าเป็นบวก (เทียบกับ A) ได้แก่ อะลูมิเนียม ไททาเนียม หรือไนโอเบียม โดยทั่วไปแกมมาไพรมมีสูตรทางเคมีเป็น $Ni_3(Al,Ti)$ เพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมนิกเกิลโดยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

2.1.2.3 คาร์ไบด์ เกิดจากคาร์บอนทำปฏิกิริยากับธาตุผสมสร้างคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่พบในโลหะผสมนิกเกิล แบ่งเป็น 4 ชนิดหลัก ๆ คือ MC , $M_{23}C_6$, M_6C และ M_7C_3 การเกิดคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน จะช่วยยับยั้งการเลื่อนของเกรนได้ ส่งผลเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมนิกเกิล

2.1.2.4 เฟส TCP (Topological Close Packed phases) เกิดจากการควบคุมส่วนผสมที่ไม่ดี อาจเกิดขึ้นในกรรมวิธีทางความร้อน หรือเกิดในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง ลักษณะของเฟส TCP นี้จะมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง ๆ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงจึงเปราะแตกหักง่าย เป็นผลให้ความแข็งแรงของโลหะผสมนิกเกิลลดลง โดยเฟส TCP ที่พบทั่วไปคือ ซิกมา (σ), มิว (μ) และเลฟ (Laves)

2.1.3 ผลของธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของโลหะผสมนิกเกิล

2.1.3.1 นิกเกิล (Ni) มีหน้าที่หลักคือเป็นโลหะเนื้อพื้น มีโครงสร้างแบบ fcc มีข้อดีคือเป็นธาตุที่มีความเสถียรสูง สามารถผสมธาตุอื่นได้ในปริมาณมาก โดยไม่เกิดโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลเสียต่อความแข็งแรง

2.1.3.2 โครเมียม (Cr) ช่วยเพิ่มความสามารถป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ โดยสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ปกคลุมที่บริเวณผิวของโลหะผสม มีส่วนสร้างคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ นอกจากนี้โครเมียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมด้วยกลไกการละลายของแข็งชนิดแทนที่ได้อีกด้วย

2.1.3.3 เหล็ก (Fe) ทำหน้าที่เป็นธาตุผสมในเนื้อพื้น ส่วนมากจะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง

2.1.3.4 ไททาเนียม (Ti) เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง มีส่วนสร้างคาร์ไบด์ MC และมีแนวโน้มรวมตัวกับไนโตรเจนเกิดเป็นไททาเนียมไนไตรด์ (TiN)

2.1.3.5 อะลูมิเนียม (Al) เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันโดยสร้างชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเพิ่มความแข็งแรงจากการบ่มแข็ง โดยตกตะกอนแกมมาไพรมออกมา ส่งผลให้ความแข็งแรงของโลหะผสมสูงขึ้น

2.1.3.6 ไนโอเบียม (Nb) สร้างคาร์ไบด์ MC และอาจช่วยให้แกมมาไพรมตกตะกอน ทำให้ความแข็งแรงโลหะผสมสูงขึ้น

2.1.3.7 แมงกานีส (Mn) ช่วยควบคุมธาตุอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการในโลหะผสม โดยจะรวมตัวกับธาตุที่ไม่ต้องการ เช่น กำมะถัน ในรูปของแมงกานีสซัลไฟด์ (MnS)

2.1.3.8 ซิลิกอน (Si) และกำมะถัน (S) มีส่วนช่วยในขั้นตอนการหล่อ แต่ถ้ามีซิลิกอนหรือกำมะถันผสมในปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้โลหะผสมเกิดการเสียหายแบบเปราะขึ้น

2.1.3.9 คาร์บอน (C) ช่วยให้เกิดคาร์ไบด์ชนิดต่าง ๆ โดยจะรวมตัวกับธาตุผสมอื่น ๆ เกิดเป็นคาร์ไบด์

2.1.3.10 โคบอลต์ (Co) ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการใช้งานของโลหะผสมให้สูงขึ้น และช่วยเพิ่มความสามารถนำความร้อนของโลหะผสมให้สูงขึ้น

2.1.4 ชนิดของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในโลหะผสมนิกเกิล

สำหรับโลหะผสมแบบใช้แรงขึ้นรูป (Wrought alloys) จะมีปริมาณคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะส่วนใหญ่คาร์ไบด์จะมีความแข็งแรง และเปราะแตกหักง่ายมากกว่าเนื้อพื้นของโลหะผสม การกระจายตัวของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนจะมีผลต่อการกัดของวัสดุ ความเหนียว และการคืบที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของ

คาร์ไบด์ที่เกิดตามขอบเกรน ชนิดของคาร์ไบด์ที่พบทั่วไปในโลหะผสมนิกเกิล อยู่ในรูปของ MC, $M_{23}C_6$, M_6C และ M_7C_3

2.1.4.1 คาร์ไบด์ MC เป็นลักษณะคาร์ไบด์เดี่ยว (Monocarbides) โดย M แทนด้วยโลหะ เช่น ไททาเนียม แทนทาลัม ไนโอเบียม หรือทังสเตน ซึ่งคาร์ไบด์ชนิด MC เริ่มเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแข็งตัว คาร์ไบด์ชนิดนี้ถูกละลายได้ยากโดยเฉพาะในช่วงการอบละลาย (Solution heat treatment) เพราะมีความเสถียรสูงและขัดขวางการโตของเกรนออสเทนไนต์ (Grain growth) ได้

2.1.4.2 คาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ มักเป็นคาร์ไบด์ของโครเมียม โดย M บางส่วนอาจแทนด้วยเหล็ก ทังสเตน โมลิบดีนัม หรือโคบอลต์ แต่จะมีปริมาณน้อยกว่าโครเมียม คาร์ไบด์ประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 760 - 980 องศาเซลเซียส แหล่งที่เกิดคาร์ไบด์ชนิดนี้อาจมาจากทั้งคาร์ไบด์ MC และจากคาร์บอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ โดยปกติแล้วมักจะตกตะกอนอยู่ตามบริเวณขอบเกรนและมีโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อน

2.1.4.3 คาร์ไบด์ M_6C เกิดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 815 - 980 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์ชนิดนี้มีลักษณะคล้าย ๆ กับคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อโลหะผสมมีปริมาณโมลิบดีนัมและทังสเตนสูงเกินกว่า 6 - 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะอยู่ตามบริเวณขอบเกรนร่วมกับคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$

2.1.4.4 คาร์ไบด์ M_7C_3 เป็นคาร์ไบด์ของโครเมียม เช่น Cr_7C_3 มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง มักจะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$

2.1.5 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิล

โลหะผสมนิกเกิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบใช้แรงขึ้นรูป (Wrought alloys) ดังนั้นจึงขอกล่าวเฉพาะกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิลแบบใช้แรงขึ้นรูปเท่านั้น ดังนี้

กรรมวิธีทางความร้อนทั่วไป เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมนิกเกิล ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการอบละลาย (Solution heat treatment) ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 885 - 1,230 องศาเซลเซียส ขั้นตอนนี้ทำให้เนื้อพื้นมีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ที่อิ่มตัวยิ่งยวด ขั้นตอนที่สองคือการบ่มแข็ง (Age hardening) เพื่อให้เกิดแกมมาไพรมตกตะกอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 620 - 800 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการคืบที่อุณหภูมิสูง [1, 3]

สำหรับโลหะผสมนิกเกิลที่ต้องการความต้านแรงดึงสูง อุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส จะบ่มแข็งเพียงครั้งเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 760 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้แกมมาไพรมที่มีขนาดเล็กละเอียด และลดการเกิดคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน แต่ถ้าต้องการความต้านทาน

การคืบและความต้านทานการแตกหักที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส ต้องบ่มแข็งสองครั้ง โดยบ่มแข็งครั้งแรกคือบ่มเสถียร (Stabilization heat treatment) ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 815 - 980 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์ไบด์เริ่มต้นมีลักษณะตามที่ต้องการ โดยเฉพาะคาร์ไบด์ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และบ่มแข็งครั้งที่สองคือการบ่มแข็งตกตะกอน (Precipitation heat treatment) เพื่อให้เกิดแกมมาไพรมตกตะกอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์

2.2 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750

อินโคเนล เอ็กซ์ 750 เป็นโลหะผสมนิกเกิล ประกอบไปด้วยนิกเกิล โครเมียม และธาตุผสมต่าง ๆ สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลาย และการบ่มแข็ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนของแกมมาไพรมที่ประกอบไปด้วย ไททาเนียม และอะลูมิเนียม ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $Ni_3(Al,Ti)$ โดยทั่วไปอินโคเนล เอ็กซ์ 750 มีสมบัติเฉพาะ ดังนี้

- ก. มีความต้านทานการคืบและความต้านทานการแตกหักสูงถึงอุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส
- ข. มีความต้านแรงดึงสูง (Tensile strength) ถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
- ค. มีความต้านทานการออกซิเดชันสูงถึงอุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส
- ง. มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง
- จ. มีความสามารถในการเชื่อมสูงเมื่อเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบความต้านทานและแบบหลอมละลาย

2.2.1 เกรดตามมาตรฐานนานาชาติ

เกรดตามมาตรฐานนานาชาติของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 แสดงในตารางที่ 2.1

2.2.2 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 แสดงในตารางที่ 2.2

2.2.3 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 เกรดตามมาตรฐานนานาชาติ [7]

ประเทศ (Country) มาตรฐาน (National standards)	สัญลักษณ์ (Material designation)	ข้อกำหนด (Specification)				
		แผ่นบางและ แผ่นหนา (Sheet and plate)	ลวดและแท่ง (Rod and bar)	แผ่นบาง มาก (Strip)	ลวดขนาด เล็ก (Wire)	การขึ้นรูป (Forging)
เยอรมนี	W.-Nr.2.4669 NiCr15Fe7TiAl					
ฝรั่งเศส (AFNOR)	NC15TNbA					
อเมริกา (USA) ASTM ASME AMS	UNS N07750		B 637 SB 637			B 637 SB 637
		5542	5667	5542	5698	5667
		5598	5668	5598	5699	5668
			5669			5670
			5670			5671
			5671			5747
			5741			5749
			5749			
ISO	NiCr15Fe7Ti2Al					

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 [7]

ธาตุ	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Ti	Co	Nb	Al	S
ค่าต่ำสุด	70.0	14.0	5.0	-	-	-	-	2.25	-	0.70	0.40	-
ค่าสูงสุด	-	17.0	9.0	0.08	1.00	0.50	0.50	2.75	1.0	1.20	1.00	0.01

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 [7]

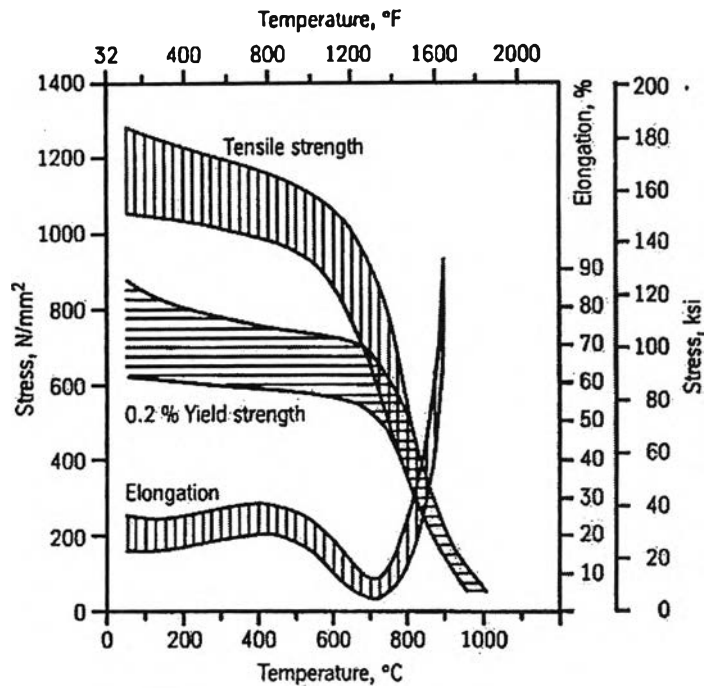
อุณหภูมิ (Temperature)		ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)		สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)		ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity)		มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)	
°C	°F	$\frac{J}{kg K}$	$\frac{Btu}{lb ^\circ F}$	$\frac{W}{m K}$	$\frac{Btu in.}{Ft^2 h ^\circ F}$	$\mu\Omega cm$	$\frac{\Omega Cmil}{ft}$	$\frac{kN}{mm^2}$	$10^3 ksi$
0	32								
20	68	430	0.103	12.0	83	121	731	214	31.0
93	200		0.109		89		737		30.0
100	212	460		13.0		123		206	
200	392	480		14.1		124		202	
204	400		0.116		98		748		29.2
300	572	500		17.3		126		196	
316	600		0.120		109		760		28.3
400	752	520		17.9		127		190	
427	800		0.125		120		770		27.4
500	932	535		18.5		129		185	
538	1000		0.130		131		783		26.7
600	1112	560		19.9		131		180	
649	1200		0.137		143		786		25.5
700	1292	600		21.5		130		171	
760	1400		0.151		154		775		24.0
800	1472	660		22.8		128		161	
871	1600		0.171		164		761		22.1
900	1652	750		24.0		125		149	
982	1800				173				20.0
1000	1832			25.3				135	

2.2.4 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 บางเกรด แสดงในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 บางเกรด [7]

มาตรฐาน (AMS No.)	ลักษณะ (Form)	ขนาด (Dimensions) (mm.)	อบอ่อน (Annealed)				ชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation hardened)				
			ความต้านแรง ดึงสูงสุด (Tensile Strength) (N/mm ²)	ความเค้น คราก (0.2% Yield Strength N/mm ²)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Elongation) %	ความแข็ง (Brinell Hardness) (HB)	ความต้านแรง ดึงสูงสุด (Tensile Strength) (N/mm ²)	ความเค้น คราก (0.2% Yield Strength N/mm ²)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Elongation) %	เปอร์เซ็นต์การ ลดพื้นที่หน้าตัด (Reduction of area)	ความแข็ง (Brinell Hardness) (HB)
5542	แผ่นบางมาก (Strip)	< 0.25	965				1,035				>300
		0.25 - 0.60	895		20						
		≥ 0.60	As agreed		As agreed				15		
	แผ่นบาง (Sheet)	0.25 - 0.60	965		30						
		> 0.60 3.20	895	415		≤ 152	1,140	725	20		
		> 3.20 6.35	895	450	40						
แผ่นหนา (Plate)	4.75 - 100					1,070	690	20			
5667	(แท่ง ทูบขึ้นรูป) (Bar, forging)	≤ 100				≤ 300	1,140	725	20	25	300-360
		> 100					1,100	690	15	17	
5668	(แท่ง ทูบขึ้นรูป) (Bar, forging)	≤ 250					860	550	8	8	260-340
							975				
5669	แท่ง (Bar)	< 60					1,170	795	18	25	315-400



รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [7]

2.2.5 กรรมวิธีทางความร้อนของอินโคเนล เอ็กซ์ 750

อินโคเนล เอ็กซ์ 750 มีความแข็งแรงเชิงกลดีมาก เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ และตะกอนของแกมมาไพรม์ร่วมกับคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบนเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน มาตรฐานกรรมวิธีทางความร้อน แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ [7]

หมายเลข (No.)	อบอ่อน (annealing)	อบละลาย (solution)	อบคลาย ความเค้น (equalize)	อบเสถียร (stabilize)	ชุบแข็งตกตะกอน (precipitation hardening)	ตามมาตรฐาน (According to)	
						ASTM	AMS
0	1175 °C 2h AC			845 °C 24h AC	760 °C 16h AC	B 637	-
1		1150 °C 2-4h AC		845 °C 24h AC	700 °C 20h AC	B 637	5668
2		960 °C ~1h AC			730 °C 8h FC 2h to 620 °C 8h AC	B 637	5598 5669
3		1080-1120 °C 2h AC			700 °C 20h AC	B 637	-
4			885 °C 24h AC*		700 °C 20h AC	-	5667
5	≥ 980 °C				700 °C 20h AC		5542 5582

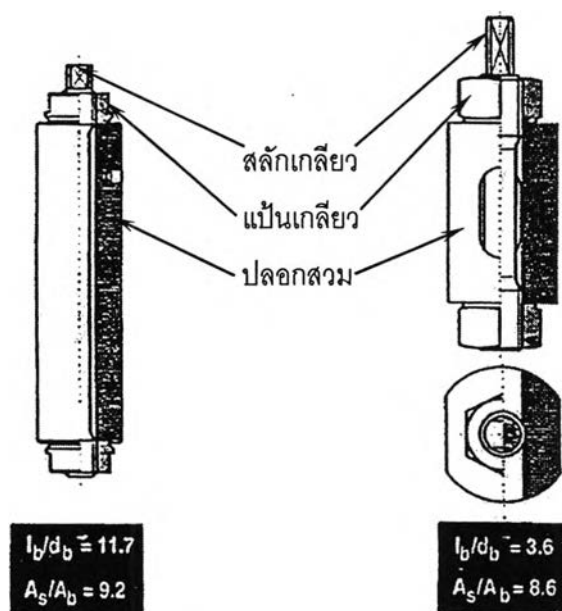
*บางเล่มใช้การอบละลาย (Solution heat treatment) [6]

2.3 การทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียว

การทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียว เพื่อศึกษาการยึดตัวหรือการคืบของสลักเกลียว มีดังนี้

2.3.1 ขนาดของสลักเกลียว

ตามร่างมาตรฐาน SEP 1260 ของเยอรมนี การทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมของการคลายความเค้นของสลักเกลียว ปลอกสวมและแป้นเกลียว ดังรูปที่ 2.3 ที่ใช้วัสดุเหมือนกัน มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของปลอกสวมกับสลักเกลียว (A_s/A_b) อยู่ระหว่าง 8 - 9



ก) รูปแบบที่ 1

ข) รูปแบบที่ 2

รูปที่ 2.3 รูปแบบของสลักเกลียวกับปลอกสวมที่ใช้ทดสอบ [4]

l_b/d_b คือ อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว

A_s/A_b คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของปลอกสวมกับสลักเกลียว

2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนทดสอบการคลายความเค้น มี 3 ขั้นตอน คือ

2.3.2.1 ช่วงรับภาระเริ่มต้น สลักเกลียวรับความเค้นกระทำ โดยขันแป้นเกลียวให้แน่นเข้าด้วยกัน และไม่เกิดการบิดตัวภายในสลักเกลียว

2.3.2.2 ช่วงทดสอบที่อุณหภูมิสูง สลักเกลียวจะถูกให้ความร้อนภายในเตาด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิทดสอบ คงอุณหภูมิไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา โดยอุณหภูมิในเตามีความคลาดเคลื่อน ± 5 องศาเซลเซียส

2.3.2.3 ช่วงปลดภาระ สำหรับตัวอย่างรูปแบบที่ 1 (รูป 2.3 ก.) จะปลดภาระหลังจาก วัดขนาดผลรวมความยาวของสลักเกลียว สำหรับตัวอย่างรูปแบบที่ 2 (รูป 2.3 ข.) จะปลดภาระ หลังจากวัดความเครียดด้วยเครื่องวัดความเครียดที่ติดเข้ากับด้านข้างของสลักเกลียว

2.3.3 การหาค่าการคลายความเค้น

การหาค่าการคลายความเค้น ใช้การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงยืดหยุ่นหรือความเค้นยืดหยุ่นของสลักเกลียวก่อนและหลังทดสอบการคลายความเค้น ความเค้นยืดหยุ่น คือ ผลคูณระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นแบบสถิตกับความเครียดยืดหยุ่น ซึ่งมอดุลัสยืดหยุ่นแบบสถิตหาได้ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (อัตราให้ภาระ 1-3 เมกะพาสคาลต่อวินาที) หรือใช้ข้อมูลมาตรฐาน สำหรับความเครียดยืดหยุ่นของสลักเกลียว หาได้จาก

2.3.3.1 สำหรับตัวอย่างรูปแบบที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของสลักเกลียว ก่อนและหลังทดสอบการคลายความเค้น คือ ความแตกต่างความยาวของสลักเกลียวก่อนรับภาระและหลังปลดภาระ (รูป 2.3 ก.) ตามข้อ 2.3.2

2.3.3.2 สำหรับตัวอย่างรูปแบบที่ 2 การวัดความแตกต่างความยาวสลักเกลียวก่อนรับภาระและหลังปลดภาระ ใช้เครื่องวัดความเครียดติดสลักเกลียวตรงปลอกสวมที่เปิดด้านข้างไว้และทำมุม 180 องศากับสลักเกลียว (รูป 2.3 ข.) ตามข้อ 2.3.2

2.3.4 จำนวนสลักเกลียวที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบใช้ตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ 1 คาบ ที่ 1 อุณหภูมิ เช่น ทดสอบที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1,000, 3,000, 10,000, 20,000 และ 30,000 ชั่วโมง ใช้จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง เป็นต้น การทดสอบจะต้องใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นสำหรับสลักเกลียว ปลอกสวม และแป้นเกลียว ที่ทำจากวัสดุไม่เหมือนกัน เพื่อสร้างความเชื่อมั่นของการทดลอง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

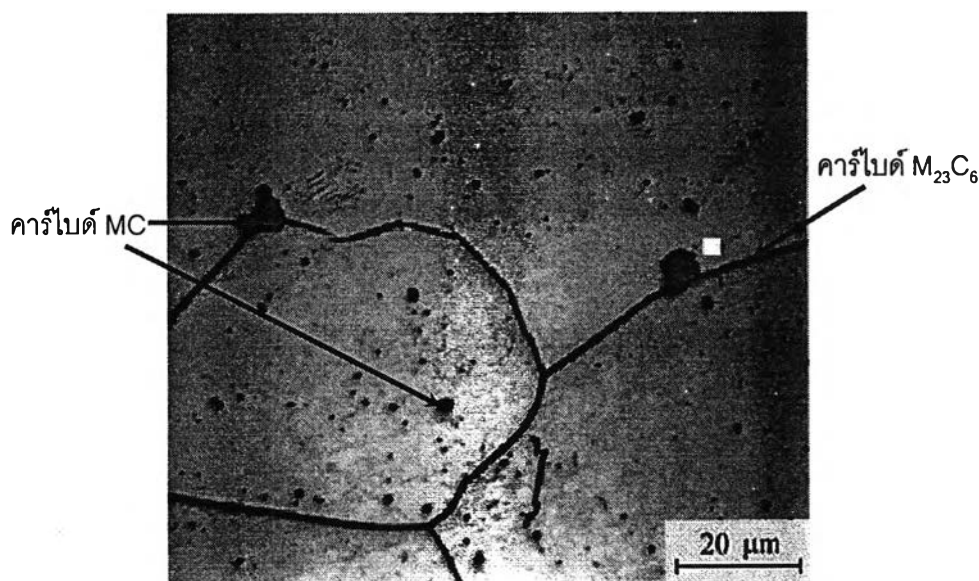
J.A Cel Valle และคณะ [8] ได้ศึกษาชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร นำมากลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ มีขนาดความยาวเกจ 12 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทำเกลียวที่ปลายทั้งสองข้าง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนตามมาตรฐาน AMS 5667 โดยส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานทดสอบ [8]

Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Ta+Nb	Co	Mn	Si	S	Cu	C
Bal.	15.4	6.3	2.55	0.77	1.03	0.04	0.03	0.08	<0.001	0.02	0.04

ชิ้นงานทดสอบผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 1,090 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในน้ำ และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 737 องศาเซลเซียส ในเวลาที่แตกต่างกัน ขนาดรัศมีเฉลี่ยของแกมมาไพรมเท่ากับ 10, 26, 35 และ 53 นาโนเมตร มีสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นค่าคงที่ระหว่างการบ่มแข็งในชิ้นงานทดสอบ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบแบบละลายที่อุณหภูมิ 1,090 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.4 ขนาดเกรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 100 ไมโครเมตร และขนาดเกรนไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการบ่มแข็งเพิ่มความแข็งแรง พบคาร์ไบด์ MC ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรน ส่วนคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ ตกตะกอนบริเวณขอบเกรน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 1,090 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [8]

J.A Cel Valle และคณะ [8] ได้สรุปการบ่มแข็งเพิ่มความแข็งแรงของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 พบว่ารูปแบบการตกตะกอนของแกมมาไพรม เป็นปัจจัยหลักส่งผลต่อความแข็งแรง โดยแกมมาไพรมที่มีขนาดรัศมีเฉลี่ยน้อยกว่า 15 นาโนเมตร จะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวรด้วยกลไกชนิด

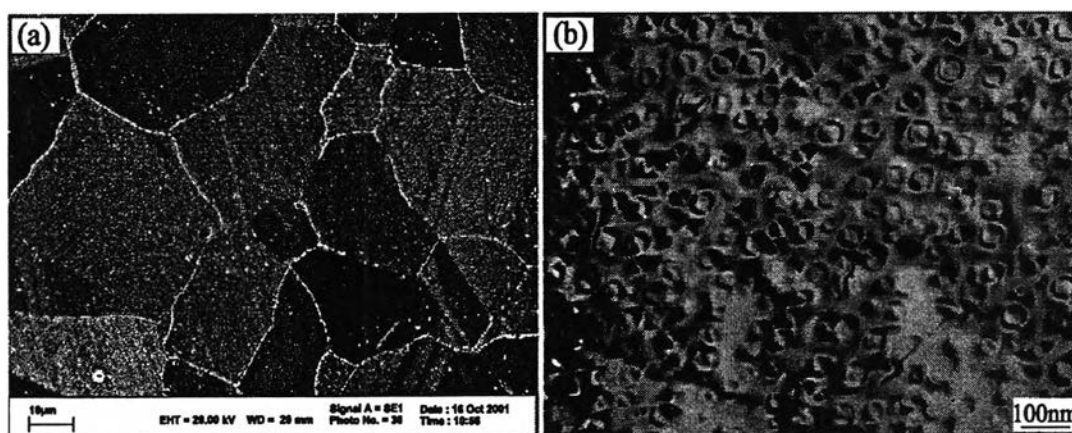
ความเค้นเฉือนภายในแกมมาไพรม (Particle cutting) ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง ขณะแกมมาไพรมที่มีขนาดรัศมีเฉลี่ยประมาณ 40 นาโนเมตร จะส่งผลการเปลี่ยนรูปแบบดาวด้วยกลไกของโอโรวาน (Orowan Looping) ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงลดลงเมื่อแกมมาไพรมใหญ่ขึ้น สำหรับในช่วงรัศมีเฉลี่ยระหว่าง 15 ถึง 40 นาโนเมตร จะเกิดกลไกทั้งสองอย่างร่วมกัน ขนาดของแกมมาไพรมขึ้นอยู่กับกระบวนการบ่มน้อยไป (Underaging) และการบ่มเกิน (Overaging)

Shuangquan Zhao และคณะ [9] ได้ศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแข็ง ต่อการเพิ่มขึ้นของขนาดรัศมีเฉลี่ยแกมมาไพรมในโลหะผสมนิกเกิล โดยใช้รูปแบบของ Ostwald Ripening ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานทดสอบ [9]

Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Co	Mn	Si	Mo	Nb	C
Bal.	24.31	1.02	1.58	0.75	19.63	0.27	0.45	0.52	1.83	0.034

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ตามมาตรฐานกรรมวิธีทางความร้อน ดังรูปที่ 2.5 สำหรับงานวิจัย [9] ศึกษาผลของการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 704, 725 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็งต่อขนาดรัศมีเฉลี่ยแกมมาไพรมที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.6

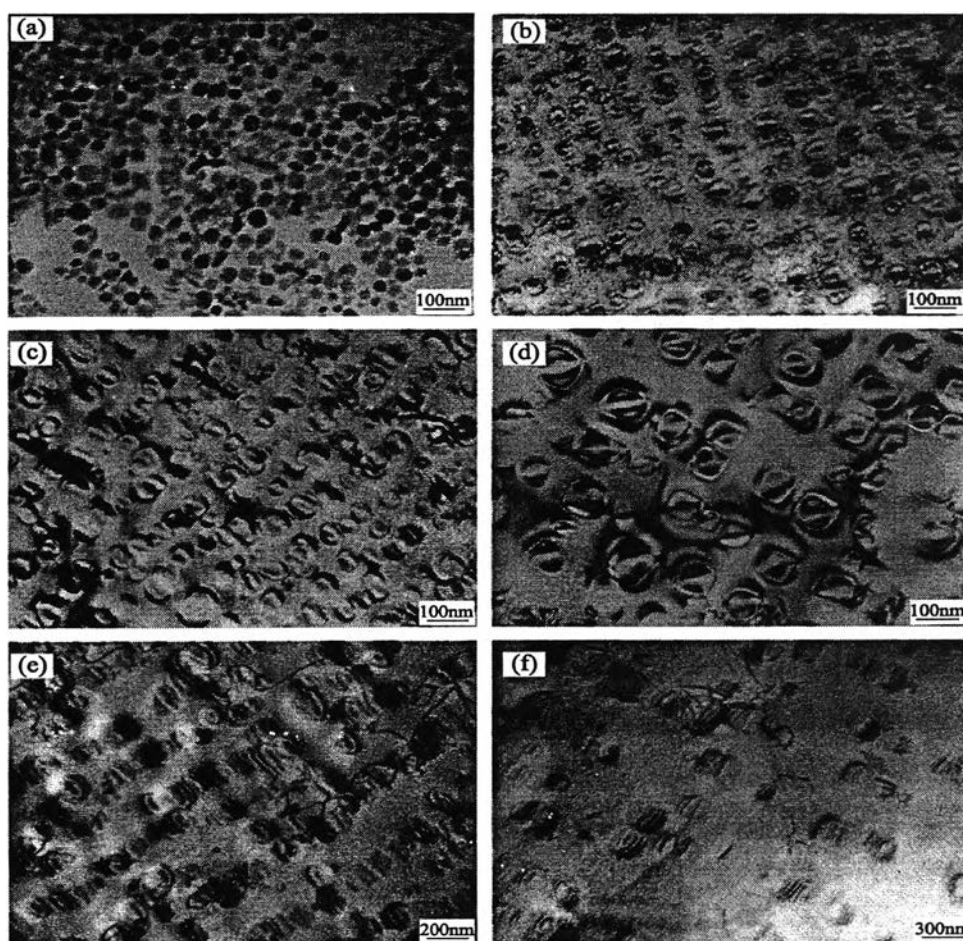


รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง [9]

(a) ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

(b) ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

หลังการบ่มแข็งชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวด โดยกัดด้วยสารละลายกรดซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีของ HCl, HNO₃ และ H₂O ในสัดส่วน 10:1:10 และศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ชิ้นงานถูกขัดให้บางจนมีความหนาประมาณ 60-80 ไมโครเมตร จากนั้นกัดด้วยสารละลายกรดประกอบด้วย 10%HClO₄+25%CH₃CH₂OH+65%C₄H₉OH ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับตะกอนแกมมาไพรมสามารถแยกออกในสารละลายกรดด้วยไฟฟ้า ประกอบด้วย 1%(NH₄)₂SO₄ +1%C₆H₈O₇;H₂O ที่ 0 - 5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 - 30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ขนาดรัศมีเฉลี่ยของแกมมาไพรมวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractospectrometer) การทดสอบวัดความแข็งของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 100 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที



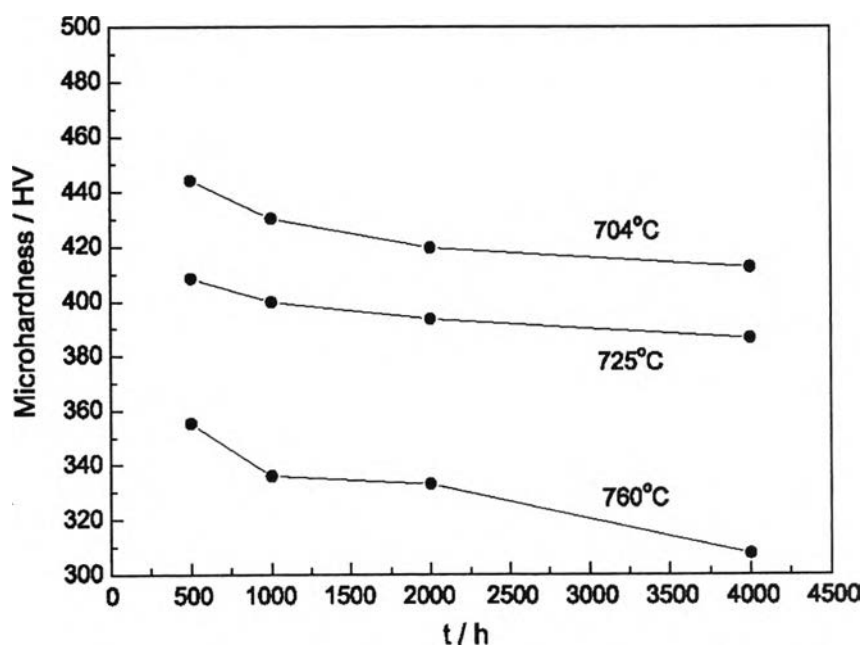
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแกมมาไพรมของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 704 องศาเซลเซียส (a และ b) อุณหภูมิ 725 องศาเซลเซียส (c และ d) และอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส (e และ f) เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง และ 4,000 ชั่วโมง ตามลำดับ ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [9]

Shuangquan Zhao และคณะ [9] ได้สรุปผลของการตกตะกอนและพฤติกรรมการบ่มแข็งของชิ้นงานทดสอบ มีดังนี้

ก. การตกตะกอน ส่วนใหญ่เป็นตะกอนแกมมาไพรมร่วมด้วยคาร์ไบด์ MC และคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ โดยรูปร่างของแกมมาไพรมเป็นก้อนผลึกลูกบาศก์ รอยต่อผลึกอสเทนไนต์กับแกมมาไพรมมีความคลาดเคลื่อนปานกลาง ขนาดรัศมีเฉลี่ยของแกมมาไพรมประมาณ 15 นาโนเมตร

ข. ขนาดรัศมีเฉลี่ยของแกมมาไพรมที่เพิ่มขึ้น ถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่โดยปริมาตร (Volume diffusion control) ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการเพิ่มขนาดรัศมีเฉลี่ยของแกมมาไพรมประมาณ 247 กิโลจูลต่อโมล โดยพลังงานกระตุ้นการแพร่โดยปริมาตรมาจากการแพร่ของอะลูมิเนียมและไททาเนียมที่อยู่ในเนื้อพื้นอสเทนไนต์

ค. ความแข็งของชิ้นงานทดสอบเวลา 500 ถึง 4,000 ชั่วโมง มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มแข็ง โดยความแข็งจะลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลาการบ่มแข็ง ดังรูปที่ 2.7 ความแข็งลดลงเนื่องจากแกมมาไพรมมีขนาดรัศมีเฉลี่ยเพิ่มขึ้น อุณหภูมิบ่มแข็งมีผลต่อความแข็งมากกว่าเวลาที่ใช้บ่มแข็ง



รูปที่ 2.7 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิและเวลาบ่มแข็งต่างกัน [9]