

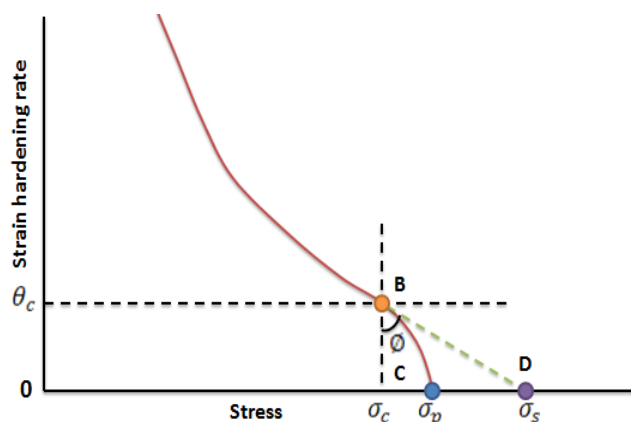
บทที่ 5 ผลการทำแบบจำลองวัสดุในสถานะการกดขึ้นรูปร้อน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลจากแบบจำลองวัสดุเพิ่มเติมจากบทที่ 4 โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการทำแบบจำลองทางวัสดุและวิเคราะห์หาสมการความแม่นยำสำหรับโลหะผสม MAB ส่วนที่สองคือผลของการใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุเพื่ออธิบายเสถียรภาพของการเสียรูปเมื่อผ่านการกดขึ้นรูปร้อน และส่วนสุดท้ายคือผลของโครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์การเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

5.1 ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลโดยใช้สมการชิงกล้า

5.1.1 อัตราความเครียดแข็ง (Work hardening rate)

จากเส้นโค้งความเครียดแข็ง (Work hardening curve) สามารถใช้ในการหาค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าค่าอัตราความเครียดแข็ง ($\theta = d\sigma/d\epsilon$) คำนวณได้จากการทำคอนเวกซ์กับความเค้นวิกฤตไปที่เส้นโค้งไหลเดิม โดยการเริ่มต้นความเครียดแข็งของการเบี่ยงเบนไปเป็นความเค้นวิกฤต (σ_c) จากนั้นคำนวณความเค้นสูงสุด (σ_p) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียดแข็ง (θ) มาถึงจุดต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับการจุดเปลี่ยนโค้งของเส้นโค้ง $d\sigma/d\epsilon$ กับ σ [58]

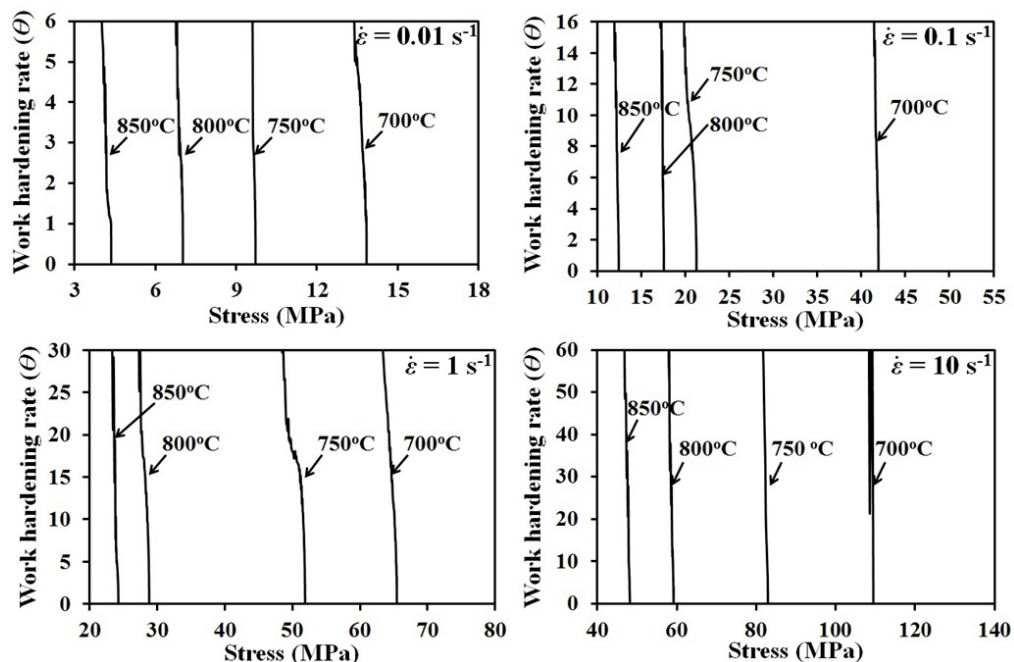


รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียดจริงเทียบกับค่าความเค้น

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.1 พบว่ามีค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าคือ ε_c (ความเครียดวิกฤต) ε_p (ความเครียดสูงสุด) σ_c (ความเค้นวิกฤต) σ_p (ความเค้นสูงสุด) ε_{ss} (ความเครียดที่สภาวะคงตัว) และ σ_{ss} (ความเค้นที่สภาวะคงตัว) สามารถวิเคราะห์หาค่าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับความเค้น โดยค่าอัตราความเครียดแข็งนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

ในงานวิจัยนี้เราจะใช้วิธีหาค่าความเค้นวิกฤตโดยใช้สมการ Polynomial กำลังสาม ซึ่งเป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Najafizadeh และ Jonas [59] ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยมองหาค่าความเค้นวิกฤตคือจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟความเครียดแข็ง ($d\sigma/d\varepsilon$) กับ ความเค้น (σ) เมื่อหาอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่ 2.21 ทำให้ได้ค่าความเค้นวิกฤตที่ทำให้การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ 2.22 รากที่สองของค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังในสมการที่ 2.23

เพราะฉะนั้น วิธีการนี้ได้นำมาใช้ในการกำหนดค่าของความเค้นวิกฤตที่มีการเสีรูปร่างที่แตกต่างกัน รูปที่ 5.2 แสดงผลการหาค่าความเค้นวิกฤต ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุด

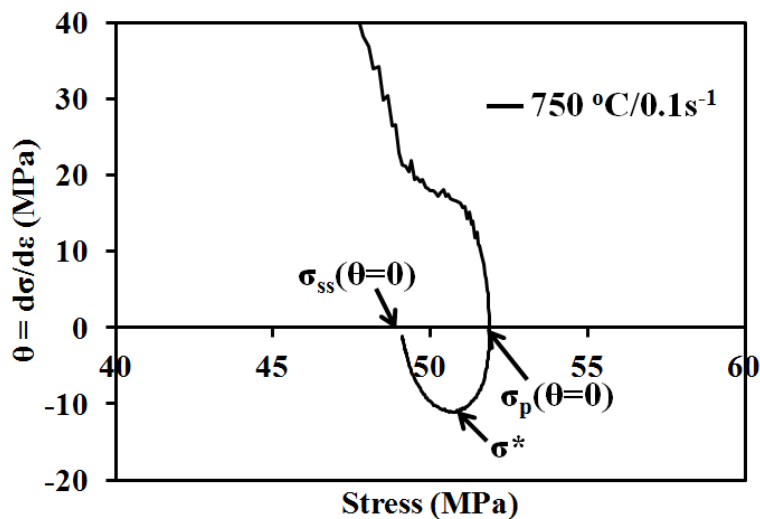


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับความเค้นจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ของการกดขึ้นรูปร้อนของวัสดุ MAB

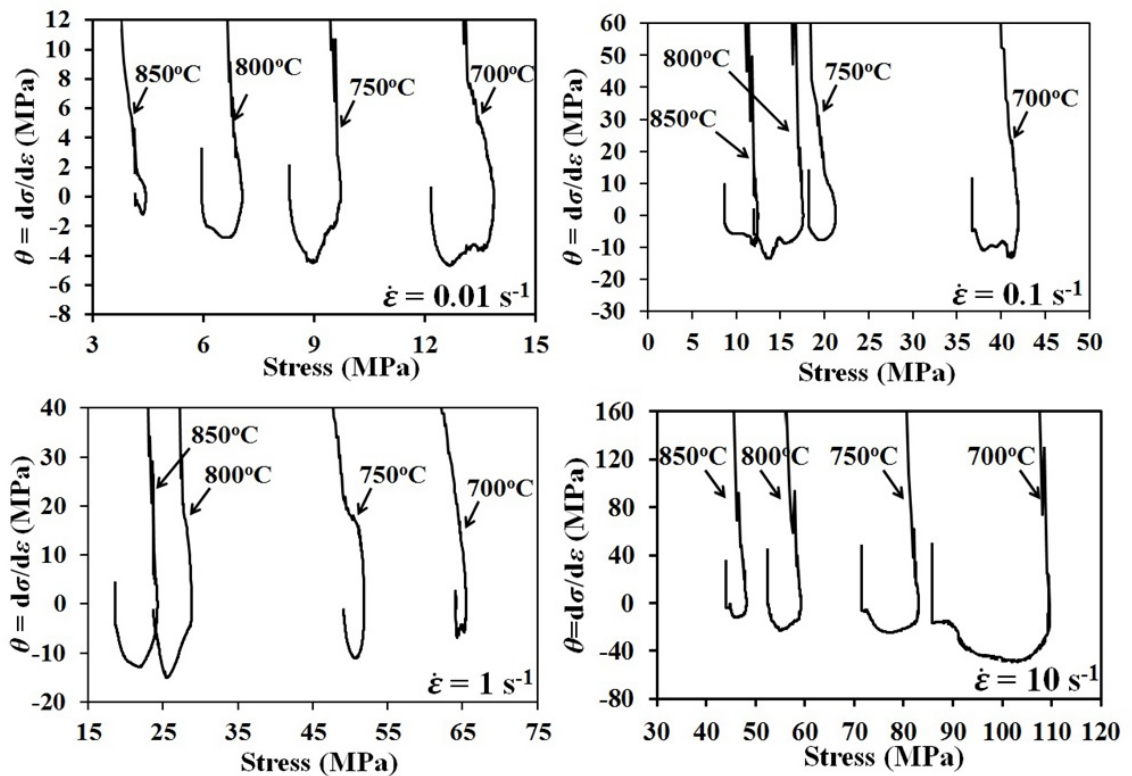
5.1.2 อัตราการอ่อนตัว (Softening rate)

สำหรับการกดขึ้นรูป พบว่ามีการรวมตัวของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นที่บริเวณของความเค้นวิกฤต เนื่องจากการเปลี่ยนรูปรีด อีกทั้งยังพบว่ามีดิสโลเคชันถูกทำลาย เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของการกดขึ้นรูปรีดหลังจากค่าความเค้นสูงสุดถูกนำมาใช้ในการคำนวณความเครียดแข็งและในอัตราการอ่อนตัว ($d\sigma/d\varepsilon$ กับ σ) แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นว่าม้อัตราการอ่อนตัวสูงสุด (ε^*) เมื่อมีความเครียดที่ติดลบสูงสุด [38]

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอ่อนตัวกับความเครียด แบ่งได้เป็น 3 บริเวณหลักๆ ดังนี้ บริเวณที่ 1 มีอัตราความเครียดแข็งเป็นเส้นตรงและลดลงจนถึงจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุดของความเครียดวิกฤตซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ บริเวณที่ 2 นั้นเป็นการเริ่มต้นของความเครียดแข็งจากความเค้นสูงสุด (σ_p) คือความเค้นเท่ากับ 0 และบริเวณที่ 3 นั้นเป็นการเริ่มต้นของความเครียดแข็งจากความเค้นสูงสุดไปยังความเค้นที่สภาวะคงตัว (σ_{ss}) ซึ่งความเค้นของทั้งสองจุดมีค่าเท่ากับ 0 เท่ากัน อีกทั้งค่าของความเค้นได้มีการเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบเนื่องจากอัตราการอ่อนตัว [58]



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัว ($\theta=d\sigma/d\varepsilon$) กับความเครียด (σ) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียดที่ 0.1 ต่อวินาที ของวัสดุ MAB ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปรีด



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัวกับความเค้นจริง ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ของวัสดุ MAB ที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน

โดยตารางที่ 5.1-5.4 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่า ϵ_c (ความเครียดวิกฤต) ϵ_p (ความเครียดสูงสุด) σ_c (ความเค้นวิกฤต) σ_p (ความเค้นสูงสุด) ϵ_{ss} (ความเครียดที่สภาวะคงตัว) และ σ_{ss} (ความเค้นที่สภาวะคงตัว) ซึ่งหาได้โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัว (สมการที่ 2.23) เพื่อใช้ในการคำนวณหาสมการเชิงกลสำหรับทำนายช่วงกลไกความเครียดแข็งของบริเวณที่ 1 ในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ε_c	0.032	0.035	0.04	0.07
ε_p	0.261	0.1485	0.18	0.279
σ_c	12.33	6.15	4.98	3.40
σ_p	13.85	9.72	7.02	4.35
ε_{ss}	0.78	0.8	0.62	0.7
σ_{ss}	12.2	8.4	6.4	4.2

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ε_c	0.039	0.0396	0.0328	0.0324
ε_p	0.0261	0.315	0.014	0.0153
σ_c	23.25	13.49	10.72	7.83
σ_p	41.94	21.28	17.57	12.45
ε_{ss}	0.78	0.74	0.64	0.62
σ_{ss}	37	19	15.5	10

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ε_c	0.063	0.081	0.027	0.043
ε_p	0.38	0.45	0.20	0.23
σ_c	47.34	37.34	18.67	16.75
σ_p	65.46	51.88	28.82	24.25
ε_{ss}	0.78	0.74	0.64	0.62
σ_{ss}	64	50	25	21

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ε_c	0.011	0.00045	0.0221	0.0299
ε_p	0.1215	0.14	0.216	0.1665
σ_c	53.26	38.094	43.66	30.90
σ_p	109.56	82.95	59.22	48.20
ε_{ss}	0.6	0.7	0.6	0.56
σ_{ss}	90.49	76	54	44.5

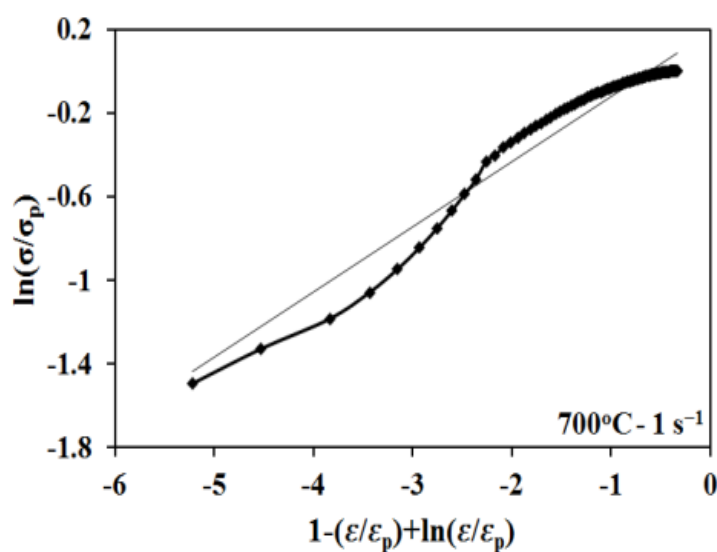
5.1.3 สมการซิงกาล่า (Cingara Equation)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงสามารถอธิบายบริเวณทั้งสองในรูปที่ 5.3 ได้ ดังนี้ บริเวณที่ 1 คือตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงความเค้นสูงสุดของการเสียรูปของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงจะอธิบายค่าความเครียดจนถึงค่าความเค้นสูงสุดโดยใช้สมการซิงกาล่า และบริเวณที่ 2 นั้นอธิบายการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ด้วยสมการอาลามี่แสดงดังต่อไปนี้ [59]

สำหรับการงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการซิงกาล่าในการพิจารณาค่าความเครียดแข็งและความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที พบว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ สามารถใช้สมการซิงกาล่าในการทำนายเส้นโค้งไหลของโลหะผสม MAB ได้ดังสมการที่ 2.16

C คือค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดสูงสุดของเส้นโค้งไหลที่แต่ละอุณหภูมิ และอัตราความเครียดจากการใช้ลอการิทึมธรรมชาติเขียนเป็นสมการที่ 2.17

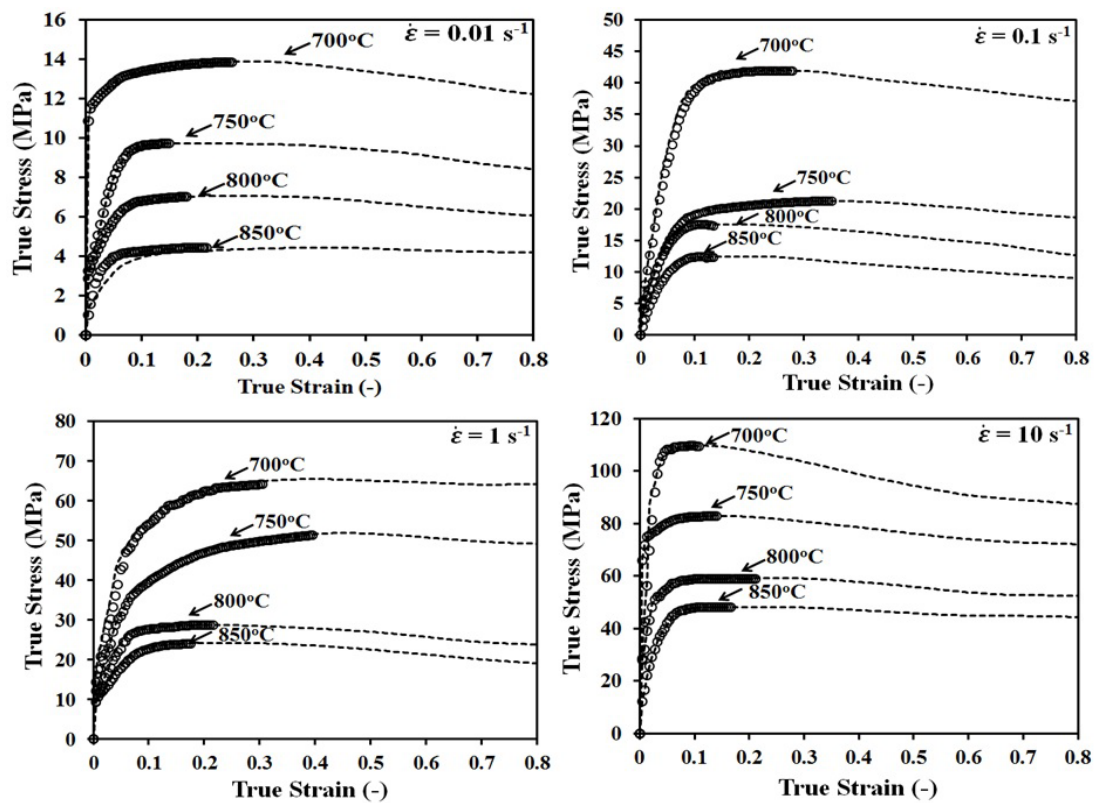
นำสมการที่ 2.17 ไปพล็อตกราฟรูปที่ 5.5 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการไหลของเส้นโค้งจนถึงความเค้นสูงสุดของการเสียรูปทำให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่ C ได้ดังตารางที่ 5.5 และค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ C นั้นมีค่าเท่ากับ 0.203



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที

ตารางที่ 5.5 ค่าคงที่ C ที่หาได้สำหรับสมการซิงก่าที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆ

Strain rate (s^{-1})	T = 700°C	T = 750°C	T = 800°C	T = 850°C
0.01	0.001	0.005	0.0004	0.0009
0.1	0.09	0.98	0.89	0.97
1	0.09	0.18	0.02	0.015
10	0.004	0.003	0.001	0.0005



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซิงก่าและผลการทดลอง ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซิงกาต้าและผลการทดลอง ซึ่งเป็นการคำนวณระหว่างความเค้นสูงสุดกับความเครียดสูงสุด และแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายในช่วงความเค้นเท่ากับ 0 จนถึงความเค้นสูงสุดเพราะหลังจากความเค้นสูงสุดความเค้นจะค่อยๆลดลงเนื่องมาจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับผลการทดลองจึงเหมาะกับการทำนายในช่วงความเครียดแข็งอีกด้วย

5.2 ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่

การสร้างแบบจำลองวัสดุสำหรับอธิบายการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของบริเวณที่ 2 ในรูปที่ 5.3 โดยใช้สมการอาลามี่ในสร้างแบบจำลองและใช้เพื่อหาจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ และเพื่อทำนายสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยอธิบายในเทอมของเส้นโค้งตัวเอส (S curves) ที่แสดงปริมาณการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา จลนศาสตร์ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (Kinetic of DRX) สามารถทำนายได้จากสมการที่ 2.18 [36]

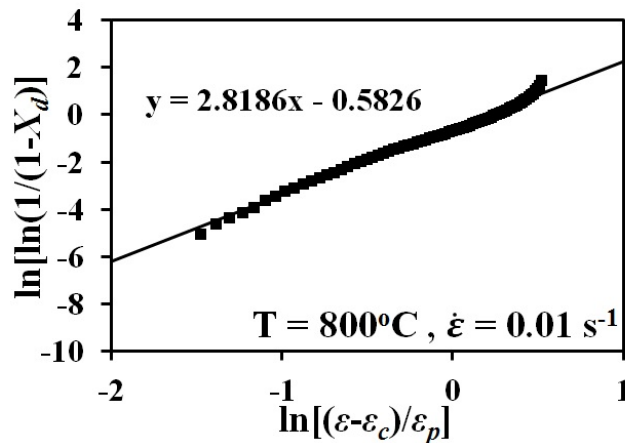
ในงานวิจัยนี้ผลของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะพิจารณาที่ความเค้นสูงสุดจากการสมมติฐานอย่างง่ายของสมการอาลามี่ในระดับที่สามารถยอมรับได้และสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) คำนวณจากสมการที่ 5.1 โดยเริ่มคำนวณจากค่าความเครียดสูงสุดซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จนถึงค่าความเครียดในสภาวะคงที่ (ϵ_{ss}) ซึ่งถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

$$X_d = \frac{\sigma_p - \sigma}{\sigma_p - \sigma_{ss}} \quad (5.1)$$

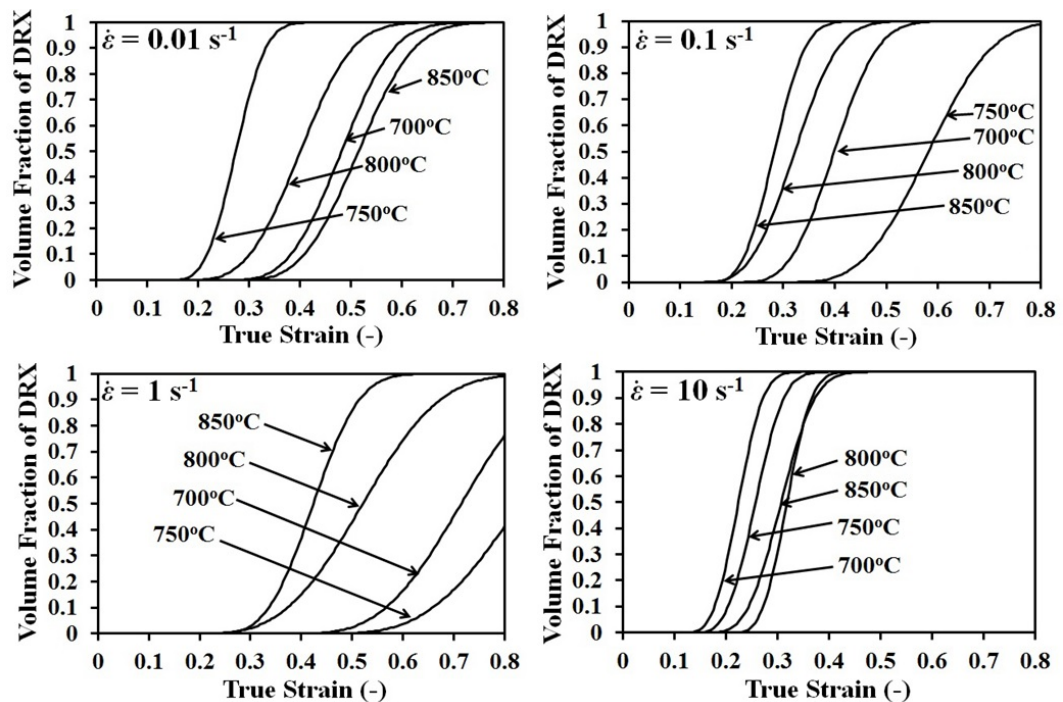
σ_p คือความเค้นสูงสุด σ_{ss} คือความเค้นสภาวะคงตัว และ σ คือความเค้นที่ความเครียดแตกต่างกัน กลไกการอ่อนตัวที่พิจารณาในสมการนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) ส่วนการคืนตัวแบบพลศาสตร์จะไม่ได้นำมาพิจารณาไปด้วย โดยรูปที่ 5.7 เป็นกราฟเส้นตรงที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \ln(1/(1-X_d))$ และ $\ln((\epsilon - \epsilon_p)/\epsilon_p)$ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที การหาค่า X_d ในสมการที่ 5.7 สามารถเขียนใหม่เป็นสมการที่ 2.19 ซึ่งเป็นลอการิทึมธรรมชาติ สำหรับใช้คำนวณค่าคงที่ของวัสดุคือ n และ k โดยอาศัยเงื่อนไขของการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

นำค่าของ k และ n ที่มีค่าเท่ากับ 1.17 และ 3.14 ตามลำดับ แทนค่าลงไปในสมการที่ 5.2 ทำให้สามารถหาจลนศาสตร์การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์สำหรับโลหะผสม MAB ได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 5.2 ดังนี้

$$X_d = 1 - \exp\left[(-1.17)\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^{3.14}\right] \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ของการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุ MAB



รูปที่ 5.8 สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

รูปที่ 5.8 แสดงกราฟเส้นโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม MAB ที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที จะสังเกตได้ว่าสัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดจริงเพิ่มสูงขึ้น ดังที่แสดงในกราฟเส้นโค้งรูปตัวเอส

สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิและอัตราความเครียดสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยอัตราความเครียดลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อ $X_d = 1$ ซึ่งหมายถึงกระบวนการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งเหล่านี้พบว่า สัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะลดลงเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนรูป โดยหมายถึงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ใช้เวลาในการเกิดนาน ดังนั้นภายใต้อัตราความเครียดสูงและอุณหภูมิต่ำของการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB มีแนวโน้มจะเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ “สัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีแนวโน้มน้อยกว่า 1”

สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) สามารถดูจากกราฟของรูปที่ 5.8 ได้ว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีความสมบูรณ์หรือไม่ และสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

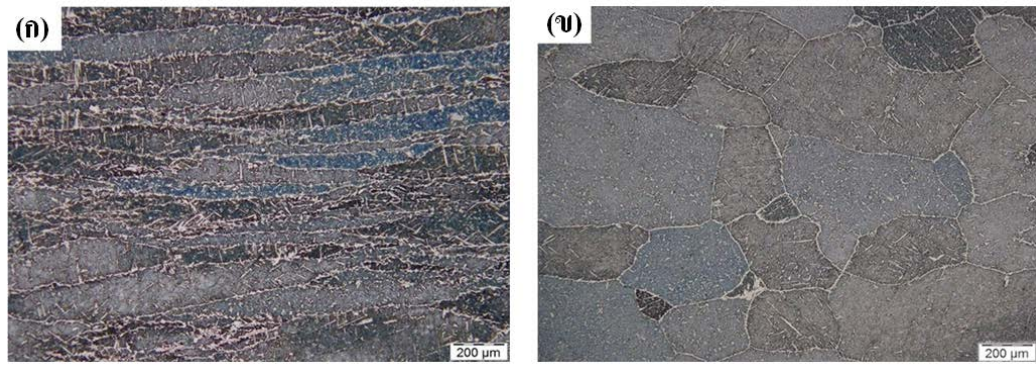
- 1) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิ 750, 800, 700 และ 850 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 %
- 2) ที่อัตราความเครียด 0.1 และ 1 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิตั้งแต่ 850, 800, 700 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 % และที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 700 และ 750 องศาเซลเซียส นั้นเป็นสองอุณหภูมิที่สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างไม่สมบูรณ์
- 3) ที่อัตราความเครียดที่ 10 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิตั้งแต่ 700, 750, 850 และ 800 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 %

5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ที่ทำนายได้ในรูปที่ 5.9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB แสดงรูปแบบและเกรนที่เป็นลักษณะโครงสร้างหลังการเสีรูปร่างของเกรนที่ประกอบไปด้วยการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยโครงสร้างจุลภาคของการคืนตัวแบบพลศาสตร์มักจะเกิดในลักษณะเกรนยาวตามแนวการกดขึ้นรูป และโครงสร้างจุลภาคของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มักจะเกิดในเกรนที่มีลักษณะกลมเล็ก

ในกรณีจากรูปที่ 5.8 เป็นการแสดงกราฟสัดส่วนปริมาตรเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ว่าเกิดแบบสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ สัดส่วนปริมาตรเกรนการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะลดลงและเกรนตั้งต้นที่ยังคงเห็นอยู่ในโครงสร้างจะเป็นการเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากกราฟสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีแนวโน้มน้อยกว่า 1 คือเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์หรือเกิดแบบไม่สมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคกับกราฟสัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีความสอดคล้องกัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากกราฟสัดส่วนปริมาตรแสดงว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ 100 เปอร์เซ็นต์หรือเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการทำนายกราฟความเค้น-ความเครียดและเมื่อเทียบกับภาพถ่ายทางโครงสร้างทางจุลภาคซึ่งจะมีลักษณะเป็นเกรนกลมมีขนาดเล็กอยู่ตามขอบเกรน และเป็นโครงสร้างของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จึงมีความสอดคล้องกับกราฟสัดส่วนปริมาตรที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากภาพถ่ายทางโครงสร้างการคืนตัวแบบพลศาสตร์จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคแสดงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5.9 (ก) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ 750 องศาเซลเซียส เกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์สังเกตได้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส รูปที่ 5.9 (ข) เป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous recrystallization (DDRX)) จะเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่และกระบวนการคืนสู่สภาพ (Restoration) ในช่วงอุณหภูมิสูงของโลหะผสม MAB ด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปสู่ความจริงที่ว่า การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงและความเครียดต่ำ



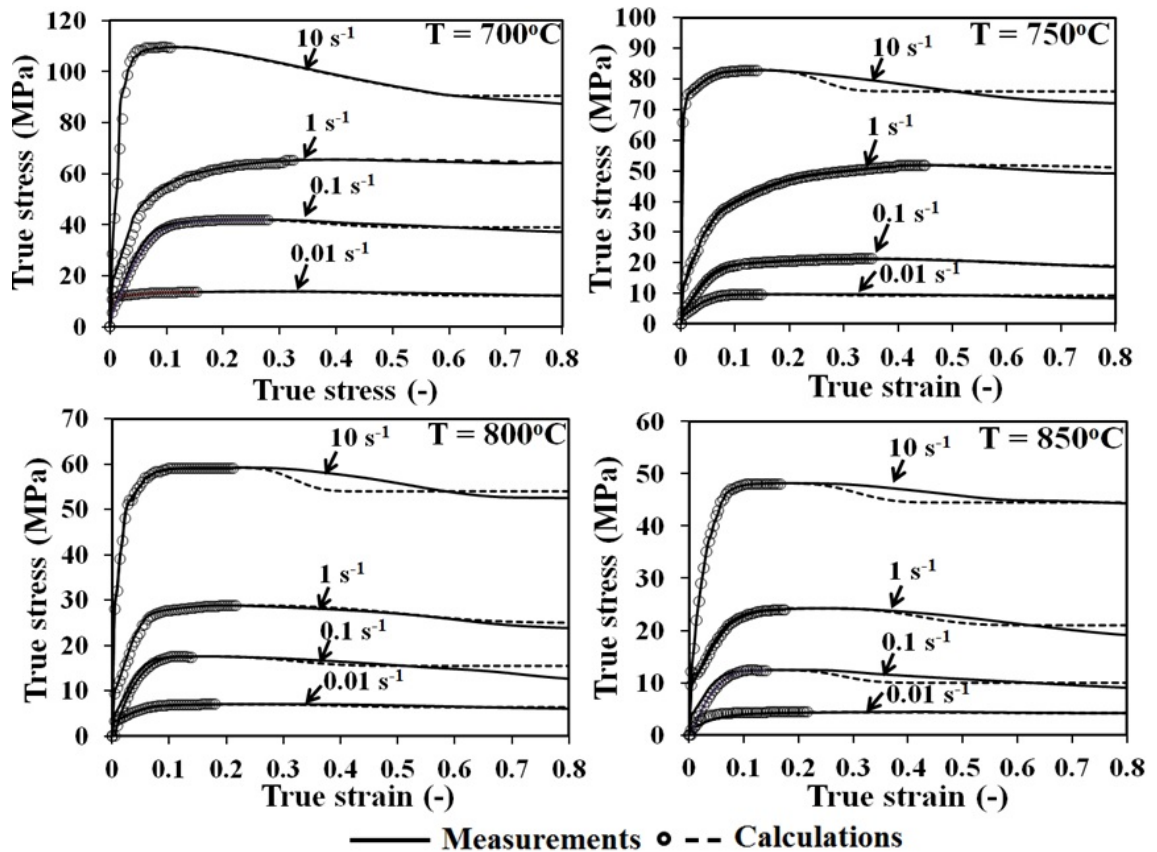
รูปที่ 5.9 โครงสร้างทางจุลภาคที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที (ก) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

5.4 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่

เนื่องจากแบบจำลองของการประมาณค่าความเค้นไหลแบบการคืนตัวแบบพลศาสตร์และสมการ kinetic equation เป็นพื้นฐานสำหรับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณเริ่มจากจุดความเค้นสูงสุดที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จนถึงความเค้นคงที่ทำให้มีขอบเขตของการคำนวณเฉพาะช่วงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ การใช้ค่าสูงสุดเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เนื่องจากว่าการคำนวณหาอัตราความชันของเส้นโค้งไหล เมื่อเลือกค่าความเค้นวิกฤตเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ทำให้ผลในการทำนายเส้นโค้งไหลไม่ตรงกับผลการทดสอบและมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการใช้ค่าคงที่ของโลหะผสม MAB ทั้งหมดมาจากการเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้เป็นค่าคงที่สำหรับการทำนายความแม่นยำของโลหะผสม MAB

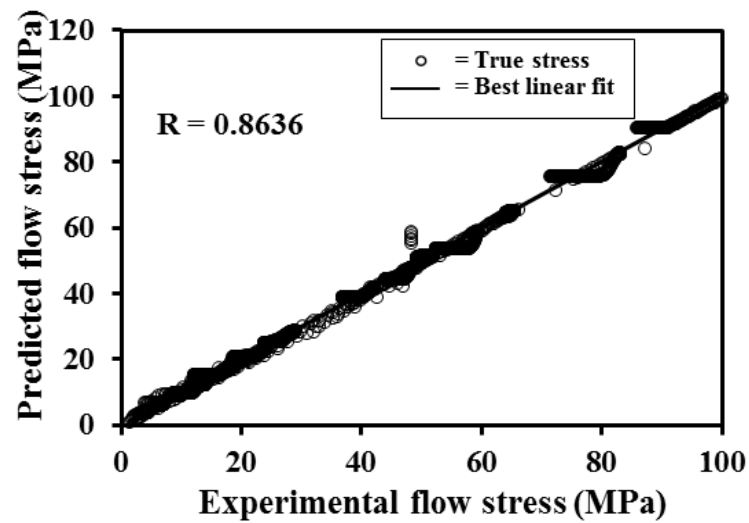
การเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เป็นการคำนวณที่จุดความเค้นสูงสุด จากการคำนวณข้างต้นทำให้สามารถเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับพฤติกรรมของเส้นโค้งไหลคือทำนายโดยใช้สมการซิงกาล่าคำนวณในช่วงแรกที่เกิดพฤติกรรมความเครียดแข็งจนถึงความเค้นสูงสุดร่วมกับสมการอาลามี่ในช่วงหลังจากความเค้นสูงสุดดังสมการที่ 5.3 ซึ่งมีความเหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และสมมติฐานนี้จะช่วยลดความยุ่งยากของสมการอาลามี่ที่สามารถยอมรับได้และความแม่นยำอีกด้วย

$$\sigma = \sigma_p - (\sigma_p - \sigma_{ss}) X_{DRX} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจากผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซิงกัล่าและสมการอาลามี่ ของชิ้นงานทดสอบ MAB ที่กดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายและผลการทดลองของสมการซิงกัล่าและสมการอาลามี่ ในรูปที่ 5.11 ค่าที่ทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดของการเสียรูปที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการทำนายและผลการทดลองที่ได้จากการหาค่า R และ AARE มีค่าเท่ากับ 0.8636 และ 13.04% ตามลำดับ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถให้การทำนายที่ดีของขีดความสามารถของ (ก) สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ในรูปที่ 4.8 (ข) สมการซิงกัล่าและสมการอาลามี่ในรูปที่ 5.11 ผลของการทำนายจะแสดงให้เห็นว่าสมการซิงกัล่าและสมการอาลามี่ของผลที่ได้จะเป็นที่ยอมรับในการพิจารณาโลหะผสม MAB



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายโดยสมการซึ่งกล่าวกับสมการอาลามี่

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางสถิติ (R) เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Titles	Authors	Materials	Model	Accuracy (%)
Modeling high-temperature tensile deformation behavior of AZ31B magnesium alloy considering strain effects	De-Hua Yu et al.	AZ31B magnesium alloy	Zener-Hollomon equation	0.9963
Flow behavior of Nickel Aluminium Bronze under hot deformation	Thossatheppita k et al.	Nickel Aluminum Bronze(NAB Alloy)	Zener-Hollomon equation	0.98
Constitutive equations for elevated temperature flow behavior of commercial purity aluminum	Rezaei et al.	Commercially pure aluminum (AA1070)	Zener-Hollomon equation	0.992
High temperature deformation behavior of Al-Cu-Mg alloys micro-alloyed with Sn	Banerjee et al.	- Alloy-A(Al-6.2% Cu-0.6% Mg alloy)	Zener-Hollomon equation	0.80
		- Alloy-B(Al-6.2%Cu-0.6% Mg alloy containing 0.06w% of Sn)		0.95
High-temperature flow behavior modeling of 2099 alloy considering strain effects	Zhang et al.	2099 alloy	Zener-Hollomon equation	0.998
Hot compression deformation characteristics of Mg-Mn alloy	Fang et al.	Mg-Mn alloy	Zener-Hollomon equation	0.979
The flow behavior modeling of cast A356 aluminum alloy at elevated temperatures considering the effect of strain	Haghdadi et al.	A356 Aluminum alloy	Zener-Hollomon equation	0.991
Prediction of flow stress for NO8028 alloy under hot working conditions	Wang et al.	NO8028 alloy	Avrami equation	0.998

ในกรณีของโลหะผสม MAB ที่มีส่วนผสมหลักคือ ทองแดง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะที่มีส่วนผสมของทองแดงที่ได้นำผลของเส้นโค้งไหลที่อุณหภูมิสูงโดยใช้สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาความเหมาะสมต่อวัสดุ สำหรับการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในตารางที่ 5.6 ผลการทดลองจากการทดสอบกดขึ้นรูปร้อนที่จะคำนวณจากสมการแบบจำลอง (Model equation) มี (ก) สมการชีเนอร์โฮโลมอนด์ (ข) สมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่ ดังนั้นผลกระทบที่มีต่อความแม่นยำของการทำนายเส้นโค้งไหล ควรจะนำมาพิจารณา เพื่อที่จะได้สมการที่เหมาะสมต่อวัสดุ และจะเห็นได้ว่าการทำนายของความเค้นไหลจากแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยว่าแบบจำลองไหนเหมาะสมต่อวัสดุ

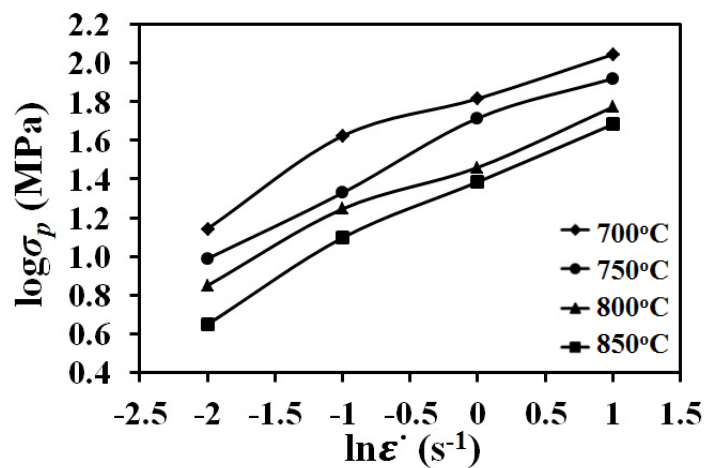
เพื่อเป็นที่ยืนยันและยอมรับสำหรับการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในสมการชีเนอร์โฮโลมอนด์ผลของการทำนายไม่เหมาะสมกับโลหะผสม MAB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำและอัตราความเครียดต่ำ พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณของสมการชีเนอร์โฮโลมอนด์ไม่เหมาะสมกับโลหะผสม MAB และการทำนายของเส้นโค้งไหลที่ใช้สมการซิงกาล่า (ถึงความเค้นสูงสุด) และสมการอาลามี่ (หลังความเค้นสูงสุด) สำหรับแบบจำลองนี้เป็นที่ยอมรับสำหรับผลการทดลองทุกๆบริเวณของการเสียรูป เพราะเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทำนายกับผลการทดลองมีความใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากมีความสัมพันธ์ของการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน ได้ใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมพัทธ์ (AARE) การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลองที่ดี ทำให้เพิ่มความเชื่อมั่นของค่าคงที่ของโลหะผสม MAB ที่คำนวณได้

5.5 ผลการทำนายเสถียรภาพการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB ในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน [60-64]

แบบจำลอง DMM ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปร้อน โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ อัตราความเครียดและความเครียด

สมบัติการขึ้นรูปของโลหะที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity, m) และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง งานที่ได้จากการขึ้นรูปแบบถาวรถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่อัตราการขึ้นรูปสูง ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการณ์อ่อนตัวของวัสดุขึ้น และทำให้เกิดข้อจำกัดในการขึ้นรูปวัสดุ แบบจำลอง DMM ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปร้อน โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง หลักการทั่วไปของแบบจำลอง DMM มีแนวคิดในเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ โดยอาศัยการรวมความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟ ความสามารถในการขึ้นรูปร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค DMM ภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity, m) และความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Temperature sensitivity, s) ดังแสดงในสมการที่ 5.4 ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดสามารถหาได้จากความชันของความเค้นเทียบกับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิคงที่ในกราฟ $\log \sigma_p$ - $\log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.12

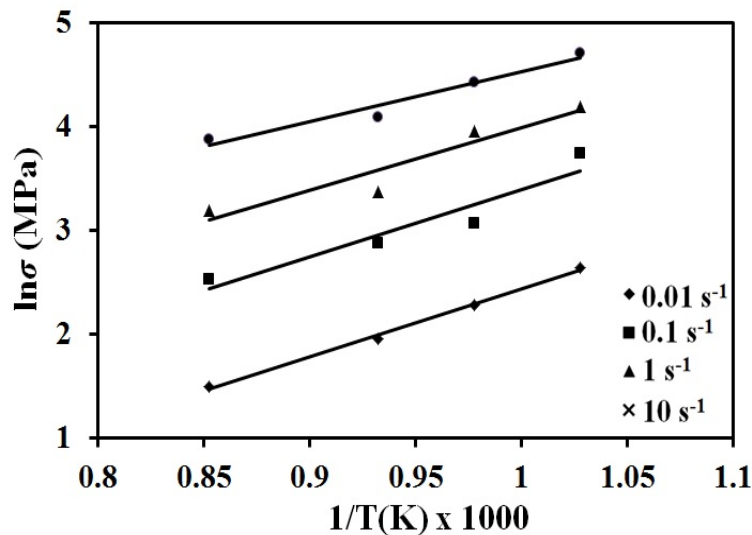
$$m = \left\{ \frac{\partial(\log \sigma_p)}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \right\}_T \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.12 กราฟระหว่าง $\log \sigma_p$ เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ สำหรับคำนวณหาค่า m

ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการ 5.5 ซึ่งหาจากความชันของกราฟระหว่าง $\ln \sigma_p$ เทียบกับ $1/T$ ในแต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.13

$$s = \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (5.5)$$



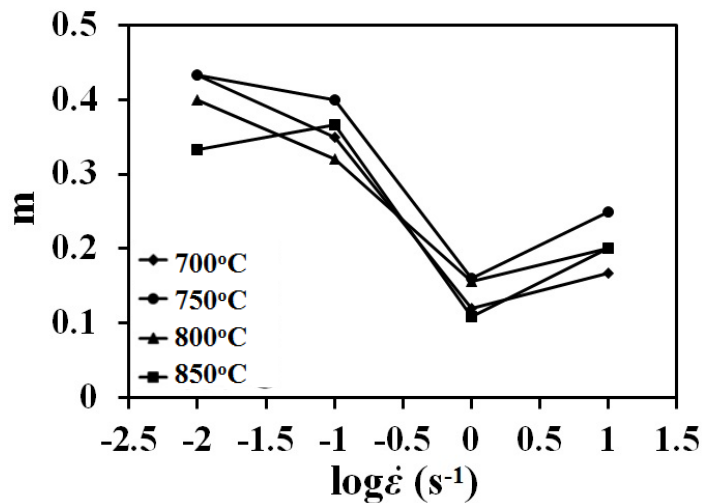
รูปที่ 5.13 กราฟระหว่าง $\log \sigma$ เทียบกับ $1/T$ สำหรับคำนวณค่า s

การพิจารณาเสถียรภาพของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุ นั้น จะพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิและอัตราความเครียด เมื่อมีการปลดปล่อยพลังงานเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยจะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาทั้งหมด 4 เกณฑ์ดังสมการ 2.26-2.29 โดยถ้าผลการทดสอบอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ แสดงว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุมีเสถียรภาพ

สมการที่ 2.26 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด โดยมีแนวคิดพื้นฐานที่ว่า วัสดุจะไม่ปลดปล่อยพลังงานเมื่อความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดมีค่าเท่ากับศูนย์หรือติดลบ ที่สภาวะดังกล่าวจะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักในระหว่างการขึ้นรูปร้อน ขณะที่ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สภาวะการเสียรูปเฉพาะจุด (Localised Deformation) ของวัสดุลดลง ส่งผลให้วัสดุสามารถยืดตัวได้มากขึ้นโดยไม่เกิดการคอด (Necking) ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดของวัสดุ MAB ที่หาได้ อยู่ในช่วง 0.1- 0.45 ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งอยู่ในขอบเขตของเกณฑ์ในสมการที่ 2.26 ทุกช่วงอุณหภูมิ

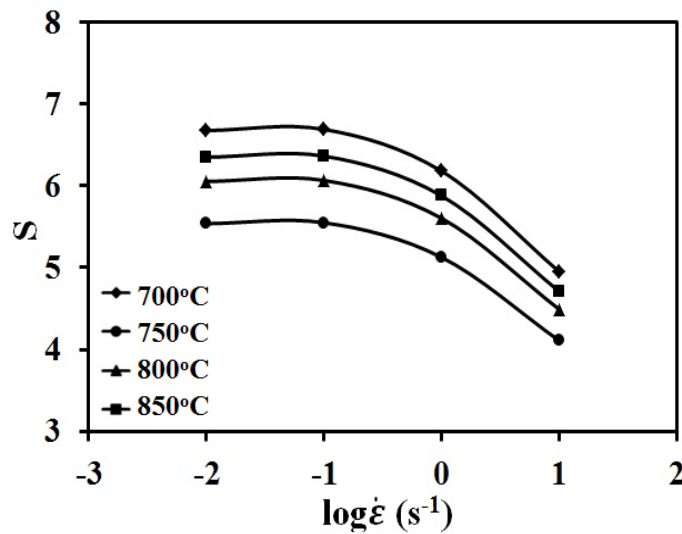
สมการที่ 2.27 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงสภาพความสม่ำเสมอของสนามความเค้นของชิ้นงานระหว่างการเปลี่ยนรูป ตลอดจนแนวโน้มที่อาจทำให้เกิดสภาวะความเครียดเฉพาะจุด (Strain localization) โดยจากสมการ 2.27 นี้ จะสามารถหาค่าได้จากความชันของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตรา

ความเครียดกับ $\log \dot{\epsilon}$ ในแต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (m) กับอัตราความเครียด ($\log \dot{\epsilon}$) ของโลหะผสม MAB ตามสมการที่ 2.27 มีค่าบวกที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และที่อัตราความเครียดระหว่าง $1.0 - 10 \text{ s}^{-1}$ ที่ทุกอุณหภูมิ การขึ้นรูปในช่วงดังกล่าว ไม่อยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพ เพื่อพิจารณาในเงื่อนไขอื่น คือ ที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ในอุณหภูมิ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส รวมทั้งที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.1-1.0 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดกับอัตราความเครียดมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงอยู่ในเกณฑ์เสถียรภาพ



รูปที่ 5.14 กราฟระหว่าง m เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ

สมการที่ 2.28 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงเสถียรภาพของการขึ้นรูปโดยจัดเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) โดยเทียบเกณฑ์ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราการเกิดเอนโทรปีสุทธิ (Net entropy production) ต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ต่ำ มีแนวโน้มเกิดพฤติกรรมการคืบตัวแบบพลศาสตร์ ในขณะที่ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่สูง จะแสดงพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เพื่อพิจารณาเกณฑ์เสถียรภาพที่จากความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ พบว่ามีค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 4-7 ซึ่งอยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพตามสมการที่ 2.28 สำหรับทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่ทดสอบ



รูปที่ 5.15 กราฟระหว่าง n เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ในแต่ละอุณหภูมิ

ในสมการที่ 2.29 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงเสถียรภาพของการขึ้นรูป โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอัตราเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราความเครียด โดยจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 จึงจะถือว่าการขึ้นรูปมีเสถียรภาพ ในทางกลับกันขณะที่อัตราความเครียดสูงขึ้นมีผลทำให้ระดับความร้อนอะเดียแบติก (Adiabatic heating) เพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงในขณะขึ้นรูปมีการคายความร้อนออกจากวัสดุทำให้ระบบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่คายออกมามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด หากการเปลี่ยนรูปวัสดุกระทำด้วยอัตราความเครียดที่สูง ส่งผลให้วัสดุคายความร้อนออกสู่ระบบไม่ทัน อุณหภูมิในระหว่างการเปลี่ยนรูปของวัสดุจึงสูง ทำให้อัตราเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราความเครียดมีค่าเป็นบวก เกิดสภาวะการเปลี่ยนรูปเฉพาะจุด (Flow localization) อันเนื่องมาจากความร้อนอะเดียแบติก สภาวะการนี้จะไม่เป็นไปตามเกณฑ์เสถียรภาพตามสมการที่ 2.29 แต่หากความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิมีน้อยกว่าอัตราความเครียดที่สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้เกิดความเครียดเฉพาะจุด (Strain localization) และการเกิดแถบเฉือนจากอะเดียแบติก (Adiabatic shear band) ที่ลดลง หมายถึงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุ MAB ยังคงมีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่ออัตราความเครียด จะพบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเป็นบวกที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ การขึ้นรูปในช่วงดังกล่าว ไม่อยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพในสมการที่ 2.29 ถ้าพิจารณาที่เงื่อนไขอื่น คือ ที่อัตราความเครียด

ระหว่าง $0.1-10 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่ออัตราความเครียดมีค่าเป็นลบ คือ อยู่ในเกณฑ์เสถียรภาพสำหรับสมการที่ 2.29

ตารางที่ 5.7 สรุปขอบเขตของแต่ละเกณฑ์เสถียรภาพในทุกช่วงอุณหภูมิและอัตราความเครียดในการวิเคราะห์เสถียรภาพการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB

Criteria	Strain rate	700°C	750°C	800°C	850°C
$0 < m < 1$	All	✓	✓	✓	✓
$\frac{\partial m}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0$	$0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$	✓	✗	✓	✓
	$0.1-1 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓
	$1-10 \text{ s}^{-1}$	✗	✗	✗	✗
$s > 1$	All	✓	✓	✓	✓
$\frac{\partial s}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0$	$0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$	✗	✗	✗	✗
	$0.1-1 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓
	$1-10 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓

✓ Satisfied ✗ Unsatisfied

สรุปได้ว่า การเปลี่ยนรูปแบบถาวรของโลหะผสม MAB ที่มีความเสถียรภาพสำหรับเงื่อนไขของกระบวนการในช่วงอัตราความเครียด $0.1-1$ ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส สำหรับการดำเนินงานต่อไปจะอาศัยบทสรุปจากการศึกษาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทดสอบไปสู่การปรับปรุงและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB