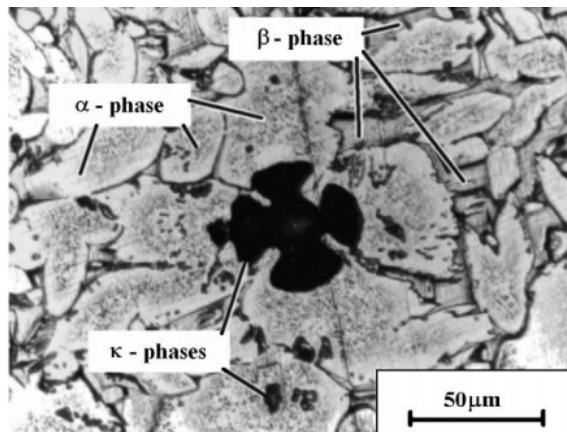


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ (MAB alloy)

แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์หรือโลหะผสม MAB เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการทำใบพัดเรือขนาดใหญ่ที่ใช้ในน้ำทะเล โลหะผสม MAB มีส่วนประกอบของธาตุทองแดง (Cu) อะลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) เป็นหลัก และมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ เพิ่มเติมอีกเล็กน้อย เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ซิลิคอน (Si) และ ตะกั่ว (Pb) โลหะผสม MAB มีสมบัติที่เด่นคือมีความแข็งแรงสูงและความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โลหะผสม MAB โดยทั่วไปจะผ่านการผลิตด้วยกระบวนการหล่อหรือทุบขึ้นรูป โลหะผสม MAB มีโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วย เฟสอัลฟา (α) เฟสเบต้า (β) และเฟสแคปป่า (κ) แสดงดังรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม MAB

เฟสอัลฟา (α) มีโครงสร้างแบบ Face Centered Cubic (FCC) และประกอบไปด้วยธาตุทองแดง (Cu) ที่มีสถานะเป็นสารละลายของแข็ง (Cu-rich solid solution) โดยจะเห็นเป็นบริเวณพื้นสีขาว ในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคส่วน เฟสเบต้า (β) มีโครงสร้างแบบ Body Centered Cubic (BCC) โดยที่เฟส β จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบสูญเสียธาตุผสม (Dealloying) คือการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียม (Al) จากโลหะผสมหรือที่เรียกว่า Dealuminifization เนื่องจากเฟส β มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าเฟสต่างๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เฟส β มีความไวต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อนมากกว่า และเฟสแคปป่า

(K) มีส่วนประกอบของธาตุหลักคือ ธาตุแมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ที่สูงและมักจะกระจายตัวอยู่ในเฟส α

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆของโลหะผสม MAB เกรด C95800 ซึ่งเป็นเกรดที่ทางกรมอุทหากรเรือใช้เป็นมาตรฐานในการทำวัสดุทางเรือ [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของโลหะผสม MAB

สมบัติทางกล	MAB (C95800)
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	655 MPa
ความต้านทานแรงดึงที่จุดคลาก (Yield Strength)	311 MPa
ความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness)	3000 kg load
ความยาวที่เปลี่ยนแปลงใน 50 มิลลิเมตร (ระยะ gage length in 50 mm)	26 %
ความหนาแน่น (Density)	$7.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
อุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นของเหลว (Liquidus Temperature)	990°C
อุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นของแข็ง (Solidus Temperature)	950°C

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงตัวอย่างการใช้งานทั่วไปของวัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีวัสดุทองแดงที่มีธาตุผสมหลักเป็น Al bronze (Copper-base alloy) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีหลากหลายเกรด (Grade) ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุเจือปน

2.1.1 ตัวอย่างการใช้งานโลหะผสม MAB เกรดต่างๆ

โลหะผสมประเภทอะลูมิเนียมบรอนซ์มีส่วนผสมทางเคมีที่ประกอบไปด้วยทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นหลัก ซึ่งจะมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรง ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการหล่อขึ้นรูป โดยการใช้งานโลหะผสม MAB แต่ละประเภทจะต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ และได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ [3]

รูปที่ 2.2 แสดงชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์เกรด C95800 ที่ผ่านการผลิตทำด้วยการหล่อขึ้นรูปใช้สำหรับรับแรงดันสูงในระบบการขับเคลื่อนใต้ทะเล โลหะผสม C95800 เป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับรับความเค้นวิกฤต และสามารถทนต่อการกัดกร่อนในน้ำทะเลได้ดี



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800

รูปที่ 2.3 แสดงคลัทช์ (Clutch) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของก้านเรือ (Shipboard winch) ทำด้วยวัสดุ निकเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์เกรด C95400 ซึ่งเป็นวัสดุ MAB เกรดที่เหมาะสมในการผลิตโดยใช้การหล่อแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในการยืดอายุขององค์ประกอบของคลัทช์ได้ถึง 20 เท่าและได้รูปร่างหลังการหล่อที่เที่ยงตรงลดค่าใช้จ่ายการกลึงหลังการหล่อได้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95400

รูปที่ 2.4 แสดงซีลของเพลาใบพัดแบบหล่อ (Propeller shaft seal) ที่นำโลหะผสม निकเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เกรด C95800 มาประยุกต์ใช้เพื่อต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเล คุณสมบัติอื่นๆที่น่าสนใจคือไม่นำไฟฟ้าและแม่เหล็ก ต้านทานการขูดขีดได้ดี



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800

เมื่อทราบถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม MAB แล้วต่อไปจะกล่าวถึงกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรมโดย ในงานนี้จะพูดถึง กระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบก้อน (Hot bulk forming process) ที่อุณหภูมิสูงเป็นหลัก เนื่องจากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงดีภายหลังจากการขึ้นรูปและสามารถนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุ MAB ได้

2.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุก้อนที่อุณหภูมิสูง (Hot bulk forming process)

การขึ้นรูปวัสดุก้อน (Bulk metal forming) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ (Three-Dimension) โดยชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) ภายใต้แรงกระทำของแม่พิมพ์ ลักษณะชิ้นงานก่อนการขึ้นรูปอาจมีลักษณะเป็นแท่งกลม แท่งสี่เหลี่ยม หรือโลหะแผ่นหนา สามารถขึ้นรูปได้ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ (Cold working) หรือที่อุณหภูมิสูงปานกลาง (Warming working) และที่อุณหภูมิสูง (Hot working) ซึ่งในงานนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการขึ้นรูปหรือการทุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) เป็นหลัก ในกระบวนการผลิตที่ใช้วิธีการทุบขึ้นร้อนจะสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว กำลังการผลิตสูง อีกทั้งกระบวนการผลิตแบบทุบขึ้นร้อนนี้ยังช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตได้อีกด้วย ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปแล้วจะนำมาผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติตามที่ต้องการ [4]

2.2.1 ประเภทการชุบขึ้นรูปแบ่งตามอุณหภูมิการขึ้นรูป

การชุบขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานก่อนภายในแม่พิมพ์ด้วยแรงอัดจากเครื่องอัด (Press) หรือค้อนตี (Hammer) การชุบขึ้นรูปวัสดุในสมัยแรกๆ ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ อวูร์ที่ใช้ในการต่อสู้ เหยียด และเครื่องใช้ต่างๆ โดยใช้ค้อนตีขึ้นรูป

การชุบขึ้นรูปสามารถแบ่งประเภทตามอุณหภูมิการขึ้นรูปได้ 3 รูปแบบดังนี้

1. **การชุบขึ้นรูปเย็น** เป็นการชุบขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature) เหมาะสำหรับการชุบขึ้นรูปวัสดุที่มีความเหนียวสูง เนื่องจากต้องใช้แรงในการชุบขึ้นรูปที่สูง ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปเย็นคือ ได้ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดี สภาพการทำงานปลอดภัยและสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ง่าย
2. **การชุบขึ้นรูปอุ่น** การชุบขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิระหว่างการชุบขึ้นรูปเย็นและการชุบขึ้นรูปร้อน เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปอุ่นคือ สามารถลดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานหลังการขึ้นรูปได้และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนและใช้แรงในการตีขึ้นรูปที่ต่ำ
3. **การชุบขึ้นรูปร้อน** เป็นการตีขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ของวัสดุ เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรง และต้องการขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อน ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปร้อนคือ ใช้แรงในการตีขึ้นรูปที่ต่ำ ไม่มีความเค้นตกค้างในชิ้นงานหลังขึ้นรูปและสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ แต่มีข้อเสียเรื่องคุณภาพผิวชิ้นงานที่ไม่ดีและควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ยาก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านผลิตด้วยการชุบขึ้นรูปวัสดุ เช่น เกียร์ (Gears) เหล็กหมุด (Rivets) เพลากังหัน (Shafts for turbines) เครื่องมือต่างๆ (Hand tools) และชิ้นส่วน โครงสร้างเครื่องจักรกล

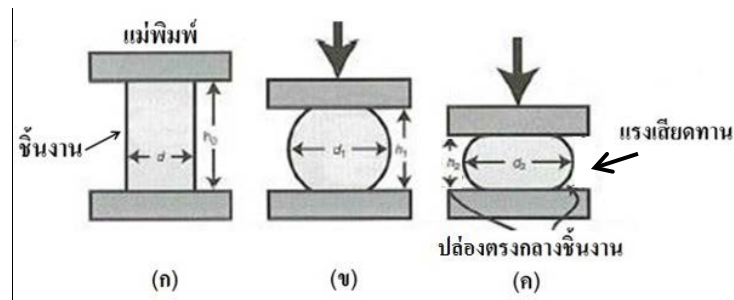


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการผลิตด้วยการทุบขึ้นรูปร้อน [5]

2.2.2 ประเภทการทุบขึ้นรูปแบ่งตามลักษณะของแม่พิมพ์

การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์เปิด (open-die forging)

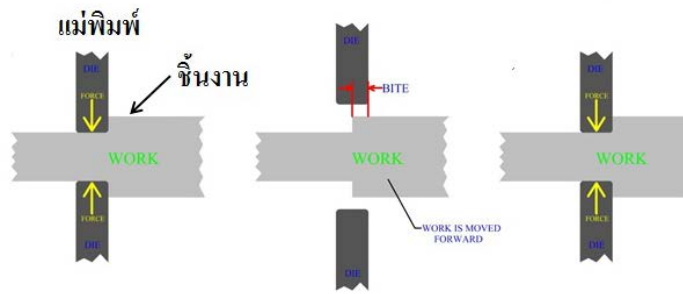
การทุบขึ้นรูปวัสดุแบบแม่พิมพ์เปิดเป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปวัสดุอย่างง่าย โดยทั่วไปแม่พิมพ์แบบเปิดจะมีน้ำหนักชิ้นงานอยู่ระหว่าง 15-500 กิโลกรัม หลักการตีขึ้นรูปแบบนี้คือ การนำชิ้นงานมาวางลงระหว่างแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทุบขึ้นรูปลดความสูงของชิ้นงานด้วยแรงอัด หรืออาจเรียกกรรมวิธีนี้ว่าการทุบขึ้นรูปแบบอัด (Upsetting) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด [6]

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าเกิดการป่องตรงกลางชิ้นงานหรือเรียกว่า Barreling ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ สามารถลดปัญหานี้ได้โดยการใช้สารหล่อลื่น Barreling อาจเกิดขึ้นได้เมื่อขึ้นรูปร้อนในระหว่างที่แม่พิมพ์เย็นตัวลงแล้ว เป็นเหตุให้ผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการต้านทานการเสียรูปหรือต้องใช้แรงสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ส่วนอื่นๆยังคงร้อนอยู่ ทำให้จุดตรงกลางของชิ้นงานยังคงเกิดการเสียรูปได้มากอยู่ สาเหตุนี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขณะทุบขึ้นรูป

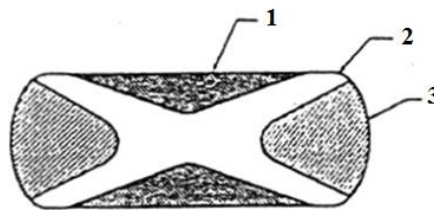
การทุบขึ้นรูปวัสดุเพื่อลดความหนาชิ้นงานเรียกว่า Cogging หรือ Drawing out เป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปวัสดุหลายๆครั้งต่อเนื่องกันด้วยแม่พิมพ์แบบเปิด ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 กรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อน [7]

การตีขึ้นรูป (upsetting)

ประเภทของการตีขึ้นรูปแบบตีขึ้นรูป (Upsetting) ในรูปแบบของการตีขึ้นรูปงานก้อน (Bulk forging) ในลักษณะการตีขึ้นรูปแบบงานเย็น (Cold forging) โดยใช้ประเภทลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบเปิด (Open-Die forging) จะทำการทดลองจริงด้วยการกดขึ้นงาน หรือที่เรียกว่าการตีขึ้นรูป ซึ่งในอุตสาหกรรมการตีขึ้นรูป เป็นอุตสาหกรรมที่มีผลิตภัณฑ์อยู่มากมาย และในกระบวนการผลิตก็จะมีปัญหาการแตกหักของขึ้นงานเกิดขึ้นมากมาย ในระหว่างการกดขึ้นงานในการตีขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขึ้นงานตามบริเวณต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 บริเวณต่างๆของการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการตีขึ้นรูป [8]

บริเวณที่ 1

คือผิวบนและล่างของขึ้นทศสอบที่สัมผัสกับแม่พิมพ์กด เรียกบริเวณนี้ว่า Dead Metal Zone (DMZ)

บริเวณที่ 2

คือบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุดโดยจะมีบริเวณแถบรอยเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกของ Dead Metal Zone ใกล้ผิวสัมผัส (Contact surface)

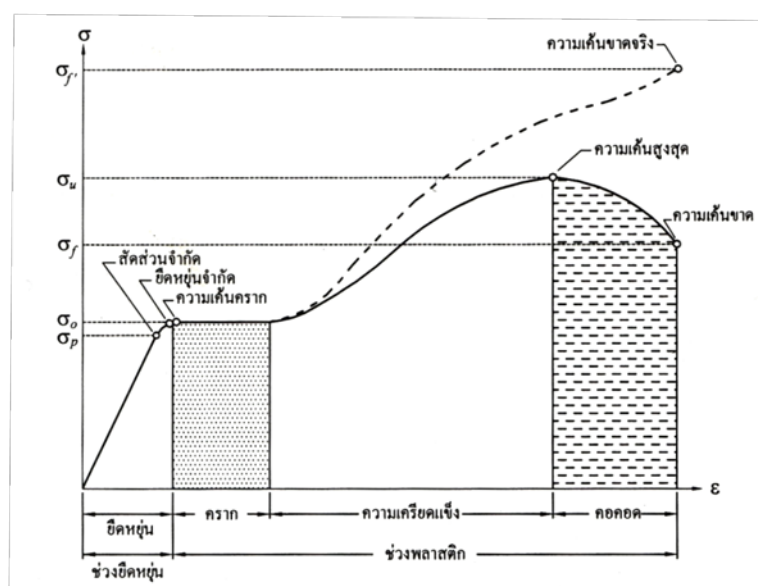
บริเวณที่ 3

คือส่วนนอกของขึ้นทศสอบ อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของการเปลี่ยนรูปเนื่องมาจากการกด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นบริเวณการเกิดการป่องที่ผิว (Bulge surface) ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน

ในการศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการชุบขึ้นรูปก่อน เป็นสิ่งสำคัญและเป็นคำตอบให้กับความเหมาะสมของวัสดุ แต่การได้มาซึ่งสมบัติทางกลต้องมีความเข้าใจในกระบวนการขึ้นรูป และในหัวข้อนี้จะต้องทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างการเปลี่ยนรูปรีด รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเพื่ออธิบายการเปลี่ยนรูปของวัสดุในช่วงต่างๆ

2.3 พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ

การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB จะเกี่ยวข้องกับความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม MAB เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นและความเครียด ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในกรณีที่เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวออกโดยสามารถแบ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปออกได้เป็น 2 ช่วง คือ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ในรูปที่ 2.9 มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ ความเค้นและความเครียดวิศวกรรม (Engineering stress-strain) และ ความเค้นและความเครียดจริง (True stress-strain curve) สำหรับในงานขึ้นรูปโลหะจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงในการนิยามสมบัติวัสดุ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบแรงดึง (Tension test) หรือการทดสอบการกด (Compression test)



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) [4]

การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นคือ ความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปแบบคืนรูปอย่างสมบูรณ์โดยไม่ปรากฏการเปลี่ยนรูปแบบถาวรเมื่อนำแรงที่กระทำออก เป็นการเปลี่ยนรูปเมื่อให้แรงกระทำต่อวัตถุ น้อย และแรงนั้น ไม่มากพอที่จะทำให้โลหะยืดตัวออกจนเกินกว่าจุดครากตัว (Yield point) ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นแบบนี้จะเกิดเพียงชั่วคราว เมื่อปล่อยแรงที่กระทำกับวัตถุ วัสดุนั้นก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมก่อนให้แรง ดังนั้นจึงเรียกการเปลี่ยนรูปนี้ว่าการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก

มอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

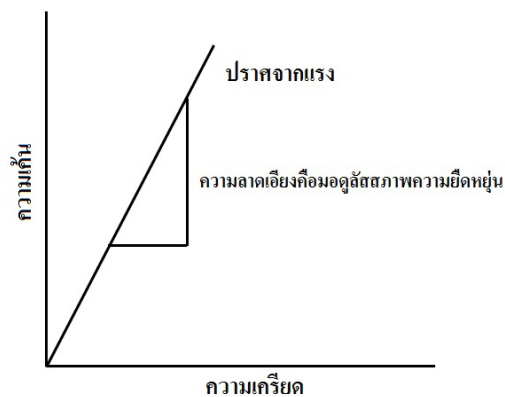
มอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น คืออัตราส่วนของความเค้นกับความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ตามกฎของฮุค (Hooke's Law)

อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นถึงจนกระทั่งจุดหนึ่งจากนั้นก็จะเป็นเปลี่ยนเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (วัสดุจะเริ่มเข้าสู่การเปลี่ยนรูปแบบถาวรและเสียหาย) วัสดุที่เป็นโลหะจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียดในช่วงอีลาสติกเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งดังรูปที่ 2.10 โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่ามอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่นนี้ไม่เท่ากัน แสดงดังสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือมอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) σ คือความเค้น (Stress) และ ε คือความเครียด (Strain)

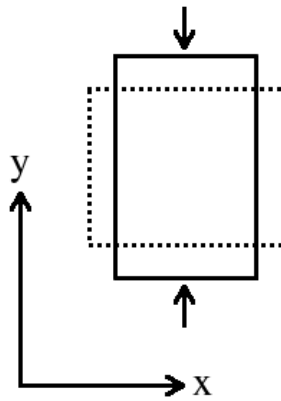
สำหรับวัสดุ Maximum elastic deformation มักจะมีน้อยกว่า 0.5% โดยทั่วไปโลหะและโลหะผสมจะแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงระหว่างความเค้น-ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น



รูปที่ 2.10 การหาค่ามอดูลัสสภาพความยืดหยุ่น

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

เมื่อตัวอย่างวัสดุถูกดึงในทิศหนึ่งวัสดุในอีกสองทิศจะมีขนาดลดลง อัตราส่วนปัวซอง (ν) ซึ่งเป็นชื่อหลังของนายซีเมียง ปัวซอง เป็นค่าที่ระบุจากการลดขนาดลงนี้ อัตราส่วนปัวซองเป็นอัตราส่วนการหดตัวสัมพัทธ์ คือ ความเครียดตามขวาง (ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ)หารด้วยความเครียดที่ขยายออกสัมพัทธ์ (ในทิศเดียวกับแรงที่กระทำ) สำหรับวัสดุแบบ Perfectly Incompressible อัตราส่วนของปัวซองจะมีค่าเท่ากับ 0.5 พอดี ส่วนวัสดุทางวิศวกรรมในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะมีค่า ν อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5 จะมีค่าใกล้ 0 ส่วนเหล็กส่วนใหญ่จะมีค่า ν อยู่ที่ประมาณ 0.3 และยางมีค่าเกือบ 0.5 ในบางวัสดุ เช่น โฟมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ จะมีค่าอัตราส่วนปัวซองเป็นลบ เมื่อวัสดุเหล่านี้ถูกดึงในทิศหนึ่ง วัสดุจะขยายขนาดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากด้วย ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะการหาอัตราส่วนปัวซอง [10]

อัตราส่วนพอยส์สัน คืออัตราส่วนความเครียดตามขวาง หรือด้านข้าง ต่อความเครียดตามแนวแรง อัตราส่วนพอยส์สันที่ได้จะเป็นค่าติดลบ ทั้งนี้เนื่องจากว่า ความเครียดด้านข้าง และความเครียดตามแนวแกนมีผลตรงกันข้ามกัน ดังสมการนี้

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.2)$$

เมื่อ ν_{xy} คือค่าอัตราส่วนของปัวซอง ϵ_x คือความเครียดตามขวาง และ ϵ_y คือความเครียดตามแกนของแรง xy

การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation)

ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่เลยช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก วัสดุจะไม่สามารถคืนรูปเดิมได้เมื่อปล่อยแรงกระทำออก

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain)

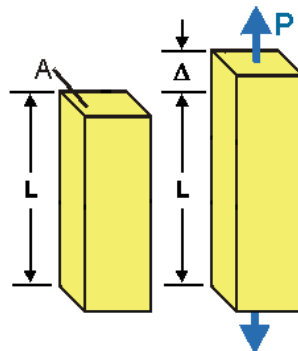
ความเค้น (Stress)

การเปลี่ยนรูปของวัสดุเกิดขึ้นจากการให้แรงของแม่พิมพ์ต่อชิ้นงาน ทำให้ภายในชิ้นงาน เกิดความเค้น (State of stresses) ขึ้น ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบคือ ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress; σ) และความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress; τ)

ความเค้นหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ความเค้นแรงดึง (Tensile stress; σ) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางหรือคือแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใช้สัญลักษณ์ว่า σ (sigma) ดังสมการที่ 2.3

รูปที่ 2.12 เมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงภายนอกที่มากระทำบนวัตถุจะต้องมีแรงภายในด้าน ขนาดรวมแล้วเท่ากับแรงภายนอกของวัตถุที่ถูกกระทำ



รูปที่ 2.12 ลักษณะความเค้นแรงดึง[11]

$$\sigma = \frac{F_t}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือความเค้นแรงดึง (N/m^2)

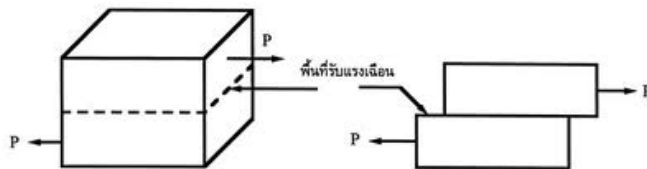
F_t คือแรงกระทำต่อวัสดุ (N)

A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของวัสดุ (m^2)

ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress; τ) ใช้สัญลักษณ์ τ เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อ วัตถุนั้นโดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น ดังรูปที่ 2.13 จากสมการที่ 2.4 ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A_0 ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

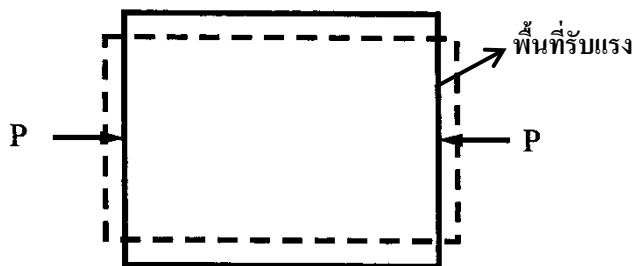
$$\tau = \frac{F_S}{A_0} \tag{2.4}$$

- เมื่อ τ คือความเค้นแรงเฉือน (N/m^2)
- F_S คือแรงกระทำต่อวัสดุ (N)
- A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของวัสดุ (m^2)



รูปที่ 2.13 ลักษณะความเค้นแรงเฉือน [12]

ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่ออัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะความเค้นแรงอัด

ความเครียด (Strain)

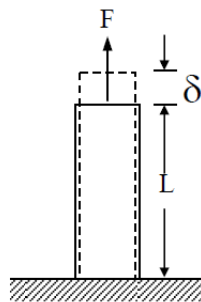
เมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นกับชิ้นงาน ความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุเป็นการขยายตาม ซึ่งลักษณะของความเครียดสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเสียรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงกลับสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ ยางยืด สปริง ถ้าดึงวัสดุแล้วปล่อยวัสดุก็จะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเสียรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามเดิมไว้ได้ โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับสู่ตำแหน่งเดิม

ความเครียดแรงดึง (Tensile strain; ϵ) คือเมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกนและเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างช้า ๆ ท่อนวัสดุนี้ก็จะเกิดการยืดออกทีละน้อยตามขนาดของแรง ดึงที่เพิ่มขึ้นของแรง ทำให้ท่อนวัสดุยืดออกเท่ากับ Δl ดังรูปที่ 2.15 ขณะที่ท่อนวัสดุยืด ออกก็จะเกิดการหดตามแนวตั้งของท่อนวัสดุนั้น ดังสมการ

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2.5}$$

- เมื่อ ϵ คือความเครียดแรงดึง (-)
- l_0 คือความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (mm)
- l_i คือความยาวสุดท้ายของวัสดุ (mm)
- Δl คือความยาวที่เปลี่ยนของวัสดุไป (mm)



รูปที่ 2.15 ลักษณะความเครียดแรงดึง [13]

ความเครียดแรงเฉือน (Shear Strain; γ) เมื่อมีแรงเฉือนกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดขึ้นมา ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ความเครียดเฉือน ดังสมการ

$$\gamma = \frac{\delta}{L}$$

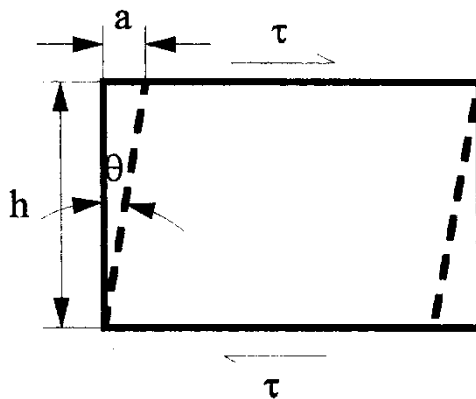
$$\text{แต่ } \tan \theta = \frac{\delta}{L}$$

$$\gamma = \tan \theta \tag{2.6}$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่เฉไป แต่มุม θ นี้จะเล็กมาก ดังนั้น $\tan \theta \approx \theta$
 ดังนั้นความเครียดแรงเฉือนจึงเป็นการวัดมุมที่เฉไป มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad)

เมื่อ γ คือความเครียดเฉือน

θ คือมุมการเฉือน



รูปที่ 2.16 ลักษณะความเครียดแรงเฉือน [14]

2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง (True Stress-Strain)

ความเค้นจริง (True stress) เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดขณะรับแรงกระทำขณะนั้น ดังเขียนเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i} \tag{2.7}$$

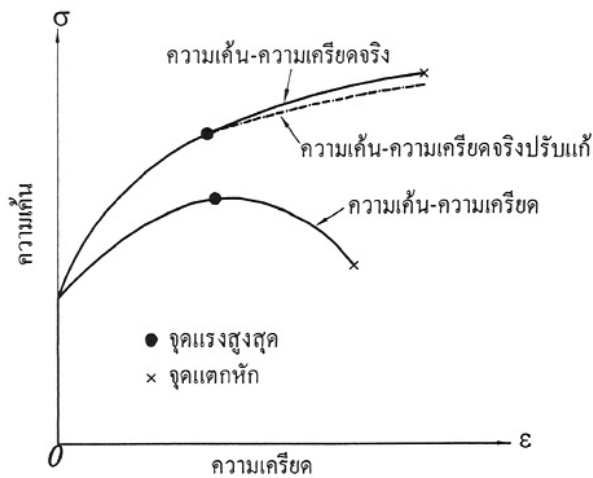
ความเครียดจริง (True strain) เป็นผลรวมของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวต่อความยาวเดิม โดยรวมตั้งแต่ความเครียดของวัสดุก่อนรับแรงจนถึงความเครียดขณะทดสอบ ดังสมการ

$$\epsilon_t = \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_o} \tag{2.8}$$

ซึ่งค่า l_o เป็นความยาวของ gauge ตอนเริ่มต้น และ l_i เป็นความยาวของ gauge ขณะที่กำลังทดสอบ และถ้าเราสมมุติว่าปริมาตรของช่วง gauge มีค่าคงที่แล้วจะได้ความสัมพันธ์ว่า $l_o A_o = l_i A_i$ หรือ

$$\frac{l_i}{l_o} = \frac{A_o}{A_i} = \epsilon_t = \ln \frac{l_i}{l_o} = \ln \frac{A_o}{A_i} \tag{2.9}$$

จากรูปที่ 2.17 จะแสดงการเปรียบเทียบของกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของวัสดุจะเห็นถึงความแตกต่างระหว่างกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด จะเห็นว่าเมื่อเลขจุดที่ขึ้นทดสอบได้รับแรงสูงสุด กราฟความเค้น-ความเครียดจะมีความชันเป็นลบ ส่วนความเค้นจริง-ความเครียดจริง มีค่าความชันเป็นบวก และมีแนวโน้มจะเป็นเส้นตรงในขณะที่ความเครียดมีค่ามากขึ้น เกณฑ์การคราก (Yield criterion) เป็นเกณฑ์ที่ใช้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุจากสภาพยืดหยุ่นไปเป็นสภาพพลาสติก ทฤษฎีที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะผสม MAB



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดกับความเค้น-ความเครียดจริง [15]

กราฟสามารถแบ่งพฤติกรรมของวัสดุออกได้เป็น 4 ช่วงคือ

ช่วงยืดหยุ่น (Elastic)

ในช่วงนี้วัสดุที่ใช้ทดสอบจะตอบสนองต่อ แรงกระทำ แบบยืดหยุ่น (Elastic) หรือคือเมื่อนำแรงที่กระทำออกจากชิ้นงานทดสอบแล้ววัสดุจะคืนตัวกลับไปสู่รูปร่าง และความยาวเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงนี้แรงกระทำ (Stress) จะแปรผันโดยตรงกับความเครียด (Strain) จนถึงค่าของแรงกระทำค่าหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า Proportional limit หรือ σ_{pl} และเมื่อค่าแรงกระทำมีค่ามากกว่าค่าของ σ_{pl} แล้ววัสดุนั้นจะยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น อยู่โดยที่จุดสุดท้าย ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น นี้คือจุด Elastic limit

ช่วงคลาก (Yielding)

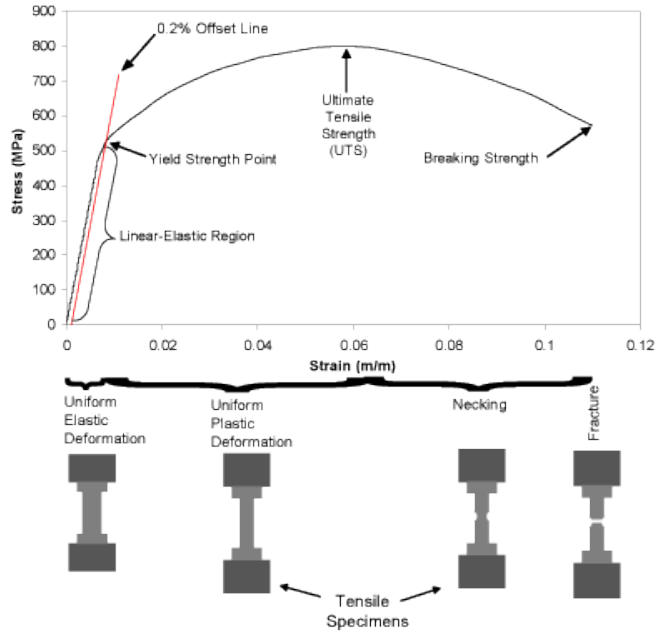
ช่วงคลากจะเริ่มเมื่อค่าของแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับค่า Yielding stress (σ_y) หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้วชิ้นงานทดสอบจะเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้แรงกระทำต่อวัสดุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุแบบนี้เรียกว่าพฤติกรรมแบบ Perfectly plastic

ช่วงความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

เมื่อเลยจุดการคลากของวัสดุชิ้นงานทดสอบจะมีความสามารถในการต้านทานแรงเพิ่มขึ้น อีกครั้งหนึ่ง สามารถสังเกตได้จากการที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเริ่มที่มีความชันเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.18 แต่ความชันของเส้นโค้งนี้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่าของแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น และสุดท้ายความชันของเส้นโค้งนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดค่าความเค้น Ultimate Stress หรือ σ_u ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่มีค่าสูงสุด ซึ่งมักจะเรียกพฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้ว่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ช่วงคอคอด (Necking)

หลังจากที่ค่าของแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ σ_u แล้ว พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบในบริเวณ Gauge length จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกกันว่าการเกิด Necking ดังรูปที่ 2.18 ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดมีค่าลดลงตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหักขึ้น ค่าของความเค้นของวัสดุที่จุดนี้จะเรียกว่าค่า fracture stress (σ_f)



รูปที่ 2.18 ลักษณะพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นของวัสดุ [16]

2.4 การคืนตัวและการเกิดผลึกใหม่ (Recovery and Recrystallization)

จากการศึกษาจะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงระหว่างกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ซึ่งสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร้อนซึ่งพฤติกรรมนี้จะมีอิทธิพลต่อกลไกการแข็งตัว (Hardening Mechanism) และการอ่อนตัวของโลหะผสม MAB โดยกลไกการอ่อนตัว (Softening Mechanism) คือ การคืนตัว (Recovery) และการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปร้อน

2.4.1 การคืนตัว (Recovery)

เมื่อนำโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (Cold work) มาทำให้ร้อนขึ้นจนถึงช่วงอุณหภูมิการคืนตัวซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ อุณหภูมิการตกผลึกใหม่เล็กน้อย ความเค้นภายในจะลดลงระหว่างการคืนตัวของวัสดุพลังงานจากความร้อนที่จะทำให้ดิสโลเคชันเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างดิสโลเคชันที่มีพลังงานต่ำ การคืนตัวของการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องเกิดเกรนเป็นจำนวนมากทำให้เกิดโครงสร้างเกรนย่อย (Sub-grain) เมื่อเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ความแข็งแรงของโลหะจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

หลักการของการคืนตัวของวัสดุคือ เมื่อให้พลังงานหรือความร้อนในโลหะจะส่งผลให้ความเครียดในวัสดุลดลง การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

1. การเคลื่อนที่แบบหักล้าง (Annihilation)
2. การเคลื่อนที่แบบจัดเรียงใหม่ (Rearrangement)

ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้ง 2 ลักษณะต้องอาศัยกลไกการคลาน (Glide) การปีน (Climb) และการเลื่อนข้ามระนาบ (Cross-Slip) ของดิสโลเคชันซึ่งเกิดการหักล้างโดยการคลานเข้าหากันระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ที่อุณหภูมิสูงวัสดุจะเกิดการลดลงของความหนาแน่นของดิสโลเคชันในระหว่างการเปลี่ยนรูป และนำไปสู่การคืนตัวแบบพลศาสตร์ (Dynamic Recovery) ซึ่งไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไป

2.4.2 การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

การขยายตัวของเกรนใหม่ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกผลึกใหม่จะนำไปสู่การลดลงของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุด้วยการแทนที่บริเวณที่เปลี่ยนแปลงด้วยเกรนที่ปราศจากความเครียด (Strain free) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงอุณหภูมิการคืนตัวของวัสดุซึ่งมีผลทำให้เกิดผลึกใหม่ การเกิดผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับผลึกเดิมก่อนการเปลี่ยนรูป ผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่เกรนมีการเปลี่ยนรูปสูงหรือเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเครียดหรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนและบริเวณที่มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง เกรนใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรและเป็นเกรนที่ไม่มีมีความเครียดตกค้าง (Strain free) และจะเริ่มขยายตัวขึ้นเรื่อยๆจนแทนที่เกรนเดิมที่มีความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปจนถึงสิ้นสุดการเกิดผลึกใหม่ เมื่อโลหะเกิดเกรนใหม่แทนที่เกรนเดิมโดยสมบูรณ์

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกลไกการตกผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสม ได้แก่

1. ปริมาณการเปลี่ยนรูปของวัสดุ
2. อุณหภูมิ
3. เวลา
4. ขนาดของเกรนเริ่มต้น
5. ส่วนประกอบของโลหะหรือโลหะผสม

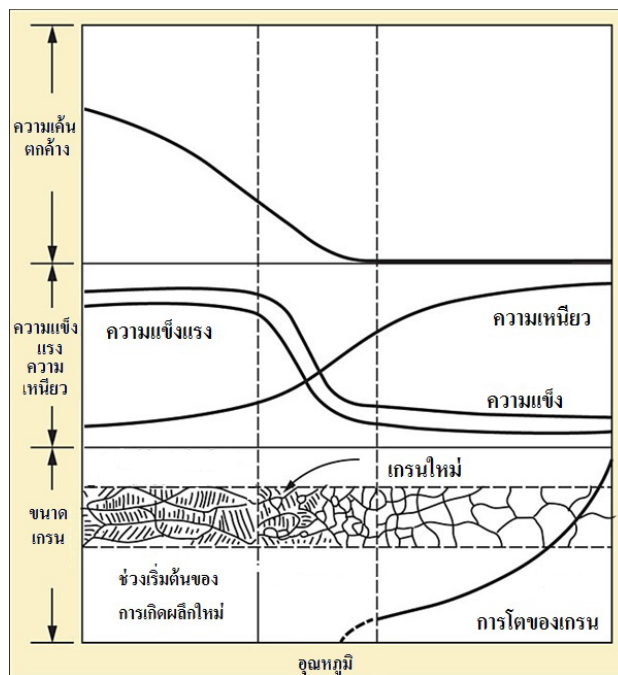
หลักการที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ของวัสดุ

1. การตกผลึกใหม่ของวัสดุจะเกิดได้วัสดุจะต้องมีปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนรูปต่ำ
2. ถ้าปริมาณการเปลี่ยนรูปต่ำ จะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่
3. ถ้าใช้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ที่สูงขึ้นจะช่วยลดเวลาที่ใช้ให้น้อยลงเพื่อให้การตกผลึกสมบูรณ์

2.4.3 การโตของเกรน (Grain growth)

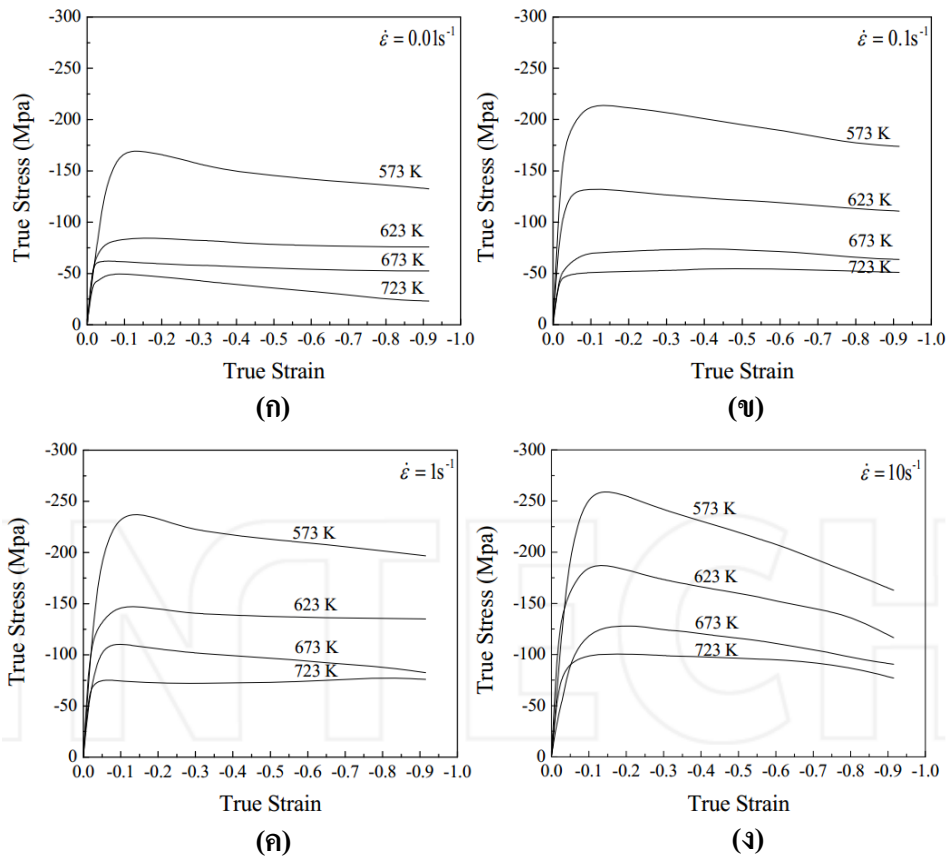
การโตของเกรนเป็นระยะที่เกรนใหม่เริ่มโตขึ้นในทุกทิศทาง หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์แล้ว เกรนที่ปราศจากความเครียดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไปได้ถ้าชิ้นงานโลหะยังคงอยู่ที่อุณหภูมิสูงเรียกว่าการโตของเกรน การโตของเกรนไม่จำเป็นต้องเกิดหลังการคืนตัวและการตกผลึกใหม่เท่านั้น อาจเกิดขึ้นได้ในวัสดุหลายผลึกทุกชนิดทั้งโลหะ เมื่อเกรนมีขนาดโตขึ้นทำให้พื้นที่ขอบเกรนโดยรวมลดลงและส่งผลให้พลังงานรวมของวัสดุลดลงและเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการโตของเกรน การโตของเกรนเกิดขึ้นโดยการขยับหรือการเคลื่อนที่ของขอบเกรน และไม่ใช่ทุกเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จะพบว่าเกรนเล็กเกิดการหดตัว

ซึ่งจากทฤษฎีของการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่และการโตของเกรนจะแสดงดังรูปที่ 2.19 ดังนี้

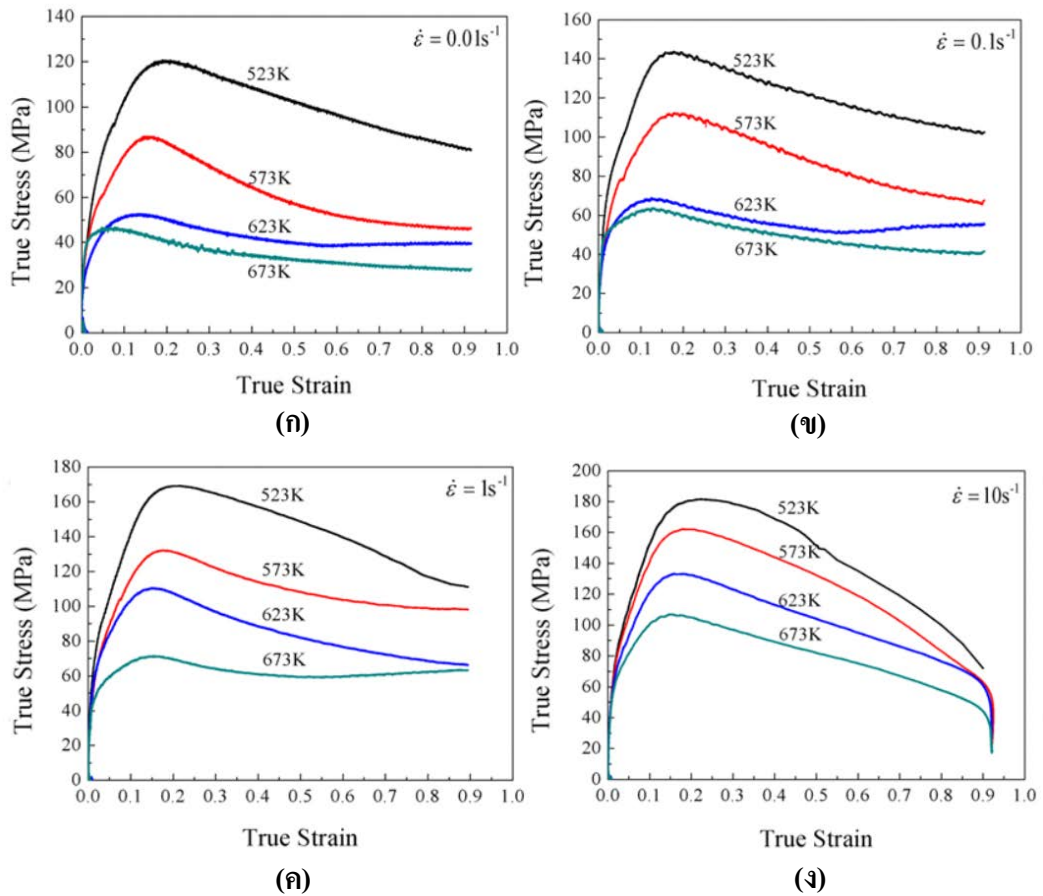


รูปที่ 2.19 อิทธิพลของการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการเติบโตของผลึก [17]

ตัวอย่างพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุอื่น



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 ที่อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที และ (ง) ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 ที่อัตราการความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราการความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราการความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราการความเครียด 1 ต่อวินาที (ง) ที่อัตราการความเครียด 10 ต่อวินาที

รูปที่ 2.20 และ 2.21 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 (7075 aluminum alloy) และโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 (Magnesium alloy) ตามลำดับ ซึ่งมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปคล้ายกับวัสดุโลหะผสม MAB และสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่แบ่งออกได้ 3 ช่วงที่แตกต่างกันคือ ในช่วงแรกที่กลไกความเครียดแข็ง (WH) มีค่ามากกว่าความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าวิกฤตสูงสุด (Critical value) ในช่วงที่สอง ค่าความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ต่ไปจนถึงจุดสูงสุด (Peak value) หรือจุดเกิดการหักเห (Inflection) ของอัตราการความเครียดแข็ง (Work hardening rate) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงให้เห็นถึงกลไกการอ่อนตัวของวัสดุขึ้นเนื่องมาจากการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์และการคืนตัวแบบพลศาสตร์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ช่วงที่สามสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นแบบแรกคือมีการ

ลดลงของค่าความเค้นเรื่อยๆจนถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ที่มีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ สำหรับวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 ก็จะสังเกตเห็นพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดดังกล่าวได้ที่ อุณหภูมิ 573-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 723 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที ส่วนโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 จะพบพฤติกรรมดังกล่าวที่อุณหภูมิ 573-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 673 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที และแบบที่สองคือค่าความเค้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของวัสดุ วัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 จะพบพฤติกรรมดังกล่าวที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาทีที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 573-623 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที และโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 จะพบได้ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523-573 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623 เคลวิน และอัตราความเครียด ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบโดยทั่วไปของเส้นโค้งไหลที่มีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เกิดจุดสูงสุดเพียงยอดเดียวด้วยการไหลในสภาวะคงตัวที่อุณหภูมิสูง [18]

2.5 แบบจำลองวัสดุภายใต้สภาวะการขึ้นรูปร้อน

2.5.1 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการซีเนอร์โฮ

โสมอนต์

ในงานวิจัยของ Sellars และ McTegart ได้นำเสนอสมการไฮเพอร์โบลิกไซน์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียด ความเค้นไหล และอุณหภูมิ มาทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยสมการที่ 2.10 [19]

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.10)$$

และมีการพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการเปลี่ยนรูปและอุณหภูมิ สมการฮาร์นีย์สในสมการที่ 2.11 นิยมใช้ 3 รูปแบบ ได้แก่ กฎพาวเวอร์ (Power law) ดังแสดงในสมการที่ 2.12 กฎเลขชี้กำลัง (Exponential Law) ดังแสดงในสมการที่ 2.12 และกฎไฮเพอร์โบลิกซายด์ (Hyperbolic-sine law) ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.12)$$

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.13)$$

$$\dot{\epsilon} = A(\sinh \alpha\sigma)^{n_2} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.14)$$

โดย $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียด (s^{-1}) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ($8.31 \text{ Jmol}^{-1}\text{k}^{-1}$) T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ Q คือพลังงานกระตุ้น (kJmol^{-1})

สมการคอนสทิทิวทีฟของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุพวกโลหะและโลหะผสมในขณะขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) ในสมการคอนสทิทิวทีฟดังกล่าวสามารถหาได้โดยตรงจากการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน โดยผลของอุณหภูมิ อัตราความเร็วในการขึ้นรูปร้อน จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปโดยค่าคงที่จากสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ เพื่อกำหนดค่าค่าคงที่ของซีเนอร์โฮโลมอนด์และค่าคงที่ของความเค้นไหลจากสมการเป็นตัวกำหนด “Softening Mechanism” ของวัสดุ

ค่าคงที่ของวัสดุ (Q , β , n และ α) ในสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์จะกำหนดภายใต้ค่าความเครียดที่แตกต่างกันแต่ละความเครียดอยู่ในช่วง 0.05-0.8 โดยมีช่วงระยะ 0.05 ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q , n และ α กำหนดค่า A ที่ค่าความแตกต่างของอัตราความเครียดและความเค้นจากสมการ $Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2}$ สมการใช้สำหรับกระบวนการของการจำลองในการหาความเค้นไหล ดังสมการที่ 2.15

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.15)$$

เพื่อจะทำนายความแม่นยำของสมการซีเนอร์-โฮโลมอนด์ของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายจากการคำนวณ

2.5.2 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการซิงกาล่า

แบบจำลองวัสดุของสมการซิงกาล่า ใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลที่อุณหภูมิสูงในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงความเค้นสูงสุด ดังสมการที่ 2.16 [20]

$$\sigma = \sigma_p \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \exp \left(1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \right) \right) \right]^C \quad (2.16)$$

โดย σ_p คือความเค้นสูงสุด ε_p คือความเครียดสูงสุด และ C คือค่าคงที่ เมื่อเราทราบค่าความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุด จะสามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ในสมการที่ 2.17

$$\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right) = C \left[1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \right] \quad (2.17)$$

2.5.3 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่

จุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของวัสดุส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอัตราการกระจายตัวและความหนาแน่นของดิสโลเคชันระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูป จะเห็นว่าการสร้างเส้นโค้งของสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ใช้การสังเกตโครงสร้างทางจุลภาค โดย B. Yuzeng และคณะในงานวิจัย ได้ทำนายค่า X_d จากกราฟความเค้น-ความเครียด โดยใช้สมการที่ 2.18 [21]

$$X_d = 1 - \exp \left[(-k) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^n \right] \quad (2.18)$$

ที่ $k n$ เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ε คือ ความเครียด ε_c คือ ค่าความเครียดวิกฤต และ ε_p คือความเครียดสูงสุด

สมการที่ใช้เป็นรูปแบบของการคำนวณการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \ln(1/(1-X_d))$ และ $\ln((\varepsilon - \varepsilon_p)/\varepsilon_p)$ ภายใต้เงื่อนไขของการขึ้นรูปร้อนจะเป็นเส้นตรงจากสมการที่

2.18 สามารถเขียนใหม่เป็นลอการิทึมธรรมชาติดังสมการ 2.19 เพื่อหาค่า n k นำไปใช้คำนวณหาสัดส่วนปริมาณ

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-X_d} \right) = \ln k + n \ln \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right) \quad (2.19)$$

กราฟความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม MAB สามารถอธิบายได้โดยการใช้ฟังก์ชันของสมการอาลามี่เกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม MAB สามารถพิสูจน์ได้ว่าสมการอาลามี่มีความแม่นยำจะเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการทำนาย โดยใช้สมการที่ 2.20

$$\sigma = \sigma_p - (\sigma_p - \sigma_{ss}) X_{DRX} \quad (2.20)$$

ที่ σ_p คือความเค้นสูงสุด σ_{ss} คือความเค้นที่สภาวะคงตัว และ σ คือความเค้น

2.5.4 การหาค่าความเค้นสูงสุด (σ_p) และค่าความเค้นวิกฤต (σ_c)

ค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นวิกฤตสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเชิงกับความเค้น ที่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความเค้นและความเครียด ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) เทียบกับความเค้น สามารถบอกให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในวัสดุว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

ในการหาค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นวิกฤตซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณด้วยวิธีการของ Najafizadeh และ Jonas ซึ่งใช้สำหรับจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เนื่องจากความเค้นวิกฤตหาได้จากจุดเปลี่ยนความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงกับความเค้น โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามที่ 3 จากสมการที่ 2.21 [22]

$$\theta = A\sigma^3 + B\sigma^2 + C\sigma + D \quad (2.21)$$

เมื่อ A, B, C และ D เป็นค่าคงที่มาจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปแบบถาวร การหาอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่ 2.19 ได้ความสัมพันธ์ของความเค้นวิกฤตดังนี้

$$\frac{d^2\theta}{d\sigma^2} = 6A\sigma + 2B \quad (2.22)$$

ณ ตำแหน่งที่ความเค้นวิกฤตเงื่อนไข $\frac{d^2\theta}{d\sigma^2} = 0$ เป็นจริง ทำให้สามารถหาค่าความเค้นวิกฤตได้เป็น

$$\sigma_c = -\frac{2B}{6A} \quad (2.23)$$

2.6 ความเสถียรภาพการขึ้นรูป (Dynamic Material Model)

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปในระหว่างการขึ้นรูปรีด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความเครียด และอัตราความเครียด เพื่อคำนวณหาความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity) และความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Temperature sensitivity) ในรูปแบบของแบบจำลองทางพลศาสตร์ในเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ จะมีความสัมพันธ์ต่อการปลดปล่อยพลังงานของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปรีด [23]

ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดสามารถหาได้จากสมการ

$$m = \left\{ \frac{\partial(\log \sigma_p)}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \right\}_T \quad (2.24)$$

ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ สามารถวิเคราะห์ในเทอมของตัวแปร s ดังสมการ 2.22

$$s = \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (2.25)$$

จากความสัมพันธ์ของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดและอุณหภูมิ ได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาของความเสถียรภาพการขึ้นรูปรีดเมื่อกระบวนการปลดปล่อยพลังงานของวัสดุในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปรีดเข้าสู่สภาวะสมดุล ได้พิจารณาในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนดจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB เป็นเกณฑ์เสถียรภาพดังต่อไปนี้

$$0 < m < 1 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial m}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0 \quad (2.27)$$

$$s > 1 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial s}{\partial(\log \epsilon)} \leq 0 \quad (2.29)$$

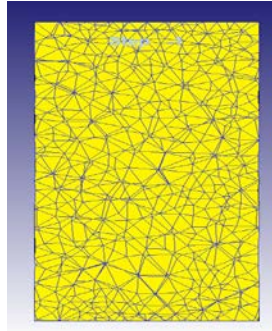
โดยทั่วไปการกำหนดอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปร้อนจะทำให้หลีกเลี่ยงค่าที่สูงมากเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดการแตกหักของชิ้นงาน นอกจากนี้เกณฑ์เสถียรภาพดังกล่าวจะนำไปสู่ความเค้นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้แนวโน้มของข้อจำกัดการเปลี่ยนรูปลดลง ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก้อน (Finite Element Simulation for Bulk Metal Forming)

การวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเพื่อหาผลเฉลยที่ถูกต้อง เทียบตรงและแม่นยำ สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะและความซับซ้อนของปัญหา ซึ่งวิธีที่นิยมใช้และสะดวกรวดเร็วในการหาผลเฉลย คือ วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต โดยการวิเคราะห์แบบจำลองของชิ้นงานที่ถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งรูปร่างของเอลิเมนต์จะถูกกำกับด้วยจุดต่อ (Node) ตั้งแต่ 2 จุดต่อขึ้นไป โดยแต่ละจุดต่อจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนตำแหน่งของเอลิเมนต์ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะทำนายปัญหาทางด้านวิศวกรรม

ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดซึ่งในความหมายทางกายภาพคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดนี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

ซึ่งสมการที่ใช้ในงานวิจัยคือ สมการซีเนอร์โฮโลมอนต์ ในการคำนวณแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มักจะนิยมใช้กับวัสดุที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรเป็นสมการพื้นฐานที่มีความเกี่ยวข้องกับความเค้น อัตราความเครียดและอุณหภูมิ จะมีความเกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปร้อน

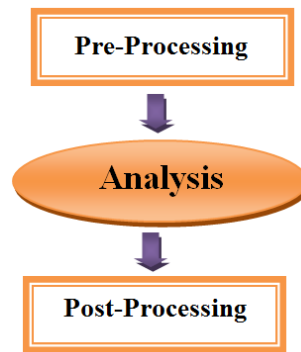


รูปที่ 2.22 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก้อน

สำหรับระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้ [24]

1. หาสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นที่เหมาะสมกับปัญหา รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม
2. แบ่งรูปร่างลักษณะของชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์
3. กำหนดค่าคงที่จากผลการทดลอง โดยการแทนฟังก์ชันโดยประมาณอย่างง่าย
4. ทำการพิจารณาทีละเอลิเมนต์ โดยการแทนฟังก์ชันนี้ในสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นและอาศัยคณิตศาสตร์ชั้นสูงช่วยจัดการสมการให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์จนเป็นสมการสำหรับเอลิเมนต์ (Element Equation) ขึ้นมา
5. รวมสมการต่างๆ เข้าด้วยกัน (Assemble) เป็นสมการระบบรวม (System of Equation)

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์หลายโปรแกรม แต่ละโปรแกรมต่างๆ มีความสามารถแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมทางการค้าชื่อ “DEFORM 3D” โดยขั้นตอนในการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มี 3 ขั้นตอน คือ Pre-Processor Analysis และ Post-Processor



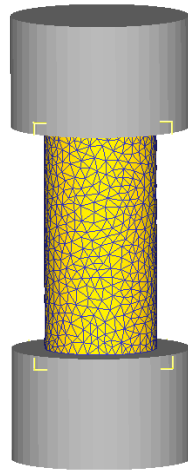
รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1. Pre-Processor

Pre-Processor คือการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน เพื่อจำลองรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2.24 ในส่วนนี้สามารถสร้างจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เองได้ แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนควรสร้างจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น CAD (Computer-Aid-Design) แล้วนำเข้าไปยังโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อได้แบบจำลองชิ้นงานแล้ว จากนั้นจึงสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) โดยแบ่งย่อยรูปร่างของแบบจำลองขนาดใหญ่ให้เป็นเอลิเมนต์ (Element) เอลิเมนต์ขนาดต่างๆ ตามที่เรากำหนด จะมีจุดมุมของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าจุดต่อ (Node) จะเป็นจุดเชื่อมต่อของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน กลายเป็นรูปร่างตามแบบจำลองที่เราต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 2.25

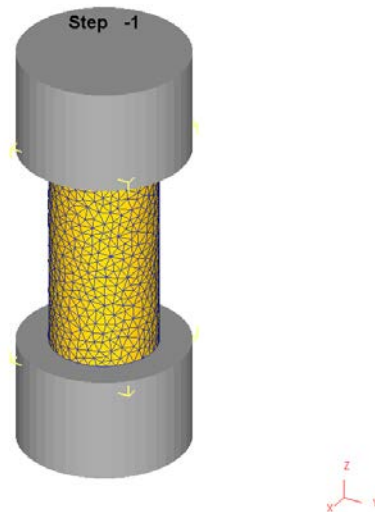


รูปที่ 2.24 แบบจำลองของชิ้นงาน



รูปที่ 2.25 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงาน

จากนั้นจะต้องกำหนด Material Properties ของแต่ละชิ้นงาน นอกจากการเตรียมรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ขั้นตอน Pre-Processor ยังรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Conditions) เช่น ทิศทาง และระยะการเคลื่อนที่ การกำหนดขนาดและทิศทางของแรงกระทำ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.26



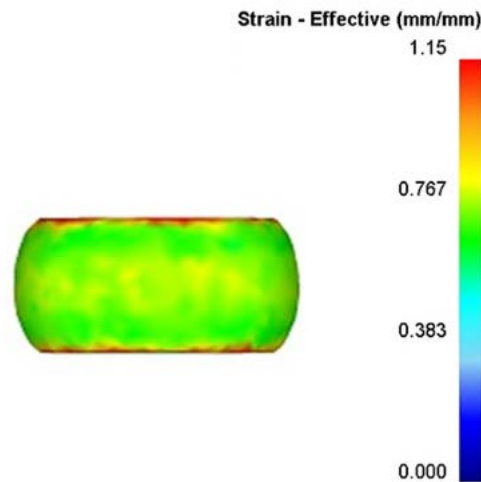
รูปที่ 2.26 กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแกน

2. Analysis

Analysis คือ การวิเคราะห์และแก้สมการ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์

3. Post-Processor

Post-Processor เป็นขั้นตอนการแสดงผลการวิเคราะห์ ปัญหาที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมากจะแสดงผลที่คำนวณได้เป็นแถบสี ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การแสดงผลของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสมการแบบจำลองของวัสดุ (Modeling Equation of Materials)

2.8.1.1 สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์

จากความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟได้นำมาประยุกต์เพื่ออธิบายคุณสมบัติการไหลแบบถาวรของโลหะผสม โดยเส้นโค้งความเค้น-ไหลจะขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ เพื่อดุลลักษณะพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการทำนายจากการทดสอบโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยสมการคอนสทิทิวทีฟที่ใช้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของตัวแปรด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ที่ถูกนำมาพิจารณา จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์สามารถนำมาประเมินความถูกต้องและแม่นยำของความเค้น-ไหลของโลหะผสมที่ใช้ในการทดสอบได้ [25,26] สำหรับงานวิจัยของ Lin และคณะ [27] ได้ศึกษาการกดขึ้นรูปร้อนของเหล็ก 42CrMo และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยใช้ตัวแปรของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ได้ Chen และคณะ[28] ได้พิจารณาลักษณะการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงของโลหะ 42CrMo และได้ศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ไหลของสมการคอนสทิทิวทีฟ ซึ่งพิจารณาค่าความเครียดแข็ง (Work hardening) การคืนตัวแบบพลศาสตร์ (DRV) และ การเกิดผลึก

ใหม่แบบพลศาสตร์ (DRX) การทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกันสำหรับโลหะผสม Al-Cu-Mg โดย Banerjee และคณะ [29] การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยใช้ตัวแปรของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ได้พิจารณาที่เส้นโค้งความเค้นไหลเพียงยอดเดียว และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Wanjara และคณะ [30] ได้ศึกษาจากสมการคอนสทิทิวทีฟอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ฮาร์ริเนยส โดยใช้ไฮเพอร์โบลิกซายด์สำหรับการทำนายความเค้นไหลของโลหะผสม IMI834 Zhang และคณะ [31] ได้กำหนดค่าของสมการคอนสทิทิวทีฟที่สามารถอธิบายความเค้นไหลของเหล็ก TWIP ที่มีแมกนีเซียมสูง นำเสนอผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับระหว่างการทดลองและการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคอนสทิทิวทีฟสมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการทำนายความเค้นไหลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่อุณหภูมิที่พิจารณาได้นำเสนอโดย Cai และคณะ [32] Haghdad และคณะ [33] ได้นำเสนอแบบจำลองฮาร์ริเนยสสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมความเค้นไหลของโลหะผสมอลูมิเนียม A356 แบบหล่อ ความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟที่ใช้ในการประเมินและตรวจสอบผลกระทบของตัวแปรที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสม 2099 จะคำนึงถึงผลกระทบของความเครียดได้นำเสนอโดย Zhang และคณะ [34]

2.8.1.2 สมการชิงกาล่าและสมการอาลามี่

Cingara และคณะ [35] ได้ศึกษาบริเวณความเครียดแข็งของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้สมการเอมพิริคัล ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ได้ Wang และคณะ [36] ได้พิจารณาเงื่อนไขของความเค้นวิกฤตในการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของเหล็ก 20MnNiMo จากนั้นจะใช้การวิเคราะห์โดยได้คำนวณจากสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_p) และค่าของการคำนวณของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (SRS) Jia และคณะ [37] ได้ศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนรูปร้อนและการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม P/M Ti-22Al-25Nb พัฒนาสมการคอนสทิทิวทีฟเพื่อทำนายพฤติกรรมกลไกการอ่อนตัวของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ Quan และคณะ [38] ได้ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงแบบอัด (Extrude) ของเหล็ก 42CrMo ที่มีความแข็งแรงสูง ใช้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้การคำนวณของสมการอาลามี่รวมทั้ง ϵ_0 , ϵ^* เป็นฟังก์ชันของ Z และทำนายโดยใช้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบไมโครอัลลอย เช่น Nb, V และ Ti ในพฤติกรรมความเค้นไหลของเหล็ก TWIP โดยการวิเคราะห์การคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์และโครงสร้างจุลภาคของการเปลี่ยนรูปร้อน นำเสนอ

โดย Reyes และคณะ [39] ความเค้นวิกฤตและความเครียดสำหรับจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่ พลศาสตร์ได้พิจารณาโดยใช้อัตราความเครียดเทียบกับความเค้น (Work hardening rate versus Stress) โดยใช้วิธีลอการิทึมแบบธรรมชาติของอัตราความเครียดกับความเค้นและสมการคอนสทิทิวทีฟโดย Mirzadeh และคณะ [40] Liu และคณะ [41] ได้นำเสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนรูปร้อนในการกำหนดค่า ความเครียดวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เพื่อนำไปสู่การคำนวณ สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยการคำนวณนี้ได้ใช้สมการอาลามี่ของโลหะ ผสม NO2028 Qin และคณะ [42] ได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับใช้เป็นตัวแทนของความเค้นไหลของ โลหะผสมแมกนีเซียมที่สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลรวมถึงกลไกความเครียดแข็งของ การเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์และตัวแปรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุ (DMM)

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุและแบบจำลองทางจลนศาสตร์สามารถประยุกต์ในการทำนาย โครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนรูปที่มีความเสถียรภาพของโลหะผสม MAB ในการศึกษา Zhou และคณะ [43] ได้พิจารณาแผนภาพกระบวนการ (Processing map) ของโลหะผสม GH960 และได้ทำ แบบจำลอง DMM เพื่อดูพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ภายใต้การเปลี่ยนรูปร้อนที่ เหมาะสม Luo และคณะ [44] ได้แสดงแผนภาพกระบวนการในการกดขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 7075 และโครงสร้างจุลภาคถูกใช้เพื่อทำนายกลไกการเปลี่ยนรูป (Deformation mechanism) เป็นกระบวนการที่ดีที่สุดจะใช้เพื่อออกแบบการทำงานรูปร้อน สำหรับ โลหะผสม AZ61 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร้อนเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและนำเสนอ แผนภาพโดย Xu และคณะ [45] แสดงแผนภาพที่ได้คำนวณและวิเคราะห์ตามแบบจำลอง DMM ซึ่ง มี การเปลี่ยนแปลงที่มีประสิทธิภาพที่ดีของการกระจายพลังงานภายใต้ฟังก์ชันของอุณหภูมิและอัตรา ความเครียด การทำนายเสถียรภาพและการเสถียรภาพของการทอบขึ้นงานจะมีความแม่นยำเมื่อ เทียบกับโครงสร้างจุลภาคซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การทอบขึ้นรูปร้อนเป็นแบบลักษณะเหมือนแผนเค้ก โดย วัสดุ Ti-6Al-4V นำเสนอโดย Park และคณะ [46] Venugopal และคณะ [47] ได้พิจารณาเพื่อระบุ บริเวณที่มีความเสถียรภาพสำหรับกระบวนการที่ปลอดภัยของไทเทเนียมบริสุทธิ์