

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดึงลวด

กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady state process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non steady state process) กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร ได้แก่ กระบวนการดึงลวด (Wire drawing) กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) กระบวนการขึ้นรูปแบบไม่เสถียร เช่น กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการตัด (Blanking) และกระบวนการลากขึ้นรูป (Deep drawing) กระบวนการดึงลวดเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีมานานแล้ว และเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย

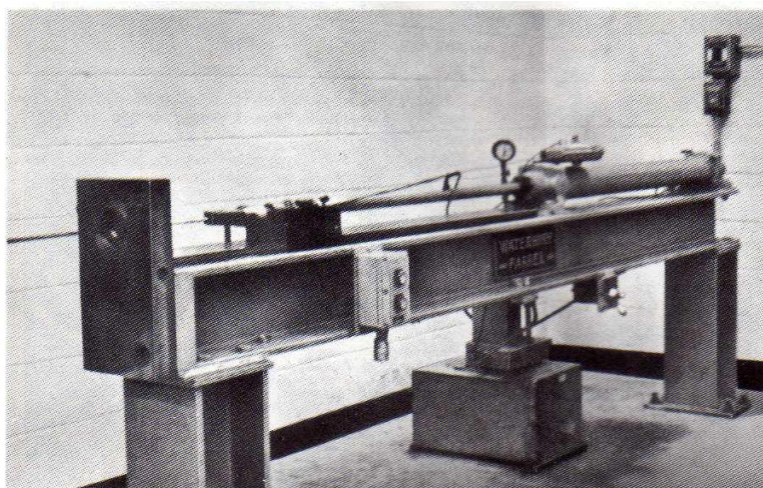
2.1.1 เครื่องดึงลวด

การแบ่งประเภทของเครื่องดึงลวดจะแบ่งตามต้นกำลังการดึงของเครื่องและระดับการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด ซึ่งประเภทของเครื่องดึงลวดสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ [6]

1. แบบใช้ไฮดรอลิกส์เป็นต้นกำลังในการดึง

ก. เครื่องดึงลวดแบบครอเบ็นซ์ (Draw bench)

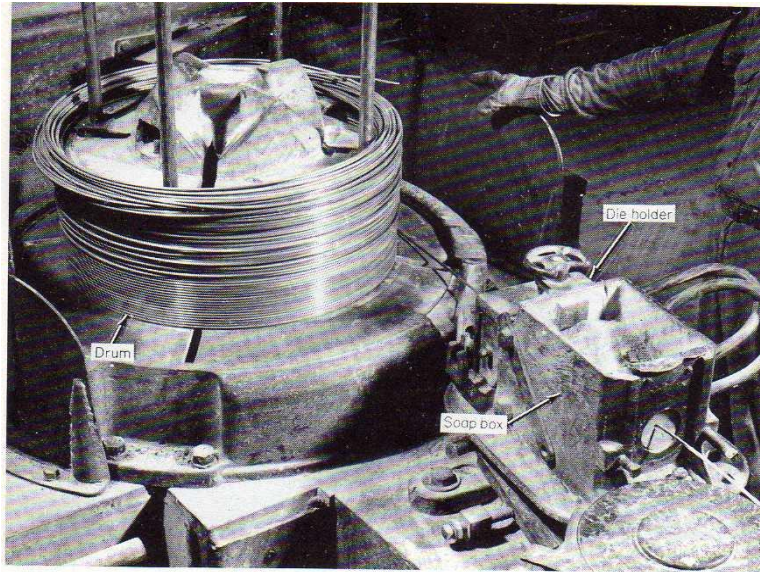
เครื่องดึงลวดแบบครอเบ็นซ์ใช้ระบบไฮดรอลิกส์เป็นต้นกำลังในการดึง สามารถดึงได้ทั้งท่อและลวด ความสามารถของเครื่องจะให้อัตราส่วนการลดหน้าตัดสูง เหมาะกับการดึงลวดขนาดเล็ก และความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบครอเบ็นซ์ [6]

2. แบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึง

ก. เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว (Single-head bull block)

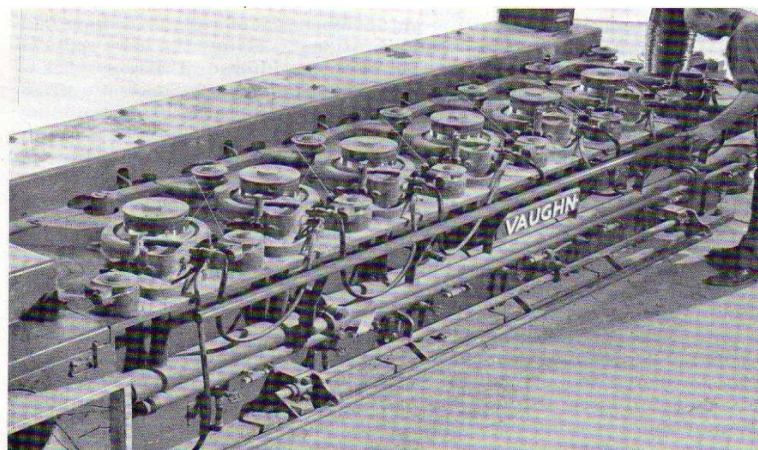


รูปที่ 2.2 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว [6]

เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียวดังรูปที่ 2.2 ส่วนมากจะทำการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ตัวเดียวและจะให้ อัตราการลดหน้าตัดต่ำ โดยลวดที่ดึงเก็บจะมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังเพียงตัวเดียว

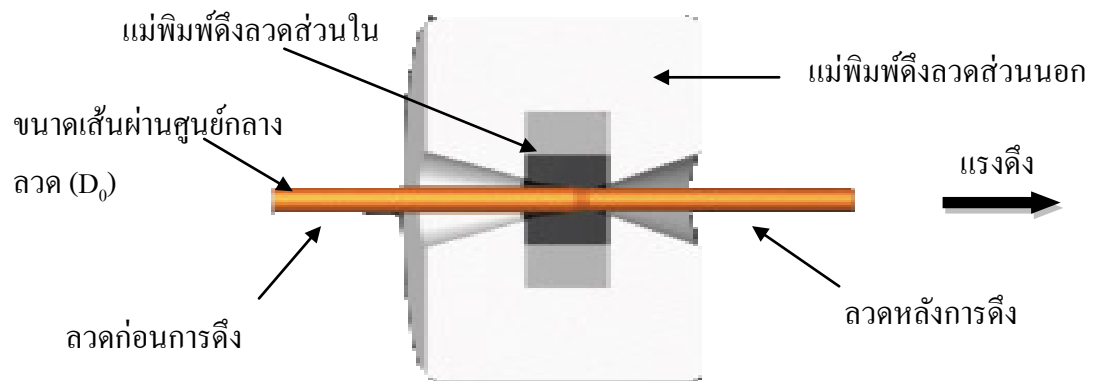
ข. เครื่องดึงลวดแบบหลายขั้น (Multiple - station drawing machine)

การดึงลวดหลายขั้นตอนดังรูปที่ 2.3 จะมีแม่พิมพ์ดึงลวดลดขนาดหลายตัว ใช้ในกรณีที่ต้องการ อัตราส่วนการลดหน้าตัดที่สูง โดยจะควบคุมความเร็วในการดึงให้เท่ากันทุกตัว



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบหลายขั้นตอน [6]

2.1.2 กระบวนการดึงลวด



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด [7]

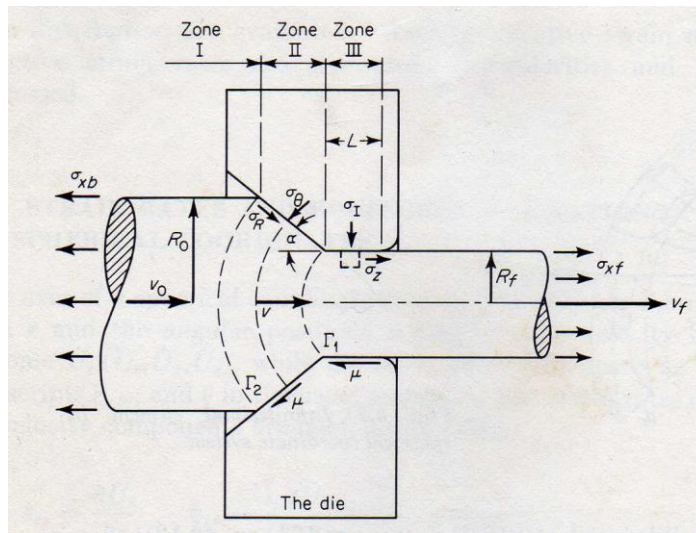
กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อนหรือลวดหลังจากผ่านารขึ้นรูปร้อนมาดึงลดขนาด โดยผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 2.4 ผลกระทบจากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรง รูในของแม่พิมพ์ดึงลวด ได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงหกเหลี่ยม และรูปทรงอื่นๆ ที่ซับซ้อนขึ้น แต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

กรรมวิธีดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาด เพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ออกไปก่อน ซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ ทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลง การดึงเริ่มต้น โดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดด้วยชุดต้นกำลัง รูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์ เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [8] จะมีตั้งแต่การดึงลวดขนาดใหญ่ $D_0 = 4.2$ ถึง 16 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดกลาง $D_0 = 1.6$ ถึง 4.2 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก $D_0 = 0.7$ ถึง 1.6 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก (Fine Wire) D_0 น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมากสามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตร แต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (%Elongation) นั้นๆด้วย

2.1.2.1 ลักษณะการทำงานของ การดึงลวด

ขั้นตอนแรกของการดึงลวดคือ การทำความสะอาดเส้นลวด เนื่องจากลวดที่นำมาอาจมีสนิมหรือตะกั่วที่ก่อกำเนิดขึ้นระหว่างกระบวนการรีดร้อน (Hot rolling) โดยใช้สารเคมีในการทำความสะอาด เป็นต้น ขั้นตอนนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้ และอาจจะใช้สารหล่อลื่นเคลือบผิวด้วยก็ได้

ขั้นตอนต่อไปคือการลดขนาดปลายลวดให้มีขนาดเล็กลงมากพอที่จะสอดผ่านแม่พิมพ์ได้



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการดึงลวด เมื่อดึงผ่านแม่พิมพ์ [6]

จากรูปที่ 2.5 สามารถแบ่งการดึงลวดออกเป็น 3 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 ลวดยังไม่เริ่มการเปลี่ยนแปลง ลวดจะเริ่มเปลี่ยนในช่วงที่ 2 ตรงบริเวณผิว Γ_2 และรัศมีเริ่มต้นของลวดเป็น R_0 ซึ่งเท่ากับรัศมีเริ่มต้นก่อนการดึงลวด ในช่วงนี้การขึ้นรูปจะทำโดยใช้ผิวของแม่พิมพ์และมุมของการไหลเข้า (approach angle (2α)) ในช่วงที่ 3 เป็นช่วงสุดท้ายของการดึงลวด โดยมีรัศมีของการดึงลวดเท่ากับ R_f

2.1.2.2 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์

ส่วนประกอบที่สำคัญมีด้วยกัน 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ มุมการไหลเข้า และอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด

1. Optimal approach angle ($2\alpha_{opt}$) คือมุมของการไหลเข้าที่เหมาะสมที่ทำให้แรงดึงมีค่าน้อยสุด โดยคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} m \ln \frac{R_0}{R_f}} \quad (2.1)$$

โดยค่า R_0 = รัศมีของการดึงลวด

R_f = รัศมีของลวดหลังดึง

m = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือน (Shear factor)

2. อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (2.2)$$

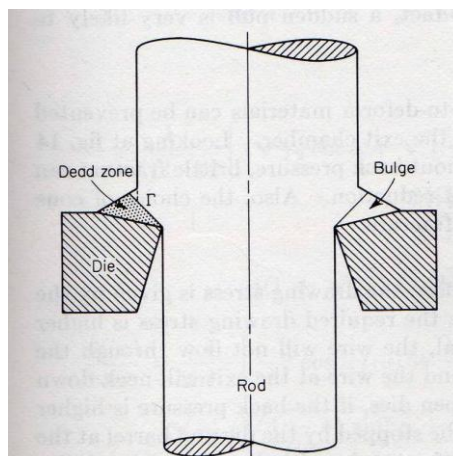
โดยค่า A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง

A_1 = พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง

เมื่อพิจารณาจากช่วงของการเปลี่ยนรูปของลวดที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ จากทฤษฎีและการทดลองทำให้ทราบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดมีผลต่อแม่พิมพ์ ในกรณีที่อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กสามารถใช้แม่พิมพ์ตัวเดียวได้ กลับกันถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ เครื่องดึงลวดที่มีแม่พิมพ์ตัวเดียวไม่สามารถทำงานและให้คุณภาพตามต้องการได้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องดึงลวดที่ออกแบบให้มีแม่พิมพ์หลายตัวทำงานเป็นระบบ Multiple-die ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ที่สำคัญถ้าเลือกใช้มุมการไหลเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่เหมาะสมจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีความเที่ยงตรงไม่ตรงตามที่ออกแบบ อันเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. Dead zone formation

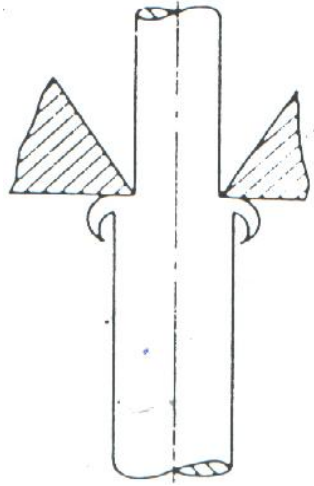
ถ้ามุมการไหลเข้ามีขนาดเล็กเพียงพอ การไหลจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แต่ถ้ามุมการไหลเข้ามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิด Dead zone ขึ้น สังเกตจากรูปที่ 2.6 พบว่าเนื้อโลหะจะเกาะติดกับแม่พิมพ์ โดยมุมการไหลเข้าต้องมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต (Critical angle) ก็จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิด Dead zone ขึ้น



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงลักษณะของ Dead zone [6]

2. การปอกผิว (Shaving)

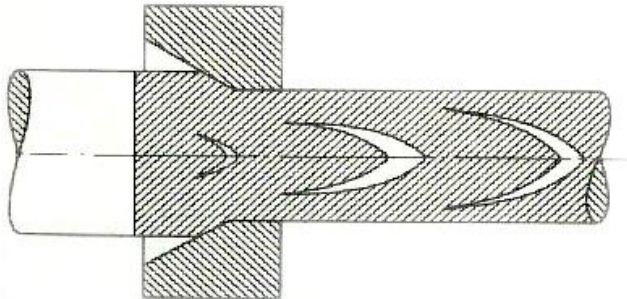
มุมการไหลเข้ามีค่ามากกว่ามุมวิกฤต จะมีโอกาสทำให้เกิด Dead zone ขึ้น และถ้าเราทำการเพิ่มมุมการไหลให้มากขึ้นจะทำให้มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายจากการปอกผิวได้มากกว่าความเสียหายจาก Dead zone



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงลักษณะของการปอกผิว [6]

3. Central burst or Chevroning

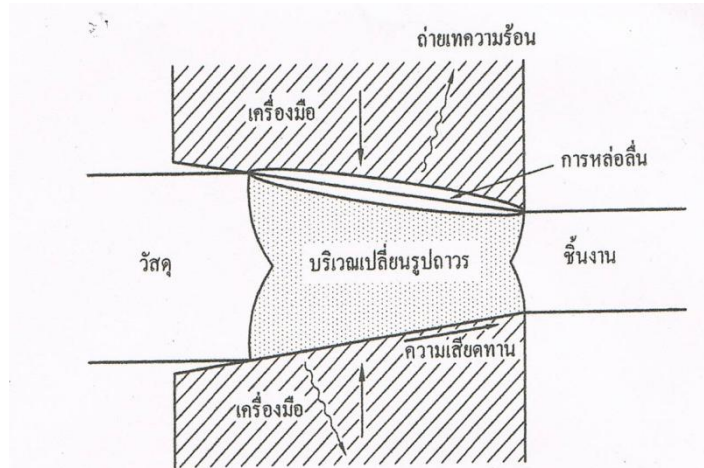
คือกระบวนการที่ทำให้เกิดรอยแตกภายในชิ้นงาน โดยส่วนที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic zone) จะไม่สามารถขยายตัวได้ตามแนวแกนจึงทำให้เกิด (Dead zone) ขึ้นที่บริเวณภายในของเส้นลวดใกล้แกนกลางมีผลทำให้เกิดรอยแตกภายในชิ้นงานขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดในส่วนที่ 2 ของแม่พิมพ์ของกระบวนการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงรอยแตกภายในชิ้นงาน [6]

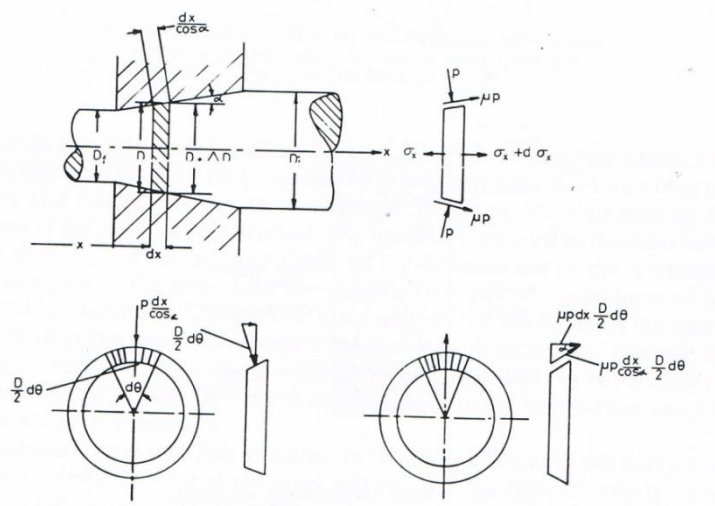
2.1.2.3 แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การวิเคราะห์ปัญหาการเปลี่ยนรูปถาวร จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆของเนื้อโลหะในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Deformation zone) ที่มีผลกระทบมาจากการเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์หรือเครื่องมือ การหล่อลื่น อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน การกระจายของความเค้นและความเครียด ความเร็วของการเปลี่ยนรูป ความซับซ้อนของชิ้นงานและความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงบริเวณเปลี่ยนรูปถาวรและผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูป [16]

แรงที่ใช้ขึ้นรูปจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าความเค้นครากของวัสดุ แต่ต้องไม่มากจนทำให้ชิ้นงานฉีกขาดหรือแตก เป็นต้น โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนรูปของโลหะค่อนข้างซับซ้อน แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เรามักจะสมมุติให้เนื้อโลหะในบริเวณเปลี่ยนรูปถาวรสม่ำเสมอ มีสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทาง ไม่คิดผลของความเค้นแข็ง (Strain hardening) การคำนวณแรงในการดึงลวดจะใช้วิธีสมดุลของแรง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงการวิเคราะห์แรงที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด [17]

จากรูปที่ 2.10 พิจารณาเอลิเมนต์ของวัสดุที่มีความกว้าง dx ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งผลรวมของแรงในแนวแกน x เท่ากับศูนย์ เพราะอยู่ในสภาวะสมดุล โดยส่วนประกอบของแรงในแนวแกน x ประกอบด้วย แรงจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในทิศทาง x , แรงจากความดันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุและแม่พิมพ์ทั้งสองข้าง ซึ่งตั้งฉากกับผิวสัมผัสของแม่พิมพ์และ แรงจากความเค้นความเสียดทาน μp โดยที่ μ เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามกฎของคูลอมบ์ โดยสมการสมดุลของแรง

$$\frac{1}{2}DdD\sigma_x + \frac{1}{4}D^2d\sigma_x + pDdx\tan\alpha + \mu pDdx = 0 \quad (2.3)$$

และความเค้นหลัก $\sigma_x = \sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = -p$ และอาศัยทฤษฎีของ Von Mises จะได้ว่า

$$\sigma_x + p = Y(\varepsilon) \quad (2.4)$$

กำหนดให้ $B = \mu \cot\alpha$ ถ้า B และ $Y(\varepsilon)$ เป็นค่าคงที่ จะได้

$$B\sigma_x - Y_m(1 + B) = CD^{2B} \quad (2.5)$$

เมื่อในสภาวะชิ้นงานเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์ $\sigma_x = 0$ และ $D = D_i$ โดยที่ C เป็นค่าคงที่ สามารถหาค่าความเค้นได้โดย

$$\frac{\sigma_x}{Y_m} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D}{D_i} \right)^{2B} \right] \quad (2.6)$$

ซึ่งสมการที่ 2.6 ใช้ในการหาความเค้น ในการดึงขึ้นรูปที่ทางออกของแม่พิมพ์ (σ_{xf}) และบางครั้งอาจติดอยู่ในทอมของอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด r คือ

$$r = 1 - \left(\frac{D_f}{D_i} \right)^2 \quad (2.7)$$

จะได้

$$\frac{\sigma_{xf}}{Y_m} = \frac{1+B}{B} [1 - (1-r)^B] = \frac{1+B}{B} [1 - \exp\{-B\varepsilon_h\}] \quad (2.8)$$

ซึ่ง ε_h เป็นความเครียดจริงอยู่ในทอม $[1 - \exp(-B\varepsilon_h)]$ และเป็นอนุกรมโดย

$$B\varepsilon_h - \frac{(B\varepsilon_h)^2}{2!} + \dots \quad (2.9)$$

ถ้าค่าของ $B\varepsilon_h$ มีค่าน้อย หรือมีลำดับอนุกรมที่สูง เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (2.6) สามารถลดรูปได้

$$\frac{\sigma_{xf}}{Y_m} = (1+B)\varepsilon_h = (1+B) \ln \left[\frac{1}{1-r} \right] \quad (2.10)$$

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมจำรูป

โดยทั่วไปถ้าเราต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ทำจากโลหะเราจะต้องใช้แรงในการดึงออกซึ่งโลหะนั้นและถ้าเราต้องการทำให้วัสดุนั้นกลับมามีรูปร่างเดิมเราก็ต้องให้แรงดัดกลับเช่นกัน อย่างไรก็ตามมีโลหะบางชนิดที่มีความสามารถพิเศษกล่าวคือสามารถจำและเปลี่ยนกลับคืนรูปร่างเดิมก่อนการแปรรูปได้ ถ้าเราทำให้โลหะนั้นร้อนขึ้นหรือเย็นลงอย่างพอเหมาะสมควรที่เราสามารถนำลวดที่ทำจากโลหะที่มีสมบัติดังกล่าวซึ่งเดิมเป็นเส้นตรงมาดัดให้โค้งงอที่อุณหภูมิห้องแล้วนำลวดที่งอไปทำให้ร้อนขึ้น (เช่น แช่จุ่มในน้ำร้อน) จะพบว่าลวดดัดตัวกลับเป็นเส้นตรงได้อย่างน่าทึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าปรากฏการณ์จำรูป (Shape memory effect) และโลหะที่มีสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่าโลหะผสมจำรูป (Shape Memory Alloys) [9] โดยทั่วไปโลหะผสมจำรูปจะมี 2 เฟส คือเฟสที่อยู่ในอุณหภูมิสูงเรียกว่า เฟสออสเทนไนต์ และเฟสที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำเรียกว่า เฟสมาร์เทนไซต์ ตัวอย่างการนำวัสดุประเภทนี้ไปใช้งาน เช่น เสาอากาศโทรศัพท์ วาล์วเปิดปิดน้ำ เป็นต้น

2.2.1 ประวัติความเป็นมา

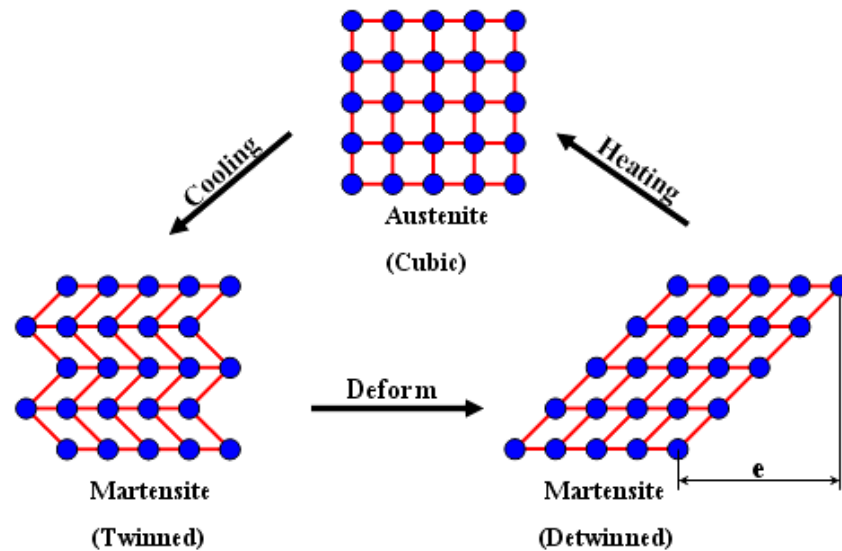
ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์จำรูปในโลหะผสมมาเป็นเวลานานกว่า ปีมาแล้ว 60 โดยช่วงที่สำคัญอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์จำรูปในโลหะผสม [9]

ปีที่พบ	ชนิดของโลหะผสม	ผู้ค้นพบ
ค.ศ.1932	ทอง แคดเมียม-(Au-Cd)	Chang และ Read
ค.ศ. 1938	ทองแดง สังกะสี-(Cu-Zn) หรือทองเหลือง (Brass)	-- ไม่ระบุ --
ค.ศ. 1961	นิกเกิล ไททาเนียม-(Ni-Ti)	Buehler และเพื่อนร่วมงาน

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบปรากฏการณ์จำรูปในโลหะกลุ่มอื่นๆอีกหลายชนิดเช่น Ti-Nb, Au-Cd, Cu-Sn, Fe-Pt, Ni-Al, U-Nb, Fe-Mn-Si, Ti-Pd-Ni, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Sn และ Cu-Al-Ni เป็นต้น โลหะผสมจำรูปนิกเกิล -ไทเทเนียมได้รับการพัฒนาขึ้นในต้นทศวรรษที่ 1961 โดยห้องทดลองของสรรพาวุธทหารเรือสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้ในการกิจขององค์การอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NASA) โดยใช้ชื่อว่า Nitinol อันเป็นชื่อที่ประกอบด้วยคำว่า Ni มาจากนิกเกิล Ti มาจากไทเทเนียม และ nol

มาจาก Naval Ordnance Laboratory อันหมายถึงห้องทดลองสรรพาวุธทหารเรือ [10] โลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียมมีเฟสที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และมีการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสของแข็งและการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมในโครงสร้างผลึกดังรูปที่ 2.11



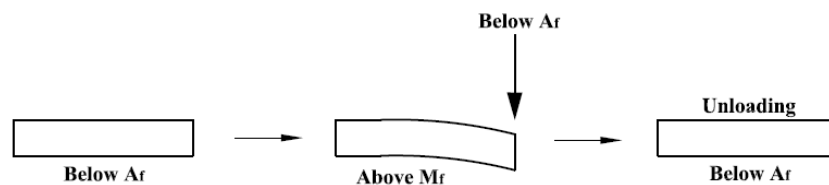
รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในโลหะผสมจำรูป [11]

ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโลหะผสมจำรูปมีโครงสร้างแบบทวินด์มาร์เทนไซต์ (Twinned martensite) เมื่อทำการตัดแปดรูปร่างของชิ้นงานโลหะผสมจำรูป นอกจากลักษณะของวัสดุที่เปลี่ยนไปแล้ว โครงสร้างภายในจะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่ถูกเปลี่ยนรูปร่าง (Deformed martensite) เมื่อเราทำให้ชิ้นโลหะร้อนขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่งเรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนรูป (Transformation temperature) โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ โดยรูปร่างของวัสดุที่ปรากฏต่อสายตาจะมีลักษณะเหมือนกับรูปร่างของวัสดุก่อนการแปรรูป แม้ว่าออสเทนไนต์และทวินด์มาร์เทนไซต์จะมีโครงสร้างต่างกันก็ตาม เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงมาโครงสร้างของวัสดุจะกลับไปเป็นทวินด์มาร์เทนไซต์อีกครั้ง จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นตลอดทั้งกระบวนการทำให้โลหะผสมจำรูปสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนถูกเปลี่ยนรูปร่าง โดยเฉพาะทางทันตกรรมกำลังนิยมใช้ลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิลไทเทเนียมกันมาก เนื่องจากเป็นลวดที่ให้แรงน้อยและต่อเนื่อง เนื่องจากช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นค่อนข้างกว้าง ทำให้ความถี่ในการเปลี่ยนลวดจัดฟันลดน้อยลงเมื่อเทียบกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และมีสมบัติที่ใกล้เคียงตามหลักการในการให้แรงของการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน ทำให้ผู้ป่วยมีความเจ็บปวดน้อยที่สุด และผลการรักษามีประสิทธิภาพ โดยอาศัยสมบัติหลักของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม 2 อย่างดังนี้

1. Shape memory effect : ถูกค้นพบครั้งแรกในโลหะผสม Au-Cd ในปี ค.ศ. 1932 หลังจากนั้นค้นพบโลหะผสมในกลุ่มของกุ่มทองแดงในปี ค.ศ. 1938 และค้นพบโลหะผสมในกลุ่มของ Ti-Ni ใน

ปี ค.ศ. 1961 [9] นับจากนั้น โลหะผสมจำรูปเป็นที่สนใจและมีการวิจัยเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปมีความเชื่อว่า Shape memory effect , SME มีความเกี่ยวข้องกับ Thermoelastic martensite transformation ซึ่งการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกจะเป็นแบบทวิน (Twins) โดยทั่วไป SME จะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า M_f เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงที่มากระทำจะสามารถกลับคืนรูปเดิม โดยการให้ความร้อน กลไกการจำรูปสามารถอธิบายได้ โดยเริ่มจากเฟสออสเทนไนต์หรือ Parent phase ถูกลดอุณหภูมิจะมีการจัดเรียงตัวของ Variant แล้วได้เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้ Twin boundary มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้รูปร่างของวัสดุเปลี่ยนแปลงโดยโครงสร้างภายในยังเป็นมาร์เทนไซต์อยู่ แต่เมื่อให้ความร้อนจนกระทั่งกลายเป็นเฟสออสเทนไนต์ วัสดุก็จะกลับมาเป็นรูปร่างเดิม โดยถ้าลดอุณหภูมิวัสดุก็จะกลายเป็น เฟสมาร์เทนไซต์ตามเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายนอกเปลี่ยนแปลงเฉพาะ โครงสร้างภายใน แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีความเครียดมากเกินไปก็จะเกิดการเลื่อนไถล (Slip deformation) ซึ่งเป็นตัวยับยั้ง กระบวนการย้อนกลับและเป็นผลให้เกิดการจำรูปที่ไม่สมบูรณ์

2. Superelasticity : สมบัติของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการใส่แรง (Loading) ที่อุณหภูมิสูงกว่า A_f (Reverse martensite finish transformation temperature) โดย Variant จะมีการจัดโครงสร้างเป็น โครงสร้างมาร์เทนไซต์ภายใต้แรงเค้น โดย Variant จะมีทิศทางเดียวกัน เรียกแรงที่มากระทำว่ามาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยความเค้น (Stress-induced martensite หรือ SIM) นอกจากนี้มาร์เทนไซต์แบบนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นออสเทนไนต์ได้โดยเพียงลดความเค้นที่กระทำอยู่เท่านั้น ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาเป็น โลหะยืดหยุ่นยิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องก็คือ โลหะผสมจำรูปที่มีอุณหภูมิ A_f ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนั่นเอง ดังนั้นโลหะผสมจำรูปดังกล่าวจึงมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ในสภาพปกติ เมื่อมีแรงกระทำเฟสออสเทนไนต์จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ และเมื่อปล่อยแรงกระทำเฟสมาร์เทนไซต์จะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟสออสเทนไนต์เหมือนเดิม



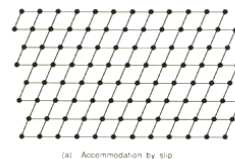
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของความยืดหยุ่นยิ่งยวด (Superelasticity) [12]

โดยทั้งสองสมบัตินี้มีความสำคัญในการรักษาผู้ป่วยในแต่ละอาการแตกต่างกันไป ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับ ส่วนผสมของนิกเกิล-ไทเทเนียมเพื่อใช้งานทันตกรรมโดยตรงยังหาได้ยาก และเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดสมบัติของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม ให้มีสมบัติเป็น Shape memory effect และ Superelasticity

2.2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite transformation)

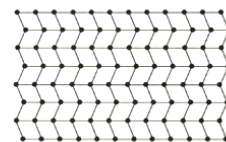
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของของแข็งมี 2 ประเภทคือแบบการแพร่ (Diffusion) และแบบการแทนที่ (Displacive) การเปลี่ยนแปลงแบบการแพร่ (Diffusional transformation) คือการที่อะตอมจะเคลื่อนที่ในโครงผลึกจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ถ้าอะตอมนั้นมีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) อย่างเพียงพอ ซึ่งพลังงานดังกล่าวได้รับจากการสั่นสะเทือนของอะตอมเนื่องจากความร้อน [13] และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอีกประเภทหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงแบบแทนที่ (Displacive transformation) การเปลี่ยนแปลงแบบนี้จะจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอม โดยไม่มีการจับพันธะใหม่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงแบบ แทนที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะเกิดจากการลดอุณหภูมิจากโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงที่เรียกว่า ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือ Parent phase นิยามที่ชัดเจน ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนคำว่ามาร์เทนไซต์ และ ออสเทนไนต์ ซึ่งเดิมนิยามถึงการเรียกชื่อเฟสของเหล็ก แต่ตอนนี้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นการเปลี่ยนแปลงลำดับแรกหมายความว่า จะมีการปล่อยความร้อนออกมา เมื่อมีการจัดโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ และในทางกลับกันการเปลี่ยนเฟสกลับจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์จะต้องมีช่วง Temperature hysteresis อยู่ด้วย กล่าวโดยสรุปว่า สิ่งที่อยู่อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์คือ จะมีการจัดเรียงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เนื่องจากการลดอุณหภูมิ โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูงถูกลดอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ [12] อีกส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในกรณีเกิดแรงเค้นเฉือน (Shear stress) โดยจะกล่าวเฉพาะขั้นตอนการจัดเรียงตัว การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยแรงเฉือนในเหล็ก จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งรูปร่างและปริมาตร ในขณะที่โลหะจำรูปเช่น Ti-Ni จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างอย่างเดียว โดยทั่วไปกลไกการเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 กลไกคือ การเกิดการเลื่อนไถล (Slip) ดังรูปที่ 2.13ก และการเกิดทวิน (Twinning) ดังรูปที่ 2.13ข การเกิดการเลื่อนไถลเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร แต่การเกิดทวิน เป็นกระบวนการทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมและแขนของอะตอมจะอยู่ติดกับตำแหน่งเดิมได้ ซึ่งเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นในโลหะผสมจำรูปตัวอย่างในรูปที่ 2.14

(ก) การเกิดการเลื่อนไถล



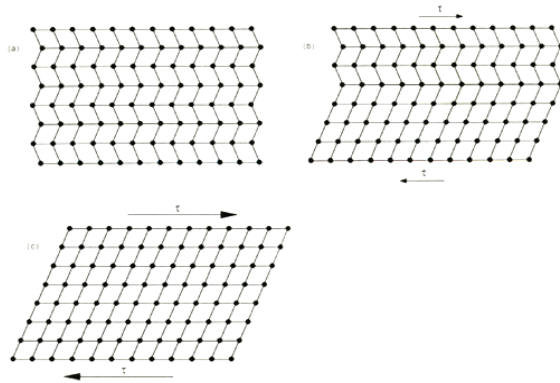
(a) Accommodation by slip

(ข) การจัดเรียงตัวแบบทวิน



(b) Accommodation by twinning

รูปที่ 2.13 รูป (ก) การเกิดการเลื่อนไถล รูป (ข) การจัดเรียงตัวแบบทวิน [12]



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของ Twin Boundary [12]

แสดงให้เห็นถึงผลของการเคลื่อนที่ของ Twin boundary เพื่อให้เกิดการเรียงตัวใหม่ให้มีทิศทางเดียวกัน โดยอาศัยแรงเค้นเฉือน การเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันนี้เองทำให้รูปร่างของวัสดุเปลี่ยนไป โดยในการมองเห็นจะเห็นเสมือนว่าวัตถุได้เปลี่ยนไปอย่างถาวร แต่ไม่ได้เป็นกลไกของการเลื่อนไถล

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม [14]

สมบัติทางกายภาพของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม	
Density (g/cm ³)	6.4-6.3
Melting point (°C)	1250
Thermal conductivity (W/mK)	
martensite	8.6-10.0
parent phase	18
Electrical resistivity(×10 ⁻⁶ Ωm)	
martensite	0.5-0.6
parent phase	0.82-1.1
Co. thermal expansion(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	
martensite	6.6
parent phase	10.0-11.0
Specific heat capacity(J/kgK)	470-620
Enthalpy of transformation(J/kg)	19.0-28.0
Transformation temperature range (°C)	-200-120
Corrosion performance	Excellent

Bio-compatibility	Excellent
-------------------	-----------

สมบัติทางกลของโลหะผสมนิกเกิล-ไทเทเนียม	
Young's modulus ($\times 10^9$ N/m ²)	
martensite	28-41
parent phase	70-97
Yield strength ($\times 10^6$ N/m ²)	
martensite	70-140
parent phase	195-690
Ultimate tensile strength ($\times 10^6$ N/m ²)	
martensite	895
parent phase	1900
Elongation at failure (%)	
Fully annealed	25-50
Work hardened	5-10
Hot workability	Poor-fair
Cold workability	Poor
Machinability	Poor

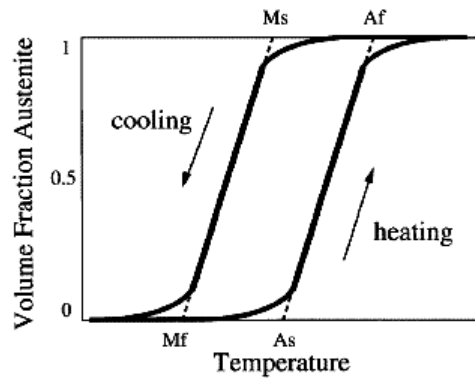
ที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีโครงสร้างเป็นผลึกคู่ ต่อมาถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอีกก็จะกลายเป็นเฟสออสเทนไนต์ที่มีระบบผลึกเป็น b.c.c. อุณหภูมิวิกฤติที่เปลี่ยนเฟสจะบอกโดย M_s , M_f , A_s , A_f

โดย M_s คือ อุณหภูมิที่ Martensite เริ่มต้น

M_f คือ อุณหภูมิที่ Martensite สิ้นสุด

A_s คือ อุณหภูมิที่ Austenite เริ่มต้น

A_f คือ อุณหภูมิที่ Austenite สิ้นสุด



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์และเฟสออสเทนไนต์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะผสมจำรูป [11]

เฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสปกติของโลหะผสมจำรูปนิเกิล-ไทเทเนียม ภายใต้การลดอุณหภูมิให้เย็นลง โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ จนถึงอุณหภูมิ M_f ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์สิ้นสุดลงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายนอก ในช่วงการเกิด Deformation ระบบจะปรับตัวเพื่อให้พลังงานน้อยที่สุดโดยการปรับตัวเข้าสู่ Twinning structure โดยพันธะระหว่างอะตอมยังคงอยู่เช่นเดิม เมื่อมีการให้อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า A_f (อุณหภูมิที่เฟสออสเทนไนต์สิ้นสุด) โครงสร้างของโลหะผสมจำรูปจะกลับมาอยู่ในรูปเดิมในจุดตั้งต้น [15] การเกิด Transformation temperature จะเป็นในช่วงอุณหภูมิแคบถึงแม้ว่าจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของ Transformation temperature จะใช้เวลานาน และในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากราฟที่แสดงในรูปดังกล่าวมีลักษณะของ Hysteresis loop ซึ่งการเกิด Transformation ในช่วง Heating และ Cooling จะไม่ซ้อนทับกัน โลหะผสมจำรูปนิเกิล-ไทเทเนียมจะมีสมบัติพิเศษที่ทำหน้าที่คล้ายกับ Thermal actuator เช่น วัสดุการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและสามารถให้งานได้ นิเกิล-ไทเทเนียมจะมีค่า Shear modulus เปลี่ยนแปลงมากในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและค่าโมดูลัสนี้เอง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงจากเฟสมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ ในทางโลหะวิทยาสมบัติของโลหะผสมจำรูปนิเกิล-ไทเทเนียมทั้งสองลักษณะที่กล่าวมาแล้วสามารถอธิบายได้ว่าโลหะผสมจำรูปนิเกิล-ไทเทเนียมมีลักษณะของผลึกโลหะหลักๆอยู่ เฟส 2(Phase) ได้แก่ ออสเทนไนต์ และมาร์เทนไซต์ เฟสออสเทนไนต์เป็นลักษณะปกติของโลหะผสมจำรูป ซึ่งเฟสนี้จะเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสและมีลักษณะผลึกเป็น body-centered cubic (bcc) ส่วนเฟสมาร์เทนไซต์จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงของอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสอาจมีลักษณะผลึกเป็น hexagonal closed packed (hcp) , monoclinic , triclinic หรือ distorted hexagonal

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง

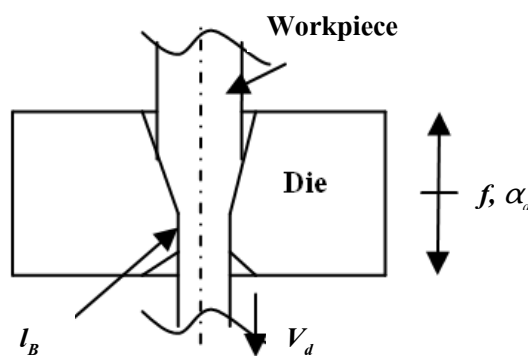
การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายเป็นจำนวนมากมาย โดยเริ่มมีการใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในงานขึ้นรูปโลหะตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 งานขึ้นรูปโลหะที่นำการสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงไปใช้ได้แก่ กระบวนการดึงท่อ กระบวนการดึงลวดและ กระบวนการขึ้นรูปลึก เป็นต้น [18] ในปัจจุบันได้มีการทดลองเกี่ยวกับการขึ้นรูปโลหะโดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ซึ่งผลที่ออกมาคือ แรงในการขึ้นรูปลดลง , แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงานลดลง, ความหยาบผิวและความเที่ยงตรงดีขึ้น [19]

2.3.1 รูปแบบของการสั่นสะเทือน

รูปแบบของการสั่นสะเทือนในกระบวนการดึงลวด แบ่งได้ 2 แบบ คือ การสั่นสะเทือนตามแนวแกน (axial vibration) (AUD) และการสั่นสะเทือนตามแนวขวาง (Transversely vibration) (TUD)

2.3.1.1 การสั่นสะเทือนตามแนวแกน

การสั่นสะเทือนตามแนวแกนคือ การสั่นสะเทือนที่ทำให้แม่พิมพ์สั่นในแนวเดียวกันกับทิศทางการดึงลวด ดังแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนตามแนวแกนของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด [20]

โดยที่ α_a = ขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นสะเทือนในแนวแกน

f = ความถี่ของการสั่นสะเทือน

v_d = ความเร็วในการดึงลวด

l_B = ส่วนที่ลดขนาดลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดต้องการของลวดสำเร็จ

จากรูปที่ 2.16 พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกน ทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลง แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงานลดลง คุณภาพผิวดีขึ้น เนื่องจากรูปแบบการสั่นสะเทือนตามแนวแกนช่วยให้สารหล่อลื่นไหลเข้าแม่พิมพ์ได้มากขึ้นกว่าการดึงแบบปกติ (Conventional drawing)

แสดงดังรูปที่ 2.18b แต่การสั่นสะเทือนตามแนวแกน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นบริเวณ die-bearing ส่วนความเร็วในการดึงลวดนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าความเร็วสูงสุดของการสั่นสะเทือนตามแนวแกน โดยความเร็วสูงสุดของการสั่นสะเทือนตามแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$v_a(t)_{max} = 2\pi\alpha_a f \quad (2.11)$$

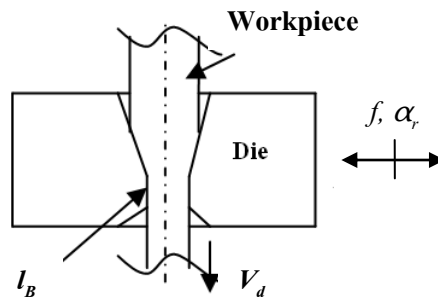
โดยที่ $v_a(t)$ คือความเร็วของการสั่นสะเทือน

f คือความถี่ของการสั่นสะเทือน

t คือที่เวลา t ใดๆ

2.3.1.1 การสั่นสะเทือนตามแนวขวาง

การสั่นสะเทือนตามแนวขวางคือ การสั่นสะเทือนที่ทำให้แม่พิมพ์สั่นในแนวขวางกับทิศทางการดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนตามแนวขวางของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด [20]

โดยที่ α_r = ขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นสะเทือนในแนวขวาง

f = ความถี่ของการสั่นสะเทือน

v_d = ความเร็วในการดึงลวด

I_B = ส่วนที่ลดขนาดลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดต้องการของลวดสำเร็จ

จากรูปที่ 2.17 พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวขวาง จะช่วยให้แรงดึงลดลง ความเสียดทานลดลง ลดการเกิดการยึดติดระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน และสารหล่อลื่นสามารถไหลสู่แม่พิมพ์ได้มากขึ้น เนื่องจากการสั่นสะเทือนในแนวขวางจะทำให้เกิดช่องว่าง ดังแสดงดังรูปที่ 2.18c เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสั่นสะเทือนตามแนวแกนกับการสั่นสะเทือนตามแนวขวาง พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวขวาง ความเร็วในการดึงลวดเพิ่มเป็น 10 เท่าของความเร็วที่ใช้การ

สั้นสะท้อนตามแนวแกน โดยความเร็วสูงสุดของการสั้นสะท้อนตามแนว ขวางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

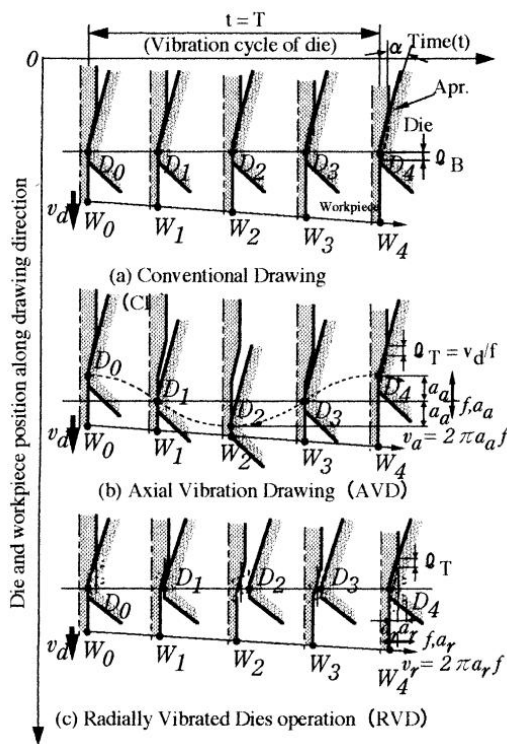
$$v_{CR} = v_r(t)_{max} / \tan \alpha \tag{2.12}$$

โดยที่ $v_r(t)_{max} = 2\pi\alpha_r f$

v_{CR} = ความเร็วสูงสุดของการสั้นสะท้อนตามแนวขวาง

α = ครึ่งมุมการไหลเข้า

สำหรับการดึงลวดขนาดเล็ก เมื่อประยุกต์ใช้การสั้นสะท้อนในแนวขวางพบว่าแอมพลิจูดของการสั้นสะท้อนไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูป [21] เนื่องจากแม่พิมพ์มีรูในเล็ก ดังนั้นจึงต้องแบ่งแม่พิมพ์ออกเป็น 2 ส่วน [22] เพื่อให้ขึ้นรูปลวดได้



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงการเปรียบเทียบการใช้งานของกระบวนการดึงลวดแบบปกติ, AUD, RUD [20]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

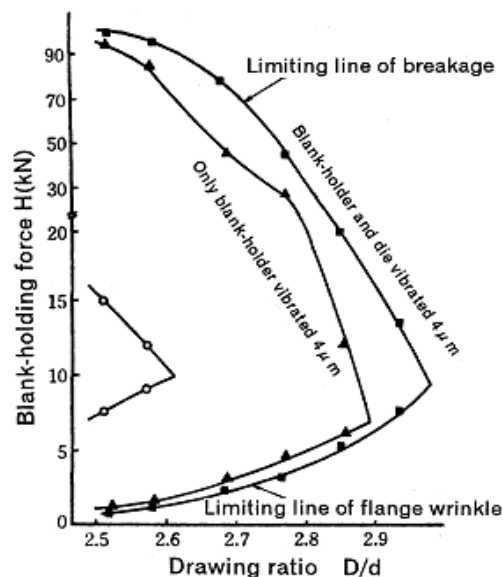
ลวดโลหะผสมจำรูป (SMA) ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้นเรื่อยๆ โดยมีการประยุกต์ใช้จริงเชิงพาณิชย์ในหลายๆด้าน [23] ทั้งด้านการสื่อสาร เช่น การนำสมบัติ Pseudo-elasticity ของลวด SMA มาใช้ประโยชน์ในการทำเสาอากาศโทรศัพท์มือถือ ในส่วนของด้านการกีฬาและบันเทิง เช่นการนำเอาลวด SMA มาทำเป็นสายเบ็ดตกปลา หรือทำเป็น Actuator wire ในเครื่องเล่นแผ่นดิสก์ขนาดพกพา

และด้านการแพทย์ เช่น การใช้ลวด SMA ทำลวดตัดฟัน เป็นต้น การผลิตลวดโลหะผสมจำรูปใช้กระบวนการดึงลวด โดยมีงานวิจัยที่ใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูงกับกระบวนการดึงลวดเป็นจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นในการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตและสมบัติของลวดโลหะผสมจำรูปสำหรับใช้ในงานทันตกรรมจัดฟัน ดังนั้นผู้วิจัยขอกล่าวถึงงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ส่วนของการขึ้นรูปโดยใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูง
2. ส่วนของลวดโลหะผสมจำรูป

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปโดยใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูง

2.4.1.1. ในปีค.ศ. 1998 Takashi Jimma และคณะ [24] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูงในกระบวนการขึ้นรูปลึง ซึ่งงานวิจัยนี้กล่าวถึงการขึ้นรูปลึงโดยนำการสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูงมาใช้ โดยโลหะแผ่นที่ใช้ขึ้นรูปคือเหล็กกรีดเย็นสำหรับงานขึ้นรูปลึง (SPCE), เหล็กกรีดเย็น (SPCC) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) สารหล่อลื่นที่ใช้คือเทฟลอน จากผลที่ออกมาพบว่าการใช้การสั้นสะเทือนกับแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) และคายจะทำให้ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด (LDR) เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงผลที่เกิดจากการขึ้นรูปลึงของ SPCC [24]

จากรูปที่ 2.19 ค่า LDR ขณะไม่ใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูง มีค่า 2.58 เมื่อประยุกต์ใช้การสั้นสะเทือนด้วยความถี่สูงในแนวรัศมีกับแผ่นจับยึดชิ้นงานอย่างเดียวและใช้ทั้งแผ่นจับยึดชิ้นงานและคาย พบว่าทำให้ LDR มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.86 และ 2.94 ตามลำดับ เนื่องจากแผ่นฟิล์มน้ำมันสามารถ

ไหลตัวได้ทั่วชิ้นงาน สรุปลงได้ว่าการใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในงานขึ้นรูปลึก ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้น

2.4.1.2 ในปีค.ศ. 1999 M. Jin และคณะ [4] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงในงานขึ้นรูปโลหะ เช่น การขึ้นรูปท่อ การลากขึ้นรูปและการรีดลดความหนา เป็นต้น ซึ่งในอดีตนั้นการขึ้นรูปโลหะนั้นจะใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูง แต่เมื่อนำไปใช้ในการขึ้นรูปนั้นพบว่าสารหล่อลื่นที่ใช้นั้น ได้ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการคุมเข้มในการใช้สารหล่อลื่นเพื่อจะแก้ปัญหาจึงใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ แต่ผลที่ออกมาคือการขึ้นรูปโลหะไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงมาใช้กับงานดึงท่อ งานขึ้นรูปลึก และงานรีดลดความหนา ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในงานรีดลดความหนา แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองรีดลดความหนา [4]

Frequency	$f = 14.8 \text{ kHz}$
Amplitude measured	$a_x = 15 \mu\text{m}$ and $a_y = 15 \mu\text{m}$ (under no load condition)
Ironing speed	$v_i = 38 \text{ mm/s}$
Lubricants	1. Press oil (Viscosity $\approx 1473 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) 2. Emulsion type water- soluble oil (10% dilution, Viscosity $\approx 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) 3. Solution type water- soluble oil (10% dilution, Viscosity $\approx 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C)
Work materials	Aluminum (A1050-H24) : $\sigma_B = 185 \text{ MPa}$, $\psi = 4\%$ Steel (SPCE) : $\sigma_B = 345 \text{ MPa}$, $\psi = 25\%$
Blank thickness (T_h) and RRWT	$T_h \text{ (mm)} < \text{RRWT}(\%) >$ 1.0 <25.0>, 1.2 <37.5>, 1.3 <42.3>, 1.4 <46.4>, 1.5 <50.0>, 1.6 <53.1>, 1.7 <55.9>, 1.8 <58.3>

σ_B : Tensile strength (MPa), ψ : Elongation (%)

RRWT : Reduction Ratio of Wall Thickness (%)

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้การสั่นสะเทือนตามแนวรัศมีกับงานรีดลดความหนา สามารถรีดลดความหนาได้มากกว่าแบบที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงแสดงตามตารางที่ 2.4 เพราะว่าแม่พิมพ์กับชิ้นงานมีช่องว่างเกิดขึ้น ทำให้สารหล่อลื่นสามารถไหลตัวลงไปได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าLRRWT สำหรับงานรีดลดความหนา เมื่อใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวรัศมีและไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวรัศมี [4]

(a) Aluminum (A1050-H24)

T_k mm	RRWT %	Press		Emul		Solut		No-lub	
		CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	○	○
1.3	42.3	○	○	○	○	○	○	○	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	x	○
1.5	50.0	○	○	x	○	x	○	x	x
1.6	53.1	○	○	x	○	-	x	-	-
1.7	55.9	x	○	x	x	-	x	-	-
1.8	58.3	-	x	-	-	-	-	-	-

(b) Steel (SPCE)

T_k mm	RRWT %	Press		Emul		Solut		No-lub	
		CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	x	○
1.3	42.3	○	○	○	○	○	○	x	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	x	○
1.5	50.0	○	○	○	○	x	○	x	x
1.6	53.1	x	○	x	x	-	x	-	-
1.7	55.9	-	x	-	-	-	-	-	-

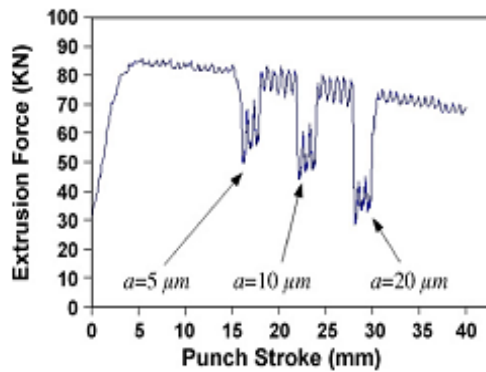
T_k : plate thickness (mm)
 Press : Press oil, No-lub : No-lubrication
 Emul : Emulsion type water-soluble oil
 Solut : Solution type water-soluble oil
 ○ : Success of Ironing, x : Failure of ironing

ส่วนในงานดึงท่อเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองและผลที่ออกมาแสดงดังตารางที่ 2.5 ผลที่ออกมาพบว่าความเรียบผิวและความเที่ยงตรงดีขึ้น อีกทั้งแรงที่ในการขึ้นรูป ลดลง สรุปได้ว่าการใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงกับงานรีดลดความหนา และงานดึงท่อ ทำให้แรงที่ในการขึ้นรูปลดลง และคุณภาพชิ้นงานที่ออกมาที่ดีขึ้นด้วย

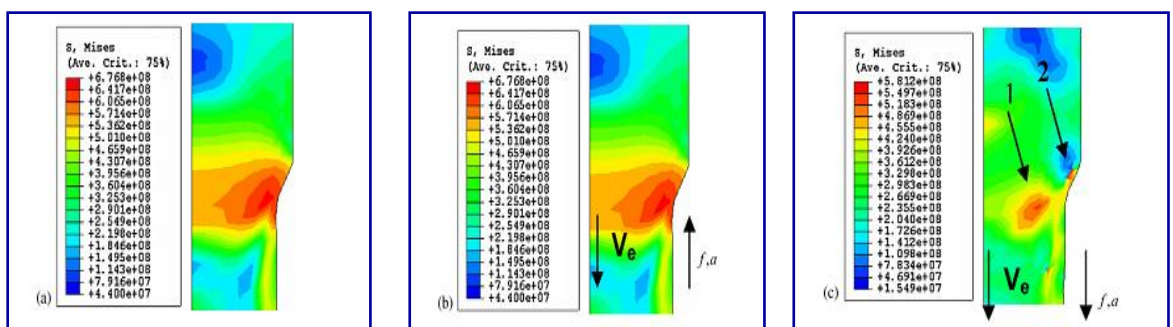
ตารางที่ 2.5 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการดึงท่อ โดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง [4]

Vibration condition	Die	Frequency	15.1 kHz
		Amplitude	20 μm (under no load)
	Plug	Frequency	14.8 kHz
		Amplitude	2.5 μm (under no load)
Workpiece material	Aluminum A1100-O $\sigma_B = 93.0 N/mm^2$, Elongation = 37.8%		
Tool material	Die	WC-Co alloy	
	Plug	SKD11+DLC coating	
Lubricants	DW223C (COSMO OIL Co.,Ltd) (Viscosity : 560 mm^2/s at 40°C)		
Drawing speed	$v = 30 mm/s$		
Reduction ratio of cross section area (R)	25.0%		

2.4.1.3 ในปีค.ศ. 2007 S.A.A. Akbari Mousavi และคณะ [25] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการศึกษาการสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปท่อ โดยการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในแนวแกนกับงานขึ้นรูปท่อ ซึ่งกลไกนี้ยังขาดความเข้าใจกันอย่างลึกซึ้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ไฟไนต์อิลเมนต์ (FEM) เข้ามาช่วยวิเคราะห์ผล โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์หมีแอมพลิจูดที่ใช้ในการสั่นสะเทือนและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป วัสดุที่ใช้คือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (mild steel) ผลที่ออกมาพบว่าเมื่อเพิ่มแอมพลิจูดในการสั่นสะเทือน จะทำให้แรงในการดันขึ้นรูปลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงแรงในการดันขึ้นรูปกับระยะพั้นซ์ที่เคลื่อนที่ โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงที่แอมพลิจูด 5, 10 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ [25]



รูปที่ 2.21 ภาพแสดง von-misses stress [25]

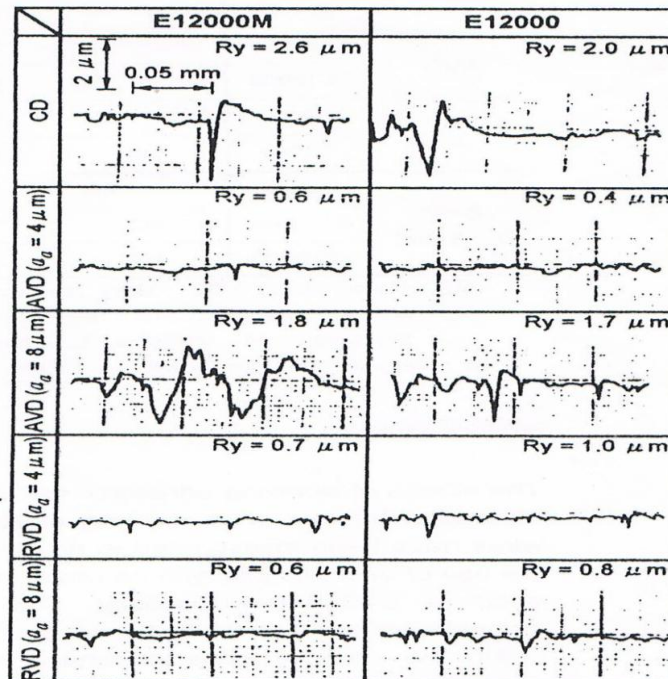
โดย แบบ a คือการดึงท่อแบบปกติ ($V = 40 \text{ mm/s}$)

แบบ b คือการดึงท่อโดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ทิศทางการสั่นตรงข้ามกับทิศทางที่คายเคลื่อนที่ ($V = 40 \text{ mm/s}$, $f = 20 \text{ kHz}$, $a = 10 \text{ μm}$)

แบบ c คือการดึงท่อโดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ทิศทางการสั่นมีทิศเดียวกับทิศทางที่คายเคลื่อนที่ ($V = 40 \text{ mm/s}$, $f = 20 \text{ kHz}$, $a = 10 \text{ μm}$)

จากรูปที่ 2.21 พบว่าแบบ a และ b จะให้ความเค้นสูงสุดเท่ากันคือ 677 MPa เนื่องจากแบบ b จะเกิดการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับคาย ทำให้แรงดึงสูงขึ้น ขณะที่แบบ c ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 580 MPa ซึ่งลดลงประมาณ 14% ซึ่งพบว่าที่บริเวณพื้นที่ 1 ความเค้นในการไหลตัวของวัสดุลดลง เนื่องจากมีช่องว่างเกิดขึ้นที่แม่พิมพ์กับชิ้นงาน สรุปได้ว่าการนำการสันสะเทือนด้วยความถี่สูงไปช่วยให้แรงในการดันขึ้นรูปลดลง

2.4.1.4 ในปี ค.ศ. 2000 Masao Murakawa และคณะ [5] ได้ทำการวิจัยเรื่อง ผิวลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ดึงขึ้นรูปโดยประยุกต์ใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูงร่วมกับการใช้สารหล่อลื่นที่ไม่มีคลอรีนในงานวิจัยนี้ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 303) โดยนำการสันสะเทือนด้วยความถี่สูงมาใช้เพื่อที่จะแก้ปัญหาการยึดติดกันระหว่างแม่พิมพ์กับลวด เนื่องจากลวดชนิดนี้ขึ้นรูปยาก และได้ทำการใช้สารหล่อลื่นที่ไม่มีส่วนผสมของคลอรีน ผลที่ออกมาคือความหยาบผิวของลวดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ภาพแสดงความหยาบผิวของลวด ซึ่งไม่ใช้สารหล่อลื่นที่มีคลอรีน [5]

จากรูปที่ 2.22 พบว่าความหยาบผิวของลวดมีค่าลดลง เมื่อใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูง โดยจะเห็นว่าทั้งแบบ AVD หรือ RVD ก็ให้ความหยาบผิวลดลง แต่ที่แอมพลิจูด 8 ไมโครเมตร แบบ AVD จะให้ความหยาบผิวมากกว่าแบบ RVD เพราะการที่แบบ AVD รับแอมพลิจูดสูงเกิน จะมีปัญหา

เกี่ยวกับการเสียดสีที่รุนแรงระหว่างคานกับชิ้นงานได้ ทำให้เป็นสาเหตุของการเกิดการยึดติดกัน และ galling

2.4.1.5 ในปีค.ศ. 2001 Masao Murakawa และคณะ [20] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกนและแนวรัศมีในกระบวนการดึงลวด ซึ่งงานนี้ได้กล่าวถึงการขึ้นรูปวัสดุที่ขึ้นรูปยาก เช่น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเมื่อทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าเกิดปัญหา คืออายุการใช้งานของแม่พิมพ์น้อยลง เนื่องจากเกิดการยึดติด (Adhesion) ของวัสดุนี้กับผิวแม่พิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปยากมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ นำการสันสะเทือนด้วยความถี่สูงมาใช้กับแม่พิมพ์ เพื่อที่จะแก้ปัญหาข้างต้น โดยเมื่อนำมาใช้ในการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงให้เห็นว่าการใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูง ทำให้สามารถใช้สารหล่อลื่นที่ไม่มีคลอรีนได้ (สารหล่อลื่นที่มีคลอรีน จะล้างออกยากต้องใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม) และสามารถใช้อุณหภูมิที่มีความหนืดต่ำได้อีก โดยแรงดึงลดลงและคุณภาพผิวดีขึ้น ดังแสดงตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลของผิวลวดและแรงที่ใช้ในการดึงลวด [20]

Method	Lubricant	Surface condition ^a	Evaluation ^b	Drawing force ^c
CD	R12000	Luster, VFB	○	L
	E12000M	Luster, FS	△	L
	E12000	Luster, FS	△	L
	E6000	Luster, FS	○	L
	E1000	Luster, MS	×	L
RVD ($\alpha_r = 8 \mu\text{m}$)	R12000	Luster, NS	◎	M
	E12000M	Luster, NS	◎	M
	E12000	Luster, VFB	○	M
	E6000	Luster, VFB	○	M
	E1000	Luster, MS	△	M
AVD ($\alpha_a = 8 \mu\text{m}$)	R12000	Luster, MS	×	S
	E12000M	MS	×	S
	E12000	MS	×	S
AVD ($\alpha_a = 4 \mu\text{m}$)	R12000	Luster, NS	◎	M
	E12000M	Luster, NS	◎	M
	E12000	Luster, NS	◎	M
	E6000	Luster, MS	×	M
	E1000	MS	×	M

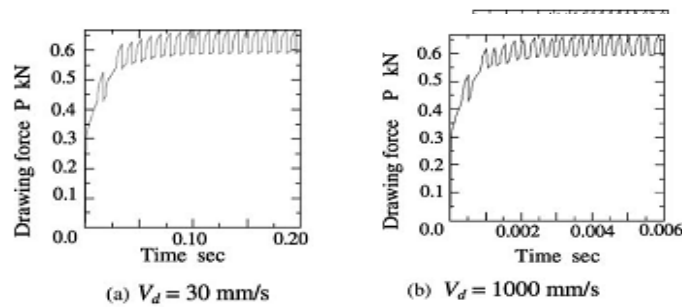
^a NS: no scratch, VFS: very few scratches, FS: a few scratches, MS: many scratches.

^b ◎: very good, ○: good, △: fair, ×: poor.

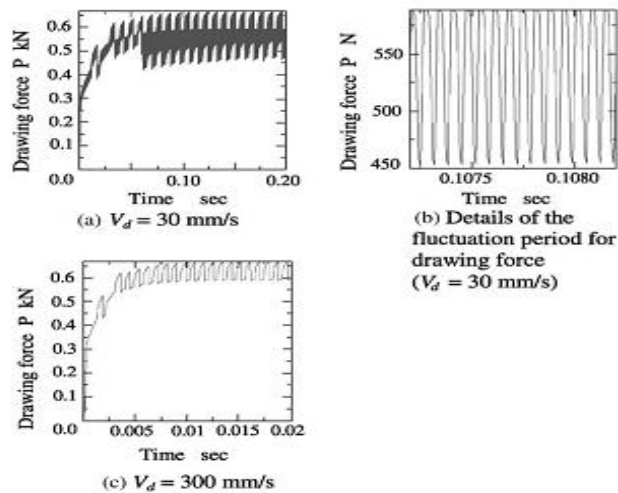
^c S: small, M: medium, L: large.

2.4.1.6 ในปี ค.ศ. 2003 Masahiro Hayashi และคณะ [26] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการจำลองกระบวนการดึงลวดโดยประยุกต์ใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูงผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยในอดีตนั้นได้กล่าวไว้ว่าการดึงลวดโดยใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูงช่วยลดการต้านการขึ้นรูปและปกป้องการขาดของลวด ในอนาคตการดึงลวดโดยใช้วิธีนี้น่าจะสามารถดึงขึ้นรูปวัสดุที่ขึ้นรูปยากได้ เช่น ลวดไทเทเนียม-นิกเกิล แต่วิธีการวิเคราะห์และกลไกการดึงลวดแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่า

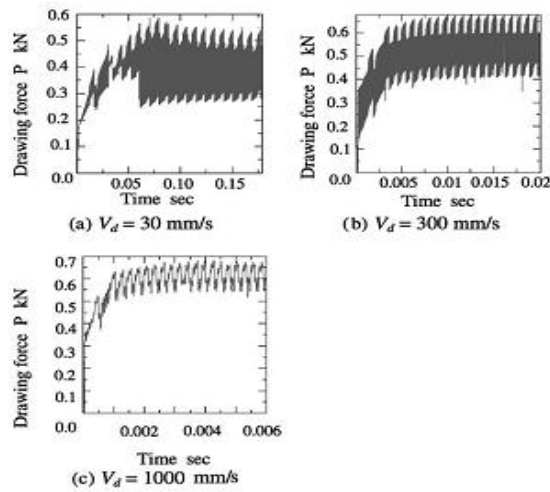
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เข้ามาช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการดึงลวดโดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการดึงกับแรงในการดึงขึ้นรูป และความเค้นของลวด ผลที่ออกมาคือที่ความเร็วในการดึง 30 mm/s แบบ CD ใช้แรงในการดึงเท่ากับ 620 N ขณะที่แบบ AUD และ RUD ใช้แรงในการขึ้นรูปแค่ 450 และ 280 N ตามลำดับ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 2.23, 2.24 และ 2.25 และถ้าเพิ่มความเร็วในการดึงเป็น 300 mm/s แบบ AUD จะใช้แรงในการขึ้นรูปเท่ากับแบบ CD คือ 620 N เพราะที่ความเร็วในการดึงสูงกว่าความเร็ววิกฤต ในขณะที่แบบ RUD ใช้แรงเพียงแค่ 400 N เท่านั้น ส่วนที่ความเร็วในการดึง 1000 mm/s แบบ RUD ก็ใช้แรงในการดึงลวดเท่ากับ 620 N และแสดงให้เห็นว่าการดึงแบบ RUD จะมีความเร็ววิกฤตที่สูงกว่าแบบ AUD



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวดแบบ CD โดยใช้ FEM [26]

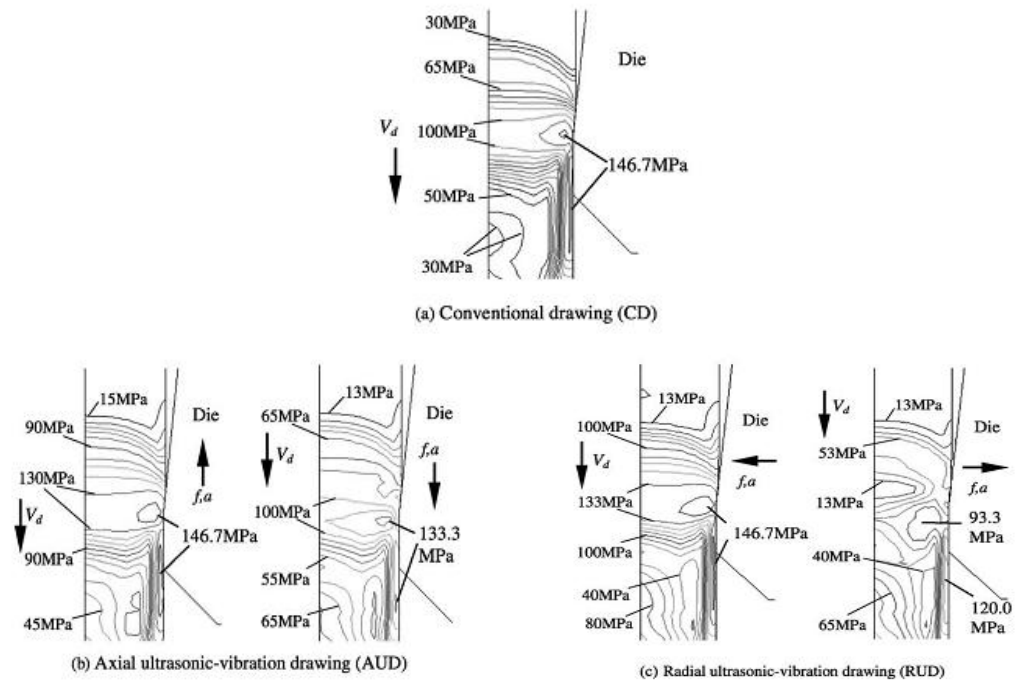


รูปที่ 2.24 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวดแบบ AUD โดยใช้ FEM [26]



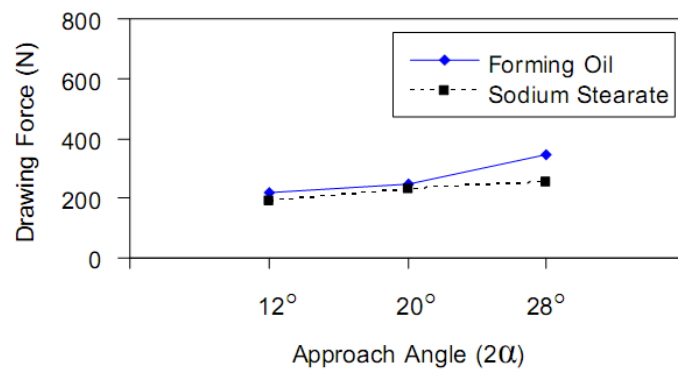
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวด แบบ RUD โดยใช้ FEM [26]

ส่วนความเค้นของลวดพบว่าในการดึงแบบ AUD ถ้าทิศทางการสั่นของแม่พิมพ์มีทิศเดียวกับการดึง ความเค้นจะลดลงเหลือเพียง 133 MPa ส่วนการดึงแบบ RUD นั้นเมื่อทิศทางการสั่นอยู่ในแนวรัศมี ความเค้นจะลดลงเหลือแค่ 93.3 MPa ดังแสดงในรูปที่ 2.26

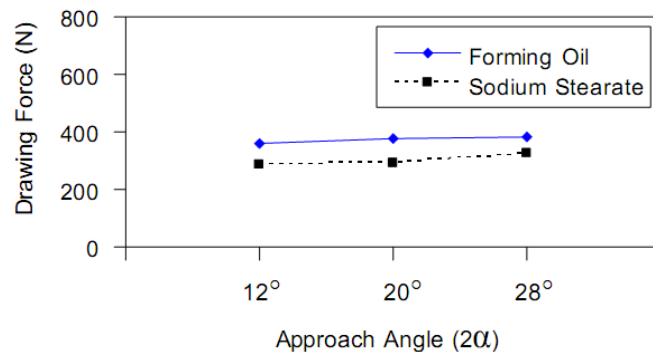


รูปที่ 2.26 ภาพแสดงความเค้นในกระบวนการดึงลวดแบบ CD, AUD และ RUD ($V_d = 300 \text{ mm/s}$) [26]

2.4.1.7 ในปี พ.ศ. 2550 ฉันทฐนันท์ มุลสระคู และคณะ [27] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการดึงลวดโลหะผสมจำรูป $Ti_{49}Ni_{51}$ โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับสารหล่อลื่น อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ลวดกลม $Ti_{49}Ni_{51}$ ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ดึงผ่านแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นที่ใช้มี 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรทและน้ำมันขึ้นรูป ที่อัตราส่วนการลดพื้นที่ 15% และ 25% มุมการไหลเข้าของแม่พิมพ์มี 3 ระดับคือ $12^\circ, 20^\circ, 28^\circ$ ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 15% และ 25% สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรทจะใช้แรงดึงน้อยกว่าแบบน้ำมันขึ้นรูป เนื่องจากสารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรทสามารถรักษาสภาพฟิล์มไว้ได้ ขณะที่น้ำมันสำหรับงานขึ้นรูปมีความหนืดต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการดึงลวด ดังแสดงในกราฟที่ 2.27 และ 2.28 ตามลำดับ



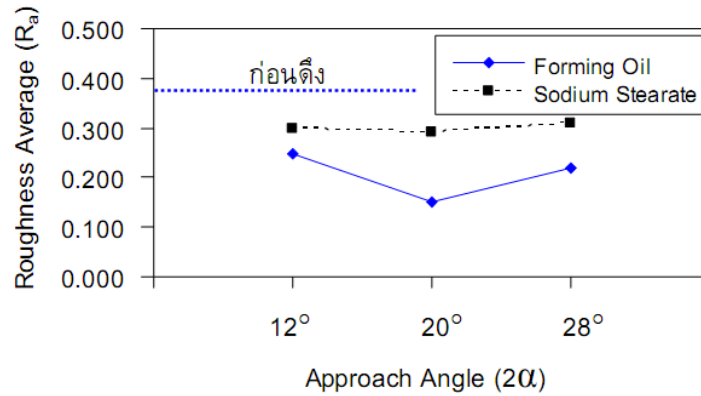
รูปที่ 2.27 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงดึงที่ 15% Red [27]



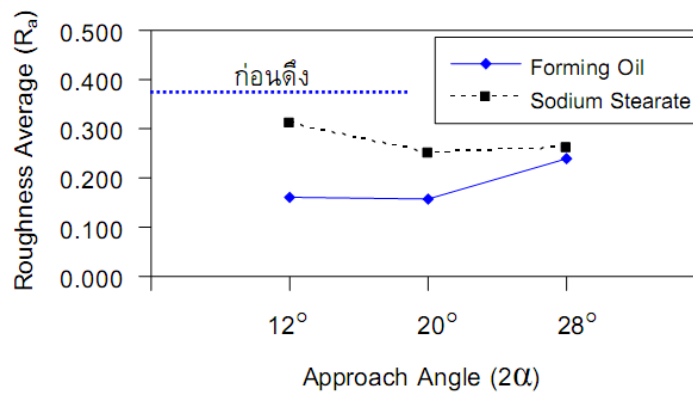
รูปที่ 2.28 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงดึงที่ 25% Red [27]

ในส่วนของความหนายาบผิว สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนายาบผิวน้อยกว่าสารหล่อลื่นที่ใช้ผงโซเดียมสเตียเรท เนื่องจากผงโซเดียมสเตียเรทสามารถป้องกันการสัมผัสกันโดยตรง

ระหว่างผิวแม่พิมพ์และผิวลวดได้ดีกว่า ทำให้การเกิดกลไกการถ่ายผิวระหว่างแม่พิมพ์สู่ผิวลวดไม่ดีเท่าที่น้ำมันสำหรับงานขึ้นรูป ดังแสดงในกราฟ 2.29 และ 2.30 ตามลำดับ

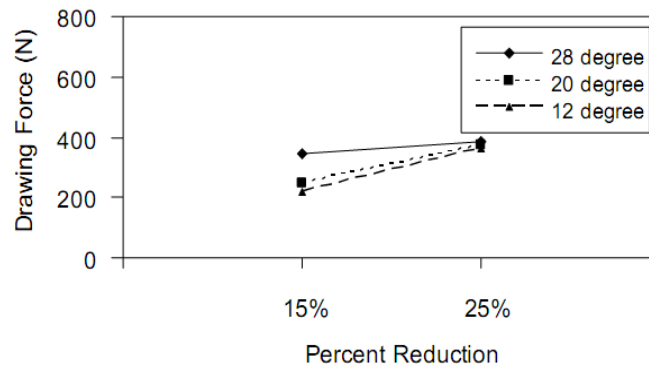


รูปที่ 2.29 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงที่ 15% Red [27]

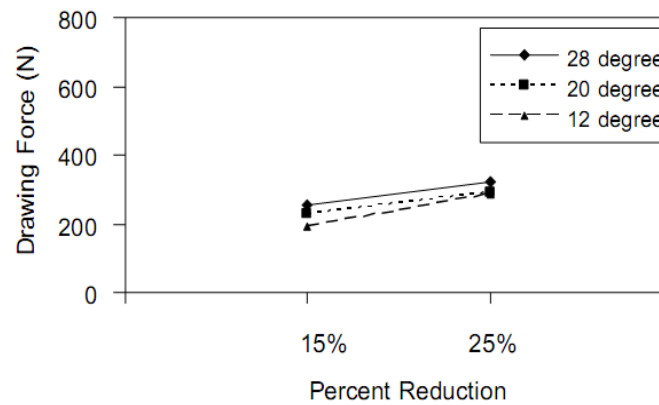


รูปที่ 2.30 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงที่ 25% Red [27]

ส่วนของมุมการไหลเข้าของแม่พิมพ์พบว่าเมื่อมุมการไหลเข้ามาก จะทำให้แรงในการดึงลวดมากขึ้น ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุหรืออิทธิพลของรีดันแดนท์ (redundant) ดังแสดงในกราฟที่ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ

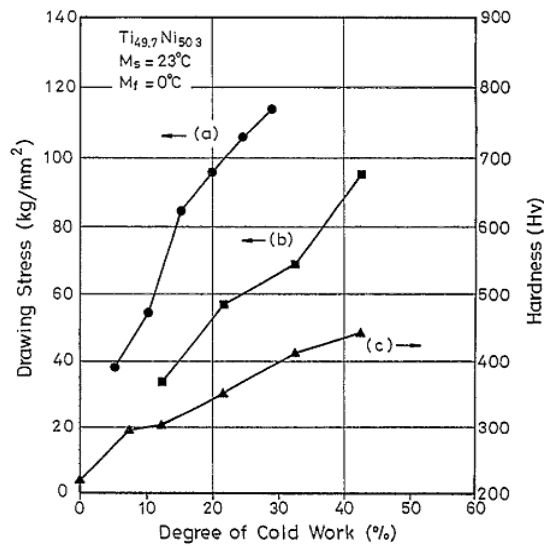


รูปที่ 2.31 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงดึงลวดโดยใช้น้ำมัน สำหรับการขึ้นรูป [27]

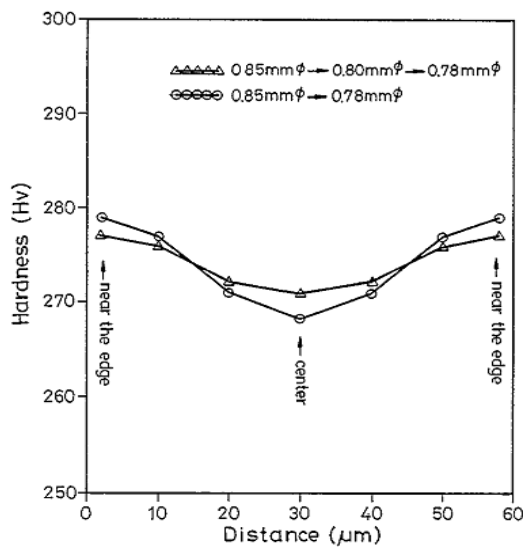


รูปที่ 2.32 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรท [27]

2.4.1.8 ในปี ค.ศ. 1996 S.K. Wu และคณะ [3] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการศึกษาดึงลวดโลหะผสมจำรูปไทเทเนียมกิกิล โดยงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของลวด SMA ที่กระบวนการดึงที่เงื่อนไขต่างๆ โดยลวดที่ใช้มี $Ti_{50}Ni_{50}$, $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$, $Ti_{49}Ni_{51}$ ขึ้นงานทดสอบขนาด $\phi 1.2\text{mm} \times 300\text{ mm}$ ผลที่ออกมาจะพบว่าลวดที่ดึงผ่านคานตัวเดียว จะมีค่าแรงดึงลวดมากกว่าดึงผ่านคานหลายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.33 และการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์หลายตัว ลวดที่ออกมาจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันดีกว่าดึงผ่านแม่พิมพ์อันเดียว ที่เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงแรงในการดึงลวดของ $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$ โดย (a) คือ ดึงขึ้นตอนเดียว (b) คือดึงหลายขึ้นตอน และ (c) ความแข็งของชิ้นงาน ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดต่างๆ [3]



รูปที่ 2.34 กราฟแสดงความแข็งของลวด $Ti_{50}Ni_{50}$ [3]

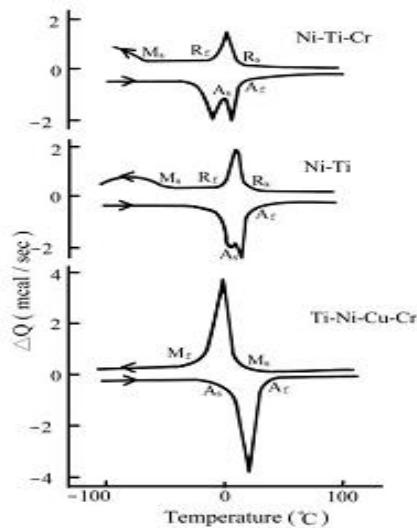
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลวดโลหะผสมจํารูป

2.4.2.1 ในปี ค.ศ. 2002 M. Iijima และคณะ [2] ได้ทำงานวิจัยเรื่องพฤติกรรมทางกลที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันและความเค้นของลวดจัดพันไทเทเนียมนิกเกิลที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่ต่างกัน เพื่อศึกษาหาสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมจํารูปที่ใช้ในงานทันตกรรมจัดฟันโดยทำการทดสอบ DSC โดยลวดที่ใช้มีขนาด 0.016×0.022 in ส่วนผสมของลวดที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของลวดโลหะผสมจำรูปที่มีสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด [2]

Alloys	Ni	Ti	Cr	Cu	Wire product (commercial name)
Ni-Ti-Cr	51.4*	48.4*	0.19**	-	Ni-Ti
Ni-Ti	50.7*	49.3*	-	-	Sentalloy
Ti-Ni-Cu-Cr	45.1*	49.6*	0.29**	4.97**	Copper Ni-Ti 40°C

ผลจากการทดสอบ DSC พบว่ามาร์เทนไซต์เริ่มต้นของ Ti-Ni-Cu-Cr จะมีค่าสูงกว่าลวดชนิดอื่น ขณะที่อุณหภูมิสุดท้ายของ Ni-Ti-Cr, Ni-Ti และ Ti-Ni-Cu-Cr จะมีค่าอยู่ที่ 16, 22 และ 37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสุดท้ายของลวด Ni-Ti-Cr จะมีค่าต่ำกว่าลวด Ni-Ti เนื่องจากผลของโครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 2.35

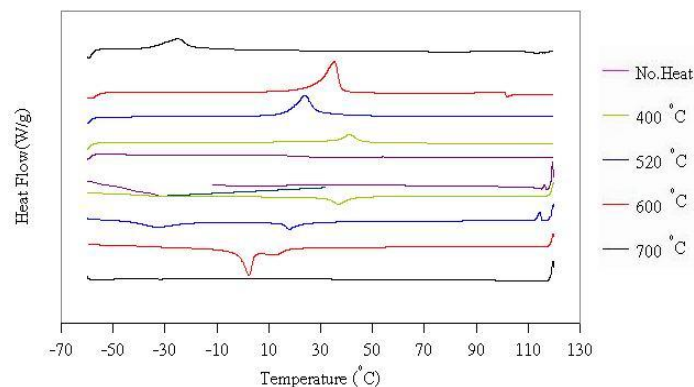


รูปที่ 2.35 กราฟแสดงการทดสอบ DSC ของลวดโลหะผสมจำรูปทั้งสามชนิด [2]

2.4.2.2 ในปี พ.ศ. 2548 นายอภิวัฒน์ มิ่งทรงสนธิ์และคณะ [28] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมจำรูป โดยนำโลหะผสมจำรูปที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่างดังนี้ $Ti_{49}Ni_{51}$ Ø 1 mm, $Ti_{50}Ni_{47}Cu_3$ Ø 1 mm, $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ Ø 1 mm และ $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ Ø 0.5 mm วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของโลหะผสมจำรูป การดำเนินการทดลองจะแบ่งอุณหภูมิที่จะศึกษาออกเป็น 7 ค่า ดังนี้ 800, 700, 600, 520, 500, 400 และ 300 °C โดยอบเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงในบรรยากาศอาร์กอน จากนั้นนำชิ้นทดสอบชุบน้ำทันที นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับลวดที่ไม่ได้ทำการอบด้วย หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแล้ว นำลวดที่ได้มาทดสอบการดึง เพื่อหาสมบัติทางกล โดยจะพบว่าโลหะ

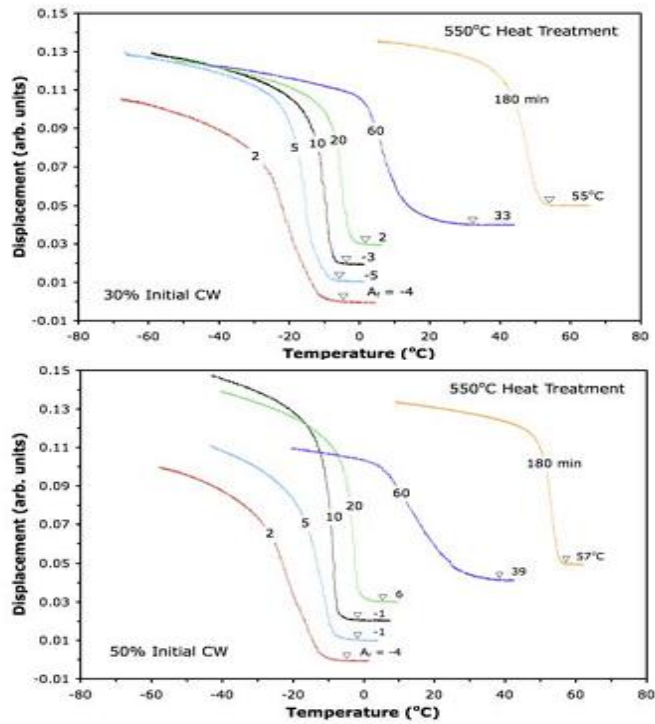
ผสมจํารูปที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C จะมีสมบัติทางกลตามทฤษฎีของโลหะผสมจํารูป กล่าวคือจะมีช่วงอิลาสติก 2 ช่วง จากการทดสอบแรงดึงในเชิงของงานขึ้นรูปโลหะพบว่าโลหะผสมจํารูปจะมีสมบัติดีสุดเมื่ออบที่อุณหภูมิ 600 °C โดยมีค่า Ultimate tensile strength, Yield strength ลดลง และ % Elongation เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมต่อการขึ้นรูปต่อไป ส่วนการอบที่อุณหภูมิ 300 – 400 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ จะมีค่าความแข็งแรงสูงเนื่องจากได้รับอิทธิพลของ dislocation ซึ่งมีความหนาแน่นสูงเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของเกรน เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมจํารูปแต่ละชนิดพบว่าอุณหภูมิอบจะมีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมจํารูปเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษา DSC เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบที่มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนเฟส โลหะผสมจํารูปที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนตั้งแต่ 400°C จะเริ่มเห็นการเปลี่ยนเฟสในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้ และแนวโน้มของอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจะแปรตามอุณหภูมิอบที่สูงขึ้น แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิอบสูงขึ้นการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสมจํารูปจะเกิดขึ้นง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.36



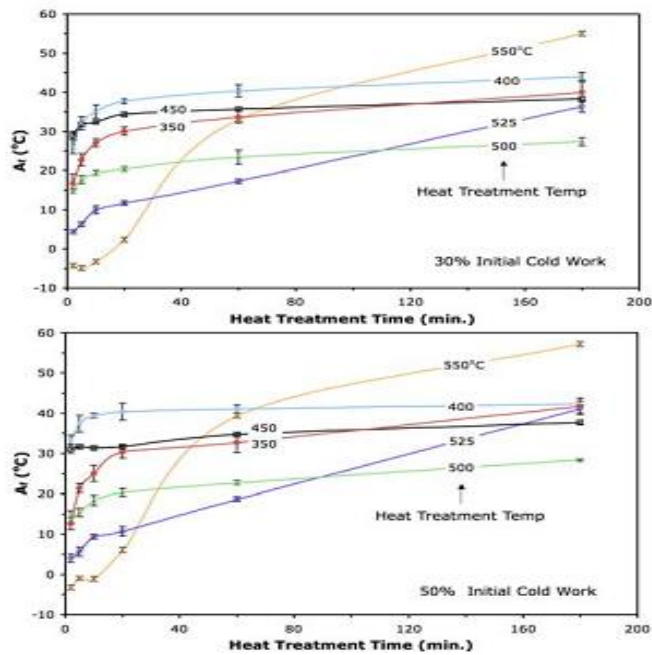
รูปที่ 2.36 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสของโลหะผสมจํารูป $Ti_{49}Ni_{51}$ Ø 1 มิลลิเมตร [28]

2.4.2.3 ในปี ค.ศ. 2007 M. Drexel และคณะ [29] ได้ทำงานวิจัยเรื่องผลของการขึ้นรูปเย็นและการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่มีต่อสมบัติของลวดนิกทินอล โดยศึกษาสมบัติในการเปลี่ยนเฟสและสมบัติทางกลของลวดนิกทินอล (Ti-50.8at%Ni) โดยได้ทำการขึ้นรูปเย็นที่ 30%และ 50% จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450, 500, 525, 550 °C ใช้เวลาในการอบที่ 2, 5, 10, 20, 60 ,180 นาที จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติในการเปลี่ยนเฟส พบว่าเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2-20 นาที ค่า A_f จะลดลงเนื่องจากตะกอนของ Ni-rich ขณะที่ 20-180 นาที ค่า A_f จะเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.37



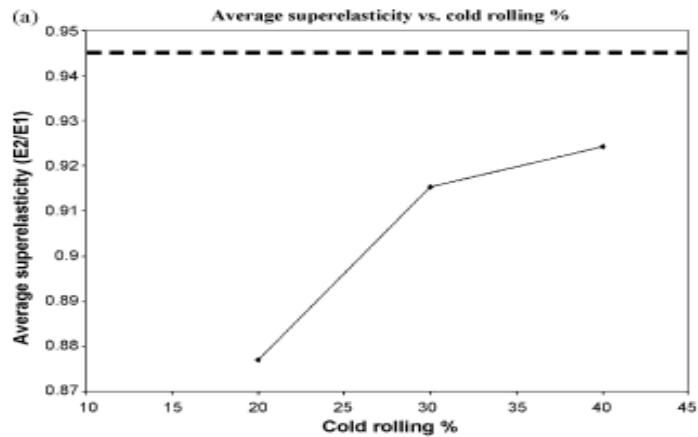
รูปที่ 2.37 กราฟแสดงการอบลวดที่อุณหภูมิ 550 °C ที่ 30%, 50% Red [29]

และที่เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด 30, 50 ค่า A_f ที่ได้มีความคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.38 พบว่าที่อุณหภูมิอบ 400-450 °C ค่า A_f จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตะกอนของ Ni_4Ti_3



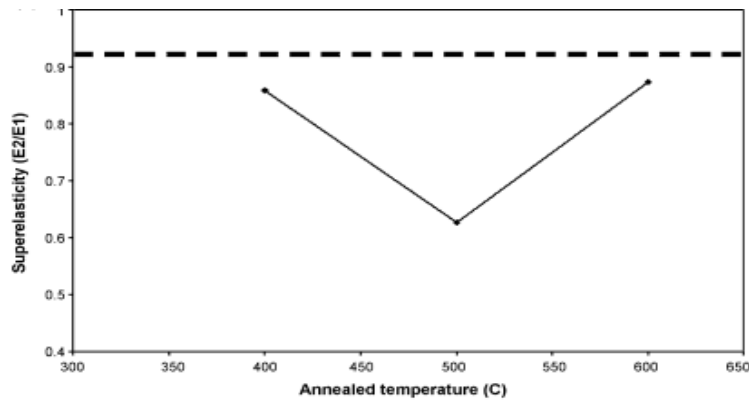
รูปที่ 2.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกับค่า A_f [29]

2.4.2.4 ในปี ค.ศ. 2009 Mohamed E. Mitwally และคณะ [30] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการขึ้นรูปเย็นและการอบอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างและลักษณะของไทเทเนียมอัลลอย โดยจะหาสมบัติเชิงกลความร้อนที่เหมาะสม โดยใช้ Ti-55.8%Ni เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว มาลดขนาดลงเหลือ 20, 30 และ 40 % โดยที่ 40% ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700°C จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลพบว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ลวดโลหะผสมจำรูปจะมีสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดมากขึ้นตามดังแสดงในรูป 2.39 เพราะว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ทำให้ dislocation เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นยิ่งยวดกับเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด [30]

ส่วนผลของอุณหภูมิการอบกับสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด แสดงดังรูปที่ 2.40 พบว่าที่ 500°C ความยืดหยุ่นยิ่งยวดจะลดลง ที่ 400°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด เนื่องจากมีความหนาแน่นของ dislocation สูง



รูปที่ 2.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดกับอุณหภูมิอบ [30]