หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

ลวดทางทันตกรรมจัดฟัน

1. คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน

Burstone (37) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติที่สมบูรณ์แบบสำหรับลวดทางทันตกรรมจัดฟันไว้ ดังนี้คือ

1. คุณสมบัติในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Properties)
2. ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำลาย
3. ความอ่อนตัว (Ductility) เพียงพอที่ทำให้ลวดไม่หักขณะใส่ในช่องปากหรือหักขณะดัด
4. ขณะดัด ลวดควรจะอ่อน เพื่อให้ดัดง่าย และภายหลังจากผ่านกรรมวิธีผ่านความร้อน ลวดควรมีลักษณะแข็ง
5. สามารถเชื่อมให้ติดกันได้ง่าย

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดได้แก่ คุณสมบัติในช่วงยืดหยุ่น เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนฟันโดยตรง ในทางทันตกรรมจัดฟัน Thurow (38) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติสามประการในช่วงยืดหยุ่น ดังนี้คือ

1. ความแกร่ง (Stiffness) เป็นสัดส่วนระหว่างแรงและระยะทาง เพื่อวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป โดยวัดแรงที่ทำให้ลวดงอหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นระยะทางระยะหนึ่ง ค่านี้ไม่มีความสัมพันธ์กับแรงหรือระยะสูงสุด ลวดที่แกร่งกว่าจะให้แรงมากกว่า
2. ความแข็งแรง (Strength) เป็นค่าแรงสูงสุด ที่ลวดสามารถทนได้ ค่านี้แสดงถึงความสามารถในการสะสมแรงของวัสดุ นำมาเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุได้
3. ระยะทำงาน (Working Range) เป็นค่าระยะทางที่แสดงว่า ลวดสามารถเปลี่ยนรูปได้เท่าไร ภายในขอบเขตของวัสดุนั้น ค่านี้บอกถึงระยะทางที่ฟันสามารถเคลื่อนได้ในการปรับลวดแต่ละครั้ง

ความแกร่งมีความสัมพันธ์กับโมดูลัสของการยืดหยุ่น ขณะที่ความแข็งแรงและระยะทำงานมีความสัมพันธ์กับเขตปฏิภาค และความสามารถในการบิดตัว ตามลำดับ

ลวดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับทางทันตกรรมจัดฟันควรมีค่าความแกร่งต่ำและมีความแข็งแรงสูง เพื่อที่จะเคลื่อนฟันไปได้ไกลขึ้น (37, 39)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทั้งสามประการนี้ได้แก่ (38)

1. ลักษณะของเครื่องมือที่นำไปใช้ เพื่อทำให้เกิดแรงต่อฟัน ได้แก่ ความกว้างของแบรกเก็ต ขนาดของลวดโค้ง (Archwire) ความยาวของลวด และลูป

2. ปัจจัยที่เกี่ยวกับลวด ได้แก่ รูปร่าง และพื้นที่หน้าตัดของลวด

3. ปัจจัยเกี่ยวกับวัสดุซึ่งนำมาทำลวด ได้แก่ ธาตุต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบปริมาณการขึ้นรูปเย็น ขณะผ่านกรรมวิธีการผลิต (39) และกรรมวิธีผ่านความร้อน

ปัจจัยที่เกี่ยวกับลวดนั้น Burstone (40) ได้ทำการเปรียบเทียบความแกร่งของลวด ขนาด และรูปร่างต่าง ๆ โดยคิดเป็นค่า Cs (Cross Sectional Stiffness Number) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสูตรที่ใช้คำนวณทางวิศวกรรม ดังตารางที่ 1 และ 2 ค่าความแกร่งของลวดสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดยกกำลัง 4 จากตารางที่ 2 อ่านค่า Cs ของลวดขนาด .016 นิ้ว ได้เท่ากับ 256 แสดงว่าในการปรับลวด ปริมาณเท่ากับกับลวดขนาด .004 นิ้ว จะให้แรงมากกว่า 256 เท่า ในลวดเหลี่ยมจะมีค่า Cs 2 ค่า ค่าแรกเป็นค่าที่ได้จากการใส่ลวดในทิศทางของสันลวด (First Order) และอีกค่าหนึ่งได้จากการใส่ลวดในทิศทางด้านแบนของลวด (Second Order) ค่า Cs เป็นการเปรียบเทียบลวดชนิดเดียวกันและกรรมวิธีการผลิตเช่นเดียวกัน แต่ต่างขนาดกัน

ปัจจัยที่เกี่ยวกับวัสดุที่นำมาทำลวดนั้น ปัจจุบันได้มีการนำโลหะผสม (alloy) ชนิดต่าง ๆ มาผลิตเป็นลวดทางทันตกรรมจัดฟัน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค โลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม โลหะผสมระหว่างนิเกิลและติตาเนียม โลหะผสมระหว่างติตาเนียมและโมลิบดินัม เป็นต้น

Burstone (40) เปรียบเทียบความแกร่งของวัสดุที่นำมาทำลวดทางทันตกรรมจัดฟัน ชนิดต่าง ๆ โดยแสดงเป็นค่า Ms (Material Stiffness Number) ซึ่งคำนวณจากโมดูลัสของการยืดหยุ่น ตารางที่ 3 ค่า Ms ของเหล็กกล้าไร้สนิม เท่ากับ 1 มีค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น เท่ากับ 25,000,000 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว ข้อมูลดังกล่าวคำนวณจากลวดขนาด 0.016 นิ้ว แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งมีผลต่อโมดูลัสของการยืดหยุ่น ได้แก่ กรรมวิธีการผลิต และความแตกต่างในส่วนประกอบย่อย ค่า Ms แสดงปริมาณ แรงที่ได้จากลวดเมื่อได้รับการปรับ (Activate) 1 หน่วย ลวดอัลจิลอยสีฟ้าให้แรงมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพียงเล็กน้อย จากตารางที่ 3 ลวดอัลจิลอยสีฟ้าซึ่งยังไม่ได้ทำกรรมวิธีผ่านความร้อน มีค่าเท่ากับ 1.19 และเมื่อผ่านกรรมวิธีผ่านความร้อนแล้ว จะมีค่า Ms 1.22 ซึ่งไม่แตกต่างจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในทางคลินิก

ในการคำนวณค่าความแกร่งของลวด (Wire Stiffness) จะใช้สูตร

$$Ws = Ms \times Cs$$

เมื่อ Ws คือ ความแกร่งของลวด (Wire Stiffness)

Ms คือ ความแกร่งของวัสดุ (Material Stiffness Number)

Cs คือ ความแกร่งของพื้นที่หน้าตัด (Cross-Sectional Stiffness Number)

Cross section		
(Inches)	*(mm.)*	C_s
0.004	0.102	1.00
0.010	0.254	39.06
0.014	0.356	150.06
0.016	0.406	256.00
0.018	0.457	410.06
0.020	0.508	625.00
0.022	0.559	915.06
0.030	0.762	3,164.06
0.036	0.914	6,561.00

ตารางที่ 1 แสดงความแกร่งของพื้นที่หน้าตัดในลวดกลม (Cs) (40)

Shape	Cross section (Inches)	Cross section (mm.)	C_s 1st order	C_s 2nd order
Rectangular	0.010 × 0.020	0.254 × 0.508	530.52	132.63
Rectangular	0.016 × 0.022	0.406 × 0.559	1129.79	597.57
Rectangular	0.018 × 0.025	0.457 × 0.635	1865.10	966.87
Rectangular	0.021 × 0.025	0.533 × 0.635	2175. 95	1535.35
Rectangular	0.0215 × 0.028	0.546 × 0.711	3129.83	1845.37

Shape	Cross section (Inches)	Cross section (mm.)	C_s
Square	0.016 × 0.016	0.406 × 0.406	434.60
Square	0.018 × 0.018	0.457 × 0.457	696.14
Square	0.021 × 0.021	0.533 × 0.533	1289.69

ตารางที่ 2 แสดงความแกร่งของพื้นที่หน้าตัดในลวดเหลี่ยม (Cs) (40)

	Material-stiffness number (M_s)
Alloys	
Stainless steel (ss)	1.00
TMA	0.42
Nitinol	0.26
Elgiloy blue	1.19
Elgiloy blue (heat-treated)	1.22
Braids	
Twist-flex	0.18 – 0.20
Force-9	0.14 – 0.16
Drect	0.04 – 0.08
Respond	0.07 – 0.08

ตารางที่ 3 แสดงถึงความแกร่งของวัสดุ (Ms) ของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน (40)

จากค่า Ms และ Cs เราสามารถเลือกชนิดและขนาดของลวดทางทันตกรรมจัดฟันให้เหมาะสม สำหรับแต่ละระยะของการรักษาได้ ในระยะแรกของการรักษา ซึ่งเป็นการปรับระดับของฟัน จะต้องเคลื่อนฟันในระยะไกล ด้วยแรงที่พอเหมาะ การใช้ลวดโลหะผสมระหว่างนิเกิลและติตาเนียม ขนาด 0.016 นิ้ว หรือ 0.018 นิ้ว จะได้ผลดีกว่าการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเล็กกว่า เนื่องจากมีความแกร่งต่ำกว่า และระยะทำงานสูงกว่า ในการรักษาระยะกลางซึ่งต้องใช้ลวดซึ่งดัดเป็นลูปลักษณะต่าง ๆ เพื่อปิดช่องว่าง จำเป็นต้องใช้ลวดเบตาติตาเนียมแทนลวดโลหะผสมระหว่างนิเกิลและติตาเนียม เนื่องจากสามารถดัดและเชื่อมได้ การใช้ลวดซึ่งมีความแกร่งต่ำเช่นนี้ ไม่สามารถควบคุมรูปร่างขากรรไกร (Arch form) ได้ดีเท่าลวดซึ่งมีความแกร่งสูงกว่า ในกรณีซึ่งต้องการควบคุมรูปร่างขากรรไกร ได้แก่ การรักษาในระยะสุดท้าย การใช้ยางคล้องระหว่างขากรรไกรบนล่าง (Intermaxillary Traction) การลดความสัมพันธ์ในแนวดิ่งของฟันหน้า (Overbite Reduction) เป็นต้น จำเป็นต้องใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม หรือลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ขนาดใหญ่ (2, 3, 4, 23)

กรรมวิธีผ่านความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งทำให้ลวดมีการคงรูป (Dimensional Stability) ดีขึ้น ทำให้สามารถควบคุมรูปร่างขากรรไกรได้ดีขึ้น (2)

2. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค

เป็นลวดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่ผสมโลหะโครเมียม 14-30 เปอร์เซ็นต์ และนิเกิล 8-35 เปอร์เซ็นต์ (41) และนอกจากนี้ยังอาจมีโลหะอื่นผสมอีก เช่น โมลิบดินัม แมงกานีส เป็นต้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ให้ดีขึ้น

โลหะผสมระหว่างเหล็กกล้า (Steel) กับโครเมียมและนิเกิล ค้นคิดโดย Drs. Strauss และ Maurer แห่งแผนกวิจัยของ Messrs. F. Krupp, A.G. (42) ถูกจดลิขสิทธิ์ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 1912 และถูกเสนอเป็นรายงานในที่ประชุมนักเคมีที่ Bonn เดือนมิถุนายน ค.ศ. 1914 จุดเด่นของโลหะผสมนี้คือ คุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและไม่ขึ้นสนิม โลหะผสมชนิดนี้มีชื่อในเวลาต่อมาว่า เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค โลหะผสมนี้ใช้กันแพร่หลายก่อนในเยอรมัน ต่อมาในอังกฤษ และสหรัฐอเมริกา เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคถูกนำมาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน เนื่องจากโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความแข็ง (Hardness) และความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) สูง

012714

แม้ในลวดขนาดเล็ก ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนสี เมื่อเริ่มแรกการใช้โลหะชนิดนี้ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากยังไม่สามารถหาวิธีเชื่อมโลหะชนิดนี้ได้ ต่อมาเมื่อสามารถปรับปรุงเทคนิคการเชื่อมโลหะชนิดนี้ให้ดีขึ้น จึงถูกนำมาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน เมื่อราว ค.ศ. 1929-1930 โดยบริษัท Renfert นำลวดซึ่งผลิตจากโลหะของบริษัท Krupp มาเปิดตลาด ทันตแพทย์จัดฟันในเวลานั้นหลายท่านนิยมใช้ เนื่องจากสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงกลวิธี (mechanic) ในการเคลื่อนฟัน (42, 43)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคที่นำมาใช้ทางทันตกรรมจัดฟันเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 18-8 หมายเลข 302 และ 304 ตามมาตรฐานของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute) (38, 42) ซึ่งมีส่วนประกอบดังตารางที่ 4

	302	304
คาร์บอน	0.15	0.08
แมงกานีส	2.00	2.00
ซิลิคอน	1.00	1.00
โครเมียม	17.00-19.00	18.00-20.00
นิเกิล	8.00-10.00	8.00-10.50
ฟอสฟอรัส	0.045	0.045
กำมะถัน	0.03	0.03
เหล็ก	ที่เหลือ	ที่เหลือ

ตารางที่ 4 แสดงส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคชนิด 302 และ 304 (19)

ส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ ปริมาณของคาร์บอน ชนิด 302 มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าชนิด 304

ธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และมีบทบาทสำคัญต่อกลสมบัติ ได้แก่ เหล็ก โครเมียม นิเกิล และคาร์บอน (32, 34, 41, 44, 45)

เหล็กบริสุทธิ์จะมีความแข็ง (Hardness) และความอ่อนตัว (Ductility) ใกล้เคียงกับทองแดง คือสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ประมาณ 275.8 MPa แต่มีอำนาจทนต่อการกัดกร่อนต่ำมาก และเป็นสนิมง่าย

โครเมียม เมื่อผสมในเหล็กคาร์บอน ในปริมาณไม่น้อยกว่า 11.5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดขึ้นบาง ๆ ของโครเมียมออกไซด์ที่ผิวเหล็กกล้า ทำหน้าที่กันไม่ให้ออกซิเจนทำปฏิกริยากับเนื้อเหล็ก ต่อต้านการติดสี (Tarnish) และการกัดกร่อน (Corrosion)

นิเกิล เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติอ่อนตัว (Ductile) เพิ่มความแข็งแรง (Strength) ต่อต้านการกัดกร่อน และลดอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสม

คาร์บอน เป็นธาตุที่ผสมลงไปในเหล็กบริสุทธิ์ เพื่อเพิ่มความแข็งผิว และความแข็งแรง แต่ลดความสามารถในการตีแผ่

แมงกานีสและซิลิคอน ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้โลหะผสม ซึ่งกำลังหลอมเหลวรวมตัวกับออกซิเจน โดยกำจัดก๊าซออกซิเจนออกจากเหล็กในขณะหลอมเหลว และจะเติมธาตุทั้งสอง ก่อนเทเหล็กหลอมเหลวลงในแบบหล่อ

การศึกษาโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ต้องอาศัยไดอะแกรมกึ่งธาตุสองตัว (Pseudo Binary Equilibrium Diagram) โดยศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลง เมื่อส่วนผสมของโครเมียม นิเกิล และคาร์บอนในเหล็กเปลี่ยนแปลง

บริเวณต่าง ๆ ที่น่าสนใจในไดอะแกรมดังกล่าวได้แก่

1. α มีวัฏภาค (Phase) ที่เรียกว่าเฟอร์ไรท์ เหล็กจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ ซึ่งมีอะตอมอยู่ตรงกลาง

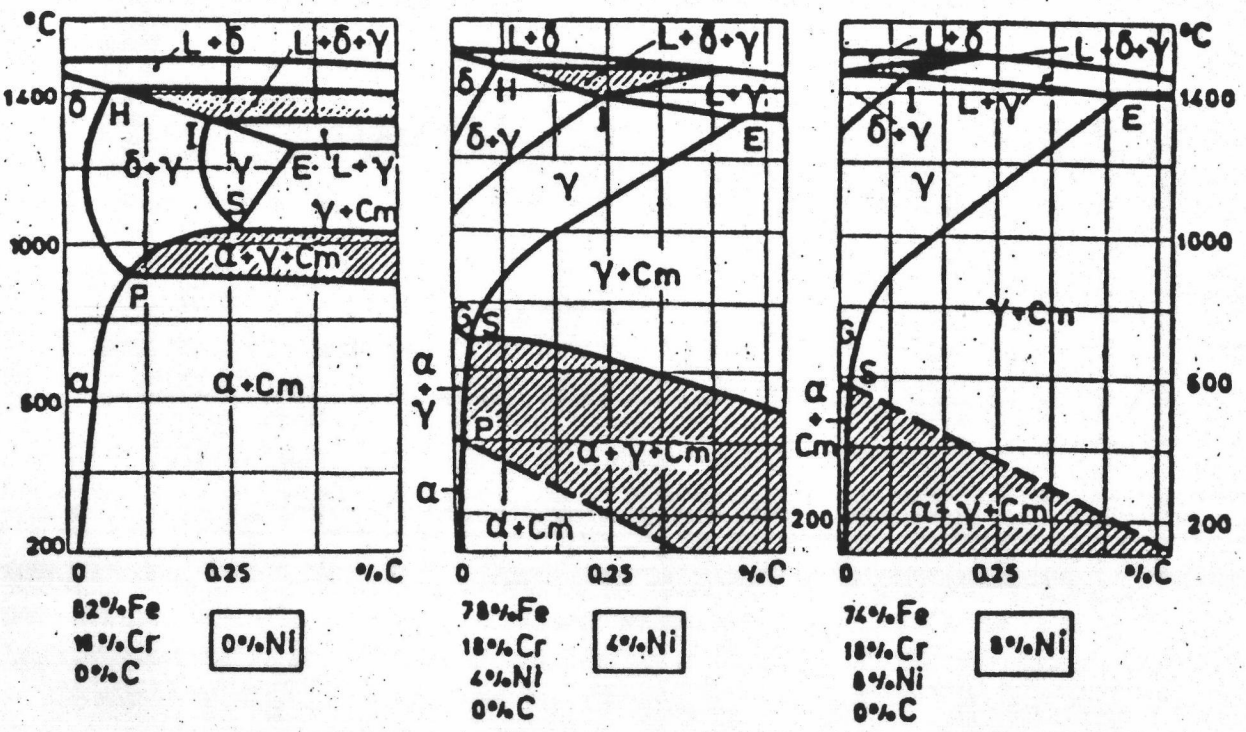
2. γ มีวัฏภาค (Phase) ที่เรียกว่าออสเตนไนท์ เหล็กจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง

3. δ มีวัฏภาค (Phase) ที่เรียกว่าเดลตา เหล็กจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ ซึ่งมีอะตอมอยู่ตรงกลาง

4. Cm มีวัฏภาค (Phase) ที่เรียกว่าซีเมนไตต์ เป็นสารประกอบระหว่างเหล็กกับคาร์บอน มีสูตรเป็น Fe_3C

เนื่องจากธาตุนิเกิลเป็นธาตุที่มีอิทธิพล ทำให้ออสเตนไนท์มีเสถียรภาพ และโครเมียมเป็นธาตุที่มีผลตรงกันข้าม กล่าวคือ มีอิทธิพลทำให้เฟอร์ไรท์มีเสถียรภาพ ดังนั้นผลของธาตุทั้งสองจึงหักล้างกัน ถ้าผลของนิเกิลรุนแรงกว่า จะสามารถทำให้ได้โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อมีปริมาณนิเกิลสูงถึง 8 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2

จากกรรมวิธีผ่านความร้อนในเหล็ก 18/8 โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส (1,830 องศาฟาเรนไฮต์) ทำให้เย็นโดยการชุบน้ำ จะได้โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างกึ่งเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง อัตราการแพร่ซึม (Diffusion) มีน้อยมาก จึงทำให้ออสเตนไนท์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2 แสดงบทบาทของนิเกิลที่มีต่อโครงสร้างเหล็ก ซึ่งมีโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์ (41)

เนื่องจากในเหล็กทั่ว ๆ ไป จะมีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อผสมโครเมียมลงไป โครเมียมเป็นธาตุที่รวมกับคาร์บอนได้ดี ให้โครเมียมคาร์ไบด์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณของโครเมียมในเหล็กจะลดลงต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ (ถ้าผสมโครเมียมเพียง 12 เปอร์เซ็นต์) ทำให้เหล็กไม่มีคุณสมบัติต้านทานการเป็นสนิมได้ โดยทั่วไปจะผสมโครเมียมในปริมาณ

15-18 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้สูงกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ แม้จะมีโครเมียมบางส่วนรวมกับคาร์บอน แต่ปริมาณโครเมียมในเนื้อเหล็กก็ยังไม่ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ (32, 41)

โครเมียมคาร์ไบด์ส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ตามขอบเกรน ดังนั้นอาจทำให้เนื้อของเหล็กบริเวณขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโครเมียมบางส่วนถูกดึงไปรวมกับคาร์บอน เหล็กจะเกิดการสึกกร่อนได้บริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) การสึกกร่อนจะกินลึกลงไป เกรนจะหลุดออกไปทีละเกรน (41)

ที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส (932-1,470 องศาฟาเรนไฮต์) เกิดการแพร่ซึมของคาร์บอนได้ ทำให้เกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน ทำให้เกิดการสึกกร่อนได้เช่นกัน

การป้องกันการสึกกร่อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค กระทำได้โดย

1. หลีกเลี่ยงการเผาเหล็กในช่วงอุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส (1,200-1,290 องศาฟาเรนไฮต์) เพราะจะทำให้อะตอมของคาร์บอนไปรวมกับโครเมียมเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรนได้

2. เพิ่มปริมาณโครเมียมให้สูงมาก ๆ อาจจะสูงถึง 18-20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้มีโครเมียมเหลืออยู่ไม่ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ตามขอบเกรน

คุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคมีดังนี้คือ สามารถทนต่อการกัดกร่อนสูง เมื่ออยู่ในสภาพที่ถูกอบอ่อน จะไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก เมื่อผ่านการขึ้นรูปแล้ว จะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย (42)

คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าชนิดนี้คือ ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) สูง ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) สูง (18, 20) Drake ทำการทดสอบลวด พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคมีค่าความเค้นที่จุดคราก และโมดูลัสของการยืดหยุ่นสูงกว่าลวดโลหะผสมระหว่างนิเกิลติตาเนียม และลวดโลหะผสมระหว่างติตาเนียมโมลิบดินัม (46) และเมื่อเปรียบเทียบกับลวดที่ทำจากทองโมดูลัสของการยืดหยุ่นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค มีค่าสูงกว่า 1.8 เท่า (20)

	Type 304
Tensile strength, psi	
Annealed soft	105-160,000
20% Cold drawn (¼ hard)	160-200,000
40% Cold drawn (½ hard)	205-240,000
60% Cold drawn (¾ hard)	250-300,000
80% Cold drawn (full hard)	300-360,000
Yield strength, psi	
Annealed soft	45- 80,000
20% Cold drawn (¼ hard)	120-170,000
40% Cold drawn (½ hard)	175-215,000
60% Cold drawn (¾ hard)	230-280,000
80% Cold drawn (full hard)	280-350,000
Percent elongation in 2 inches	
Annealed soft	25-55%
20% Cold drawn (¼ hard)	15-25%
40% Cold drawn (½ hard)	10-17%
60% Cold drawn (¾ hard)	5-10%
80% Cold drawn (full hard)	1-2%

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่ถูกยืดเป็นเส้นลวด (จากเส้นผ่าศูนย์กลาง .020 นิ้ว สู่ .012 นิ้ว) (33)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคเมื่อทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส (1,830 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วชุบน้ำ จะไม่ทำการอบคลายตัว (Tempering) เพื่อไม่ให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กชนิดนี้โดยการเพิ่มความแข็งระหว่างการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนท์ เป็นมาร์เทนไซต์บางส่วน ซึ่งจะทำให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 3 เท่า (38, 41)

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคที่นำมาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟันจะถูกขึ้นรูปเย็น ขณะผ่านกรรมวิธีการผลิตลวด ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) และความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) เพิ่มขึ้น แต่ความอ่อนตัว (Ductility) จะลดลง ดังตารางที่ 5

ในการนำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคมาใช้ทางทันตกรรมจัดฟัน ควรคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ (42)

1. การให้ความร้อนสูงเกินไป จะสูญเสียความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Strain Hardening) โดยไม่กลับคืนมา ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคที่เหมาะสม

2. ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ของลวดชนิดนี้สูงกว่าลวดชนิดอื่น ดังนั้นขนาดลวดที่นำมาใช้ควรมีขนาดเล็กกว่า

3. ค่าของความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูง จะป้องกันไม่ให้ลวดหัก เมื่อใส่อยู่ในปาก แต่จะทำให้ลวดหักขณะดัดได้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อดัดลวดหักเป็นมุมแหลม ปัญหานี้ป้องกันได้โดยดัดลวดอย่างนิ่มนวล หรืออาจจะต้องเผาลวดให้ร้อนก่อนดัดลวดเป็นมุมแหลม

ในการวิจัยเรื่องนี้ กระทำการทดสอบตัวอย่างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ซึ่งผลิตโดยสองบริษัท ได้แก่

1. บริษัทยูนิเทก (15) (UNITEX 0.017 x 0.022 Permachrome Standard Stainless Steel) ส่วนประกอบของลวดเป็นไปตามส่วนประกอบของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าอเมริกัน (American Iron and Steel Institute (AISI) หมายเลข 304 ดังตารางที่ 4

คุณสมบัติเชิงกลของลวดนี้

ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 275 กิโลปอนด์ ต่อตารางนิ้ว (KSI) (minimum)

ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) 222 กิโลปอนด์ ต่อตารางนิ้ว (minimum)

การยืดตัว (Elongation in 2 inch.) 1.5 เปอร์เซ็นต์ (minimum) (19)

2. บริษัทจีเอซี (GAC 0.017 x 0.022 Nubryte Standard Stainless Steel)

3. ลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม (11, 21, 25, 32, 38, 39, 45, 47, 48)

เป็นลวดที่นิยมใช้ในทางทันตกรรมจัดฟันมาก เช่น เดียวกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค เนื่องจากสามารถดัดได้ง่าย เหมือนกับลวดทองผสม แต่ภายหลังจากกรรมวิธีผ่านความร้อนแล้ว จะมีคุณสมบัติเหมือนกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค

ความเป็นมาของโลหะผสมชนิดนี้ Elwood Haynes เป็นผู้ค้นคิดคนแรกในต้นคริสตศตวรรษที่ 20 โดยมีชื่อทางอุตสาหกรรมว่า "Stellite" เนื่องจากโลหะผสมนี้มีคุณสมบัติแข็ง ทนต่อการเปลี่ยนสี (non-tarnish) และมีความเค้นสูงที่อุณหภูมิสูง จึงนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์เครื่องบิน แม้ว่าทางอุตสาหกรรมจะมีการใช้โลหะผสมชนิดนี้อย่างแพร่หลาย แต่ในทางทันตกรรมมีข้อมูลเกี่ยวกับโลหะผสมชนิดนี้น้อย มีการนำมาใช้หล่อโครงของฟันปลอมชนิดถอดได้ ในราว ค.ศ. 1949 และใช้ในการผ่าตัดกระดูก หลังจากนั้นได้มีการนำโลหะผสมชนิดนี้มาใช้ทางทันตกรรมจัดฟัน โดยบริษัทผู้ผลิตลวดทางทันตกรรมจัดฟัน เช่น บริษัทรอกกีเมาเทน (Rocky Mountain/Orthodontics) บริษัทเดนเตารุม (Dentaurum) บริษัทออร์มโก (Ormco) เป็นต้น โดยมีปริมาณของโลหะที่เป็นส่วนประกอบหลัก ชนิดและปริมาณของโลหะที่เป็นส่วนประกอบย่อยแตกต่างกัน

ธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของลวดโลหะผสมชนิดนี้ได้แก่ โคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบย่อยอีก ได้แก่ โมลิบดินัม แมงกานีส เบริลเลียม คาร์บอน เหล็ก ติตาเนียม ขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต ดังจะได้กล่าวต่อไป

ส่วนประกอบหลักของลวดโลหะผสมชนิดนี้ ซึ่งแตกต่างไปจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ได้แก่ โคบอลต์ ซึ่งเป็นโลหะที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนสูง แข็ง ความเค้นสูง (Strength) ความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ทนต่อความล้า (Fatique) สูง และจุดหลอมเหลวสูง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Allotropic Property) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 417 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยมชนิดอัดแน่น และที่อุณหภูมิสูงกว่า 417 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นแบบลูกบาศก์ ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง

คุณสมบัติของลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ซึ่งเหนือกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค มีดังนี้คือ

1. ทนต่อความล้า (Fatique) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ได้มากกว่า
2. สามารถให้แรงได้นานกว่า เนื่องจากมีริซิเลียนซ์สูงกว่า
3. สามารถทำการขัดด้วยเครื่องขัดด้วยไฟฟ้า (Electropolisher)
4. สามารถบัดกรีได้ง่าย
5. สามารถทำกรรมวิธีผ่านความร้อนได้ง่าย สปริงจะเพิ่มขึ้น
6. สามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่า
7. สามารถเชื่อม (Spot Welding) ได้ง่าย
8. ดัดได้ง่าย

ข้อเสียของลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม คือ ราคาแพง เนื่องจากโคบอลต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักมีราคาสูง กรรมวิธีการผลิตยุ่งยาก เนื่องจากโคบอลต์เป็นโลหะซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง ต้องใช้เตาเผาซึ่งให้ความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูง

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบตัวอย่างลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ซึ่งผลิตโดยสองบริษัท ได้แก่

1. บริษัทรอกกีเมาเทน (Rocky Mountain) โลหะผสมระหว่างโคบอลต์และโครเมียม ที่ผลิตโดยบริษัทนี้มีส่วนประกอบดังนี้ (21)

โคบอลต์	40 %
โครเมียม	20 %
นิเกิล	15 %
โมลิบดินัม	7 %
แมงกานีส	2 %
คาร์บอน	0.15 %
เบริลเลียม	0.04 %
เหล็ก	ที่เหลือ

โลหะผสมที่มีส่วนประกอบดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า อัลจิลอย (Elgiloy) หรือโคเบเนียม (Cobenium) แต่เดิมโลหะผสมนี้ใช้ทำสปริงหลัก (Main Spring) ในนาฬิกา ผลิตโดยบริษัทเอลจิน (Elgin)

คุณสมบัติเชิงกลของอัลจิลอย ส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องจากโลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบดังกล่าวข้างต้น คุณสมบัติของโครเมียม โคบอลต์ นิเกิล แมงกานีส และคาร์บอน ได้แสดงไปแล้ว ส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ โมลิบดินัม ทำให้โลหะผสมแข็ง และความเค้นสูง เบริลเลียม ทำให้โลหะผสมมีขนาดเกรนเล็ก (45)

คาร์บอนเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีปริมาณน้อย แต่สามารถรวบกับธาตุตัวอื่นเป็นคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งและเปราะ วัสดุจะเปราะหรืออ่อนตัว ขึ้นกับขนาดและการกระจายของผลึกคาร์ไบด์ ในเนื้อโลหะ ถ้าผลึกกระจายไม่ต่อเนื่อง วัสดุจะอ่อนตัว แต่ถ้าผลึกเกาะเป็นลูกโซ่ วัสดุจะเปราะ (32)

คุณสมบัติเชิงกลของลวดอัลจิลอยมีดังนี้คือ

ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	340,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength)	310,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ความเค้นแรงเฉือนที่จุดคราก (Shear Yield)	210,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	28,500,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
โมดูลัสแรงบิด (Torsitional Modulus)	11,200,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ความแข็ง (Rockwell C)	51-55	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
อุณหภูมิอบอ่อน (Annealing Temperature)	2250°F	หรือ 1230°C
อุณหภูมิของกรรมวิธีผ่านความร้อน	900° F	หรือ 482°C

เนื่องจากลวดอัลจิลอยสามารถทำการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ได้ง่ายกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้นจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด (21, 25, 49)

1.1 ลวดอัลจิลอยสีแดง (RM. Red Elgiloy-High spring temper, Resilience) ลวดจะมีความแข็งและสปริงดีมาก โดยเฉพาะในลวดขนาดเล็ก ไม่ควรหักลวดเป็นมุมแหลม การเชื่อม (welding) หรือบัดกรี (solder) จะทำให้ลวดเปราะ

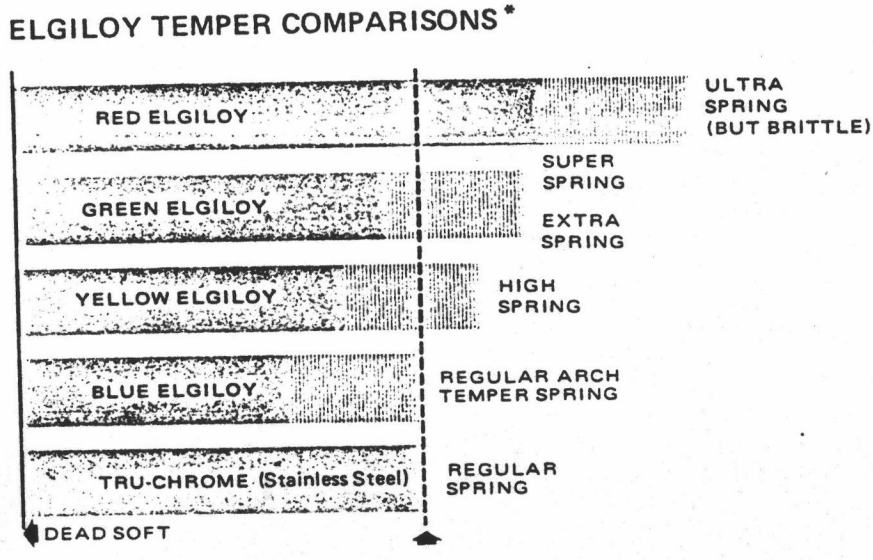
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทำกรรมวิธีผ่านความร้อน จะทำให้มีริซิเลียนซ์สูงขึ้น แต่ไม่สามารถหักลวดให้เป็นมุมได้ ภายหลังจากการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ลวดอัลจิลอยสีแดงทำมาในลักษณะพื้นที่ตัดกลมเท่านั้น ระยะทำงาน (Working range) ของลวดชนิดนี้จะเท่ากับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 18/8 (39)

1.2 ลวดอัลจิลอยสีเขียว (RM Green Elgiloy-Tempered, Semiresilience) ลวดมีสปริงดีเท่ากับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสปริงดี สามารถดัดด้วยนิ้วมือหรือคีม ได้ก่อนทำกรรมวิธีผ่านความร้อน แต่หลังจากนั้นไม่ควรงอหรือดัดลวดเป็นมุมแหลม เชื่อม หรือบัดกรีลวด ลวดอัลจิลอยสีเขียวจะทำมาในลักษณะพื้นที่หน้าตัดกลมเพียงอย่างเดียว

1.3 ลวดอัลจิลอยสีเหลือง (RM Yellow Elgiloy-Ductile) ลวดชนิดนี้สามารถดัดด้วยนิ้วมือหรือคีมได้ ลวดขนาดใหญ่ (0.021 x 0.025 นิ้ว, 0.030 นิ้ว, 0.036 นิ้ว) ก็สามารถนำมาเชื่อมหรือบัดกรีได้ โดยไม่ทำให้ลวดเปราะ แต่ควรทำด้วยความระมัดระวัง กรรมวิธีผ่านความร้อนจะทำให้เกิดริซีเลียนสูงสุด และสปริงดี ภายหลังจากทำกรรมวิธีผ่านความร้อนแล้ว ก็สามารถปรับลวดได้อีกเล็กน้อย ลวดชนิดนี้สามารถใช้แทนลวดอัลจิลอยสีฟ้าได้ ในกรณีที่ต้องการสปริงมากกว่า ลวดอัลจิลอยสีเหลืองทำมาในลักษณะพื้นที่หน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า

1.4 ลวดอัลจิลอยสีฟ้า (RM Blue Elgiloy-Soft) ลวดชนิดนี้นิ่มมาก สามารถดัดได้ง่ายด้วยคีมหรือนิ้วมือ สามารถเชื่อมได้โดยใช้อุณหภูมิต่ำ และการบัดกรีจะไม่ทำให้ลวดเปราะ ควรใช้ลวดชนิดนี้เมื่อถึงขั้นที่ใช้ลวดใหญ่กว่า 0.020 นิ้ว (0.508 มิลลิเมตร) หรือในกรณีที่ต้องการงอลวด เชื่อมลวด หรือบัดกรีลวด ควรทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ก่อนจะนำลวดไปใช้ ลวดชนิดนี้ทำมาในลักษณะพื้นที่หน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3 แสดงถึงการเปรียบเทียบลวดอัลจิลอยสีต่าง ๆ กับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค (25)

2. บริษัทเดนเตารุม (Dentaurum)

ลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ที่ผลิตโดยบริษัทนี้มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ (22)

โคบอลต์	45 %
นิเกิล	21 %
โครเมียม	18 %
เหล็ก	5 %
โมลิบดินัม	4 %
ติตาเนียม	1 %
วุลแฟรม	4 %

ส่วนประกอบหลักไม่แตกต่างจากลวดที่ผลิตโดยบริษัทรอกกีเมาเทนมากนัก แต่ส่วนประกอบย่อยได้แก่ ติตาเนียม และวุลแฟรม ไม่มีในลวดที่ผลิตโดยบริษัทรอกกีเมาเทน ติตาเนียม ทำให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งแรง และความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น พลวงเป็นธาตุซึ่งผสมในโลหะผสมของโคบอลต์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (47)

คุณสมบัติทั่ว ๆ ไป ก็คือ สามารถทำกรรมวิธีผ่านความร้อนได้ และจะทำให้ความแข็งแรง (strength) และความแข็ง (hardness) สูง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติต้านทานการสึกกร่อน ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ต้านทานต่อความล้า

ลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล โครเมียม ที่ผลิตโดยบริษัทนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด

2.1 เรมอลอยสีฟ้า (Remaloy blue = Soft grade) ทำมาในลักษณะพื้นที่หน้าตัด รูปกลม และสี่เหลี่ยม

2.2 เรมอลอยสีเขียว (Remaloy green = Spring hard) ทำมาในลักษณะพื้นที่หน้าตัด รูปกลม เท่านั้น

4. ข้อกำหนดหมายเลข 32 ของสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน (American Dental Association) ว่าด้วยลวดทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งไม่มีโลหะมีค่าเป็นส่วนประกอบ ได้รับการอนุมัติจากสถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกัน (American National Standards Institute) ในวันที่ 16 กันยายน ค.ศ. 1977 (27)

4.1 ขอบเขตและการแบ่งชนิด

4.1.1 ข้อกำหนดนี้ใช้สำหรับลวดทางทันตกรรมจัดฟันที่มีลักษณะตรงและไม่มีโลหะกลุ่มทองคำ หรือทองคำขาว เป็นส่วนประกอบ

4.1.2 ชนิดของลวดทางทันตกรรมจัดฟันตามข้อกำหนดนี้ แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ริชิเลียนช์ต่ำ
2. ริชิเลียนช์สูง

4.2 ข้อกำหนดที่นำมาใช้

4.2.1 ข้อกำหนด ไม่มีข้อกำหนดอื่นใดที่สามารถนำมาใช้กับข้อกำหนดนี้ได้

4.3 สิ่งที่จำเป็น (Requirement)

4.3.1 สี สีของลวดกำหนดโดยผู้ซื้อ

4.3.2 คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง (Flexure Yield Strength) และความต้านทานต่อการดัดลวดเป็นมุมฉาก (Resistance to 90° Bending) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6 และ 7 ค่าของโมดูลัสความแกร่ง (Modulus of Stiffness) ควรอยู่ภายใน 10 % ของค่าที่แสดงไว้บนหีบห่อ

4.3.3 ช่วงของขนาดลวด (Size Range) เส้นผ่าศูนย์กลาง ความกว้าง และความหนา จะแสดงไว้เป็นมิลลิเมตร ขนาดของพื้นที่หน้าตัด จะเปลี่ยนแปลงไปได้เท่ากับ $\pm$ 0.025 มม. ความสัมพันธ์ระหว่างลวดกลมกับลวดเหลี่ยมเป็นดังนี้คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดกลม มีค่าเท่ากับ 1.13 $\sqrt{A}$ ถ้า A คือพื้นที่หน้าตัดของลวดเหลี่ยม

4.4 การสุ่มตัวอย่าง การตรวจด้วยสายตา และการทดสอบ

4.4.1 การสุ่มตัวอย่าง ลวดที่นำมาทดสอบคุณสมบัติให้ตรงกับข้อกำหนด ได้มาจากตัวแทนของลวดที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

4.4.2 การตรวจด้วยสายตา ดูว่าลวดมีลักษณะดังข้อที่ 4.3.1 และ 4.5 หรือไม่

4.4.3 การทดสอบทางกายภาพ

4.4.3.1 การเตรียมตัวอย่าง นำตัวอย่างความยาว 7.5 ซ.ม. (3.0 นิ้ว) จำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบความเค้นที่จุดคราก ในลักษณะดัดโค้ง (Flexure Yield Strength) และโมดูลัสความแกร่ง (Modulus of Stiffness) และตัวอย่างจำนวนและขนาดเท่ากัน มาทำการทดสอบความต้านทานต่อการดัดลวดเป็นมุมฉาก ทำการทดสอบเช่นนี้ในลวดแต่ละขนาด ลวดที่อยู่ในลักษณะโค้งจะถูกเหยียดให้ตรงออกก่อนทำการทดสอบ นำลวดตัวอย่างมาทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ถ้าจำเป็น ก่อนการทดสอบ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนด

4.4.3.2 การยอมรับให้คุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามที่กำหนด โดยนำชุดลวดจำนวน 5 ตัวอย่าง ในแต่ละขนาด จำนวน 3 ชุด หรือมากกว่านี้ นำมาทำการทดสอบความเค้นที่จุดคราก ในลักษณะดัดโค้ง (Flexure Yield Strength) โมดูลัสความแกร่ง (Modulus of Stiffness) และความต้านทานต่อการดัดลวดเป็นมุมฉาก (Resistance to 90° Bend) ค่าเฉลี่ยจากค่าที่วัดได้ทั้งหมดจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด

4.4.3.3 ความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง (Flexure Yield Strength) จะวัดจากลวดแต่ละชุด ซึ่งขนาดของพื้นที่หน้าตัด และรูปร่างต่างกัน การทดสอบความแกร่ง จะใช้อัตราการเปลี่ยนรูป (Deflection Rate) ซึ่งคงที่ เท่ากับ 1 เรเดียน (57.3 องศา) ต่อนาที (ความยาวลวดในการทดสอบ 1 นิ้ว) ค่าของโมเมนต์การดัดโค้ง (Bending Moment) จะสามารถเปลี่ยนมาเป็นค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) จากสูตร

$$S_{max} = M/Z$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์การดัดโค้ง

Z คือ โมดูลัสของพื้นที่หน้าตัด (Sectional Modulus)

จุดครากหาได้จากกราฟระหว่างโมเมนต์การดัดโค้ง และความเครียดเชิงมุม (Angular Strain) โดยใช้ออฟเซต 0.05 เรเดียน (2.9 องศา) เพื่อหาค่าความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง ซึ่งควรจะมีค่าใกล้กับ 100 เมกกะนิวตัน ต่อตารางเมตร (1,000 Kg/cm^2)

4.4.3.4 การทดสอบการดัดลวด (Bending Test) ความต้านทานต่อการหัก (Resistance to Fracture) หาค่าได้จากการนำลวดยาว 7.5 ซ.ม. ในแต่ละพื้นที่หน้าตัด (รวมอยู่ในตัวอย่าง) มางอเป็นมุมฉาก ตัวอย่างจะถูกจับไว้ในแนวดิ่ง ระหว่างขาจับ ซึ่งขนานกัน 2 อัน โดยจับลวดลึก 2.5 ซ.ม. ตรงบริเวณขอบของขาจับ จะมีลักษณะโค้ง ซึ่งมีรัศมี 0.50 มม. ตัวอย่างจะถูกงอเป็นมุมฉาก จนกระทั่งขาจับด้านหนึ่ง หมุนมาอยู่ในแนวนอน และกลับสู่ตำแหน่งเดิม หลังจากนั้นจะกระทำการงอลวดซ้ำอีกไปเรื่อย ๆ 1 ครั้งใน 1 วินาที จนกระทั่งลวดขาด บันทึกจำนวนครั้งที่งอลวด

4.4.3.5 โมดูลัสความแกร่ง (Modulus of Stiffness) คุณสมบัตินี้พิจารณาจากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์การโค้งงอ (Bending Moment) และความเครียดเชิงมุม (Angular Deflection) โดยพิจารณาที่เส้นกราฟข้างก่อนที่จะถึงจุดคราก (Flexure Yield Point) โดยสูตรดังนี้

$$E = ML / 3I\theta$$

ถ้า E คือ โมดูลัสความแกร่ง (Stiffness in Flexure)

M คือ โมเมนต์การดัดโค้ง (Bending Moment)

L คือ ความยาวของช่วงลวด (Span Length)

I คือ โมเมนต์แรงเฉื่อย (Moment of Inertia)

θ คือ มุมของการโค้งลวด (Angular Deflection) ใช้เป็นเรเดียน

Type	Flexure yield strength (2.9 deg. offset) MN/m²	
	Minimum	Maximum
I	1,700 (173 kg/mm²)	2,400
II	2,500 (255 kg/mm²)	—

ตารางที่ 6 ค่าที่กำหนดสำหรับความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง

Diameter (or equivalent diameter*)	Minimum No. of bend cycles
Up to 0.03 mm (0.0118 in)	15
0.31 to 0.64 mm (0.0122 to 0.025 in)	10
0.65 and greater (0.026 in)	5

*See section 3.3.

ตารางที่ 7 ค่าที่กำหนดสำหรับการทดสอบการดัดลวด

4.5 การเตรียมเพื่อการจำหน่าย

4.5.1 การบรรจุหีบห่อ จะต้องบรรจุในหีบห่อ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทางการค้า

4.5.2 ข้อแนะนำในการใช้ คำแนะนำในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่เหมาะสม ควรแสดงไว้ในหีบห่อ หรือในสลาก ให้ผู้ใช้ได้ทราบ

4.5.3 เครื่องหมาย

4.5.3.1 หมายเลขของลอต (lot) ในแต่ละหีบจะต้องมีชุดตัวเลข หรือตัวอักษรรวมกับตัวเลข ซึ่งเป็นการบันทึกของผู้ผลิต ซึ่งกำหนดเลขหมายเฉพาะของลวดชุดนั้น

4.5.3.2 วันที่ทำการผลิต แสดงไว้เป็นเลขจำนวน 6 ตัว บนด้านนอกของหีบห่อ ซึ่งบรรจุลวดไว้สำหรับการขายปลีก เลข 2 ตัวแรก แสดงถึงเดือน 2 ตัวกลาง แสดงถึงวัน และ 2 ตัวสุดท้าย แสดงถึงปี

4.5.3.3 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ค่าของความเค้นที่จุดคราก ในลักษณะดัดโค้ง และโมดูลัสความแกร่ง แสดงอยู่บนหีบห่อ และอธิบายถึงวิธีทำ กรรมวิธีผ่านความร้อนที่จำเป็น

4.5.3.4 ขนาด ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับลวดกลม หรือขนาดของขอบลวด ในกรณีที่ลวดไม่กลม จะแสดงไว้บนหีบห่อเป็นมิลลิเมตร

4.6 บันทึก

4.6.1 คำจำกัดความ

M = โมเมนต์การดัดโค้ง (Bending Moment) คือปริมาณของแรงที่มากระทำ คูณด้วยระยะตั้งฉาก จากเส้นของแรงที่มากระทำไปยังแกนของการหมุน (ในเครื่องทดสอบของ Olsen Stiffness Tester) ผลรวมของค่าโมเมนต์ แสดงไว้บนระบบของน้ำหนักลูกตุ้ม คูณด้วยค่าที่อ่านจากสเกล และหารด้วย 100)

I = โมเมนต์แรงเฉื่อย (Moment of Inertia) ของหน้าตัดตัวอย่าง นิยามได้จากผลรวมของผลคูณพื้นที่หน้าตัดกับระยะระหว่างพื้นที่นั้นไปยังแกนหมุน

ถ้าพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ d $I = \pi d^4/64 = 0.0491\ d^4$

ถ้าพื้นที่หน้าตัดเป็นครึ่งวงกลม $I = (9\pi^2-64)d^4/1152\pi = 0.00686\ d^4$

ถ้าพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความหนา = t (แนวตั้งฉากกับแนวแกนการดัดโค้ง) และความกว้าง = W (แนวขนานกับแนวแกนการดัดโค้ง) $I = Wt^3/12$

Z = โมเมนต์ของพื้นที่หน้าตัด (Sectional Modulus) ของตัวอย่าง นิยามได้จากโมเมนต์แรงเฉื่อย (Moment of Inertia) หารด้วยระยะจากบริเวณที่มีความเค้นไกลที่สุดจากแกนกลาง (Neutral Axis)

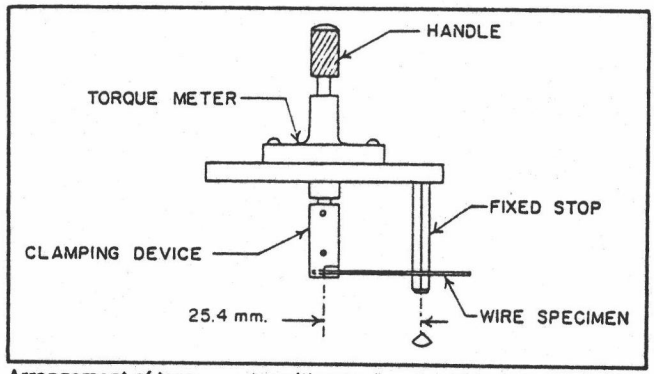
ถ้าหน้าตัดเป็นวงกลม $Z = \pi d^3/32 = 0.0982\ d^3$

ถ้าหน้าตัดเป็นครึ่งวงกลม $Z = \frac{(9\pi^2-64)d^3}{192\ (3\pi\ -4)} = 0.0238\ d^3$

ถ้าหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม $Z = Wt^2/6$

4.6.2 แหล่งของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เครื่องมือทดสอบความแกร่ง (Stiffness Tester) หรือทอร์คมิเตอร์ (Torque Meter) ใช้สำหรับการหาเส้นสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์การดัดโค้ง และความเครียดเชิงมุม (Angular Strain) ทอร์คมิเตอร์จะมีความไว้มากกว่า สามารถใช้กับลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 0-3 มม. ได้ เครื่องมือทดสอบความแกร่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Tinius Olsen Testing Machine

ทอร์คมิเตอร์มีหลายแบบ ซึ่งใช้เฉพาะกับลวดแต่ละช่วงขนาด เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Power Instrument



Arrangement of torque meter with span length of 25.4 mm (1 in).

รูปที่ 4 แสดงการทดสอบลวดยาว 25.4 มม. (1 นิ้ว) โดยใช้ทอร์คมิเตอร์ (27)

6. ข้อกำหนดของมาตรฐานอังกฤษว่าด้วยลวดทางทันตกรรมจัดฟัน (50)

ข้อกำหนดดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของข้อกำหนดของมาตรฐานอังกฤษ หมายเลข 3507 ว่าด้วยลวด, แบนด์ทางทันตกรรมจัดฟัน และลวดสำหรับมัดฟัน (Orthodontic wire and tape and dental ligature wire) ซึ่งกำหนดโดยสถาบันมาตรฐานอังกฤษ (British Standard Institution) ในปี 1976

ข้อกำหนดดังกล่าวนี้คณะกรรมการมาตรฐานอุตสาหกรรมทางด้านทันตกรรม (Dental Industry Standards Committee) ทำหน้าที่ร่าง และเป็นส่วนหนึ่งของงานการร่างมาตรฐานสำหรับเครื่องมือ ครุภัณฑ์ และวัสดุทางทันตกรรม จุดมุ่งหมายเพื่อกำหนดมาตรฐานขนาดลวด และกำหนดคุณภาพของลวดและแบนด์ทางทันตกรรมจัดฟัน โดยเฉพาะความแข็งแรง และความอ่อนตัว มาตรฐานนี้ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกในปี 1962 และทบทวนแก้ไขอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากมีการพัฒนาเทคนิคทางทันตกรรมจัดฟันและการทดสอบลวด และมีการทดสอบลวดทางทันตกรรม ซึ่งทำจากวัสดุอื่นนอกเหนือไปจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเป็นวัสดุซึ่งใช้กำหนดมาตรฐานครั้งแรก ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะสม

บางส่วนของข้อกำหนดซึ่งเกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ได้แก่ ส่วนที่กล่าวถึงลวดทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่สูง และสูงมาก (Hard Drawn Wire and Extra Hard Drawn Wire for Orthodontic Use)

6.1 ข้อกำหนดทั่วไป

6.1.1 จุดบกพร่อง ลวดจะต้องผ่านการผลิตมาอย่างดี และปราศจากจุดบกพร่องที่รุนแรง เช่น รอยพับหรือรอยต่อ

6.1.2 ขดลวด (Coils) ลวดที่ทำมาในลักษณะขด จะต้องวางบนราบบนพื้นได้ โดยรัศมีของขดลวดจะต้องมีขนาดเท่ากันโดยตลอด

6.1.3 ความสามารถในการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Weldability) ในกรณีที่ลวดไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยไฟฟ้า จะต้องแสดงไว้อย่างชัดเจน

6.2 ลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่สูง (Hard Drawn Wire)

6.2.1 วัสดุ ลวดจะต้องทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเหมาะสมประกอบด้วยโครเมียม ในปริมาณไม่น้อยกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก หรือโลหะผสมอื่น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่เหมาะสม (ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเหมาะสมคือหมายเลข 302 S25)

ถ้าผู้ผลิตใช้โลหะผสมชนิดอื่นนอกเหนือไปจากเหล็กกล้าไร้สนิม อาจจะแสดงผลการศึกษาทางคลินิก เพื่อเป็นหลักฐานว่าโลหะผสมชนิดนั้นเหมาะสมกับการใช้งานในช่องปาก

6.2.2 ช่วงของขนาดลวด ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องระบุไว้เป็นมิลลิเมตร ช่วงของขนาดลวดจะต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 8

6.2.3 ความเค้นแรงดึง เพื่อทดสอบตามวิธีซึ่งปรากฏใน BS 4545 ค่าความเค้นแรงดึงจะต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 8

6.2.4 ความต้านทานต่อการดัดลวดกลับไปกลับมา (Resistance to Failure on Bending) ลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่สูง (Hard Drawn Wire) จะต้องทนการดัดกลับไปกลับมาเป็นจำนวนครั้งตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 9

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Diameter	Tolerance	Tensile strength
mm.	mm.	$N/mm.^2$
1.5 1.25 1.15	± 0.025	1500 to 1700
1.0 0.9 0.8	± 0.012	1700 to 1900
0.7 0.6 0.5	± 0.012	1850 to 2050
0.45 0.4 0.35 0.30	± 0.012 ± 0.012 ± 0.012 ± 0.006	2000 to 2200
0.25 0.20 0.15	± 0.006	2200 to 2400

ตารางที่ 8 แสดงช่วงของขนาดลวดและความ เค้นแรงดึงในลวด ซึ่งผ่านการขึ้นรูป เย็นใน ปริมาณที่สูง

Size	Deflection from zero position angle α (see figure 5)	Minimum number of bending cycles
mm.	degrees	
1.5 1.25 1.15	30	4
1.0 0.9 0.8 0.7	30	12
0.6 0.5 0.45 0.4 0.35 0.3	40	15
0.25 0.20 0.15	40	20

ตารางที่ 9 แสดงถึงความต้านทานต่อการดัดลวดกลับไปกลับมา (Resistance to Failure on Bending) ในลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณสูง

6.2.5 เงื่อนไข ลวดจะต้องอยู่ในสภาพที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น

6.2.6 สภาพสำเร็จ ลวดจะต้องสะอาดและผิวเรียบ

6.3 ลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่สูงมาก (Extra Hard Drawn Wire)

6.3.1 วัสดุ ลวดจะต้องทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเหมาะสม ประกอบด้วยโครเมียม ในปริมาณไม่น้อยกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ หรือโลหะผสมอื่น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่เหมาะสม (ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเหมาะสมคือหมายเลข 302 S25)

ถ้าผู้ผลิตใช้โลหะผสมชนิดอื่นนอกเหนือไปจากเหล็กกล้าไร้สนิม อาจจะแสดงผลการศึกษาทางคลินิก เพื่อเป็นหลักฐานว่าโลหะผสมชนิดนั้นเหมาะสมกับการใช้งานในช่องปาก

6.3.2 ช่วงของขนาดลวด ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องระบุไว้เป็นมิลลิเมตร ช่วงของขนาดลวดจะต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 10

6.3.3 ความเค้นแรงดึง เพื่อทดสอบตามวิธีซึ่งปรากฏใน BS 4545 ค่าความเค้นแรงดึงของลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณสูงมาก ไม่ควรจะมากกว่า 2500 นิวตัน ต่อตารางมิลลิเมตร

6.3.4 ความต้านทานต่อการดัดลวดกลับไปกลับมา (Resistance to Failure on Bending) ดังการทดสอบในข้อ 6.4.1 ลวดซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่สูงมาก (Extra Hard Drawn Wire) จะต้องทนต่อการดัดกลับไปกลับมาเป็นจำนวนครั้งตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 11

6.3.6 เงื่อนไข ลวดจะต้องอยู่ในสภาพที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น

6.3.6 สภาพสำเร็จ ลวดจะต้องสะอาดและผิวเรียบ

6.4 วิธีการทดสอบ

6.4.1 การวัดค่าความต้านทานต่อการดัดลวดกลับไปกลับมา

6.4.1.1 เครื่องมือ แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับจับลวดซึ่งนำมาทดสอบ และดัดโค้งเป็นมุมตามที่กำหนด เครื่องมือดังกล่าวประกอบด้วย

6.4.1.1.1 ขาจับผิวสัมผัสตรงขอบบน มีรัศมี 0.5 มิลลิเมตร

6.4.1.1.2 สเกลสำหรับวัดมุมของการดัดโค้ง

6.4.1.1.3 ขาจับรูปหมุด

6.4.1.2 กรรมวิธี นำลวดตัวอย่างยาวประมาณ 7 มิลลิเมตร จับปลายข้างหนึ่งให้แน่นด้วยขาจับรูปหมุด โดยเหลือปลายไว้อย่างน้อย 4 มิลลิเมตร จับปลายอีกข้างด้วยขาจับ ให้ระยะระหว่างผิวสัมผัสด้านบนของขาจับและปลายขาจับรูปหมุดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร โดยมีเครื่องมือสำหรับวัด

เริ่มทดสอบเมื่อลวดตัวอย่างตั้งตรงที่มุมศูนย์ หักลวดไปทางด้านซ้ายและกลับมาทางด้านขวา ให้ได้มุมซึ่งเที่ยงตรง ดังกำหนดไว้ในตารางที่ 9 หรือ 11 การหัก 1 รอบ ประกอบด้วยการเคลื่อนที่จากทางด้านซ้ายมาทางด้านขวา และกลับไปทางด้านซ้ายอีกครั้ง การทดสอบกระทำในอัตราครึ่งรอบต่อวินาที โดยลวดตัวอย่างไม่พลิกหรือเสียหาย

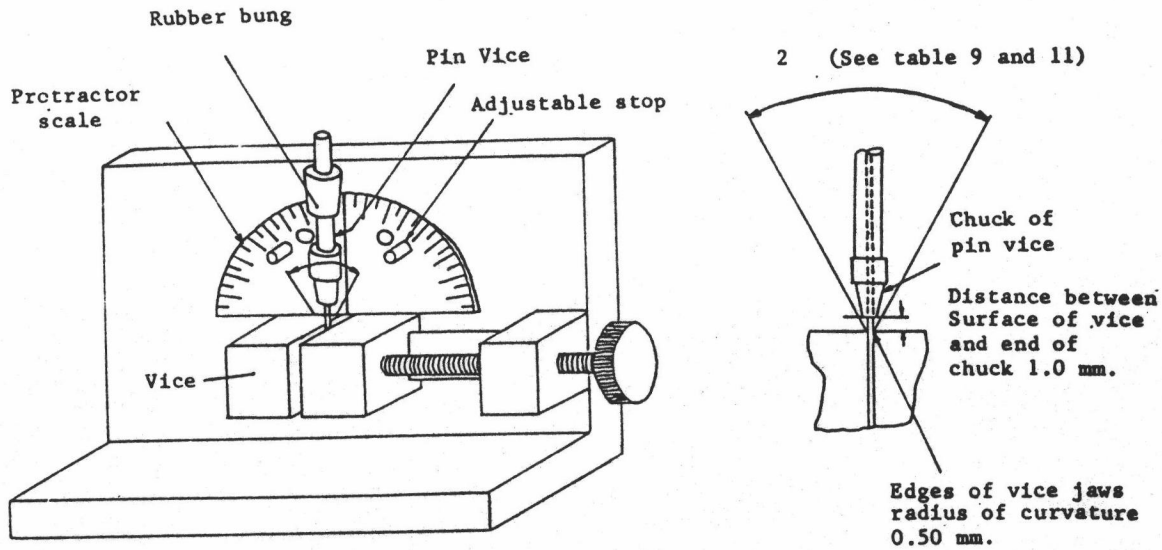
6.4.1.3 การทดสอบซ้ำ ถ้าตัวอย่างลวดแรกไม่ผ่านการทดสอบ นำตัวอย่างลวดอีกสองตัวอย่าง ซึ่งผลิตในคราวเดียวกัน ทดสอบในลักษณะเช่นเดิม ถ้าลวดทั้งสองตัวอย่างผ่านการทดสอบ จะถือว่าลวดมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด

6.5 สลาก สลากบนหีบห่อซึ่งบรรจุลวดทางทันตกรรมจัดพัน จะต้องประกอบด้วย

6.5.1 ชื่อและเครื่องหมายทางการค้าของบริษัทผู้ผลิตหรือผู้จัดจำหน่าย

6.5.2 ขนาดซึ่งระบุเป็นมิลลิเมตรตามมาตรฐานอังกฤษ

6.5.3 หมายเลขของมาตรฐานอังกฤษ



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงถึงเครื่องมือซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาค่าความต้านทานต่อการหักลวดกลับไปมา

Diameter	Tolerance
mm.	mm.
0.55	
0.50	
0.45	
0.40	± 0.012
0.35	
0.30	

ตารางที่ 10 แสดงช่วงของขนาดลวดในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณสูงมาก

Size	Deflection from zero position, angle α (see figure 5)	Minimum number of Bending Cycles
mm.	degrees	
0.55		
0.50		
0.45	40	15
0.40		
0.35		
0.30		

ตารางที่ 11 แสดงความต้านทานต่อการดัดลวดกลับไปกลับมา (Resistance to Failure on Bending) ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณสูงมาก

<u>กรรมวิธีผ่านความร้อน</u> (Heat Treatment)

กรรมวิธีผ่านความร้อน (Heat Treatment) คือการที่โลหะถูกเผาให้ร้อน และคงสภาพที่อุณหภูมินั้นชั่วขณะหนึ่ง ผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนจะขึ้นกับอุณหภูมิ ชนิดของโลหะ และการกระทำใด ๆ ต่อโลหะ ก่อนที่จะนำมาทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้โลหะอ่อนตัวลง หรือแข็งมากขึ้น ขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้กรรมวิธีผ่านความร้อนยังมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรน และความต้านทานต่อการสึกกร่อน (30)

วัฏจักรของการผ่านความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ขั้น ดังนี้คือ (29)

1. การให้ความร้อน (Heating) โลหะผสมจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม ขึ้นกับชนิดของโลหะผสม และจุดประสงค์ในการให้ความร้อน เพื่อเปลี่ยนโครงสร้าง หรือเพื่อกำจัดความเค้นเหลือค้าง (Residual Stress) ในโลหะผสม

2. การรักษาระดับอุณหภูมิ (Holding Temperature) โลหะผสมจะได้รับความร้อน ให้อุณหภูมิคงที่ระยะหนึ่ง เพื่อให้เวลาโลหะผสมนั้นได้เปลี่ยนโครงสร้าง หรือกำจัดความเค้นเหลือค้าง (Residual Stress) ระยะเวลาของการรักษาระดับอุณหภูมิขึ้นอยู่กับความหนา และการนำความร้อนของโลหะผสม

3. อัตราการทำให้เย็นลง (Rate of Cooling) เร็วหรือช้า ขึ้นกับจุดประสงค์ว่าจะรักษาโครงสร้างที่ระดับอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาคไว้ หรือปล่อยให้เกรนของโลหะผสมขยายตัวเต็มที่ จนขนาดเท่าปกติ ซึ่งมีความสำคัญ ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนโครงสร้างของโลหะผสม

1. การอบอ่อน (Annealing)

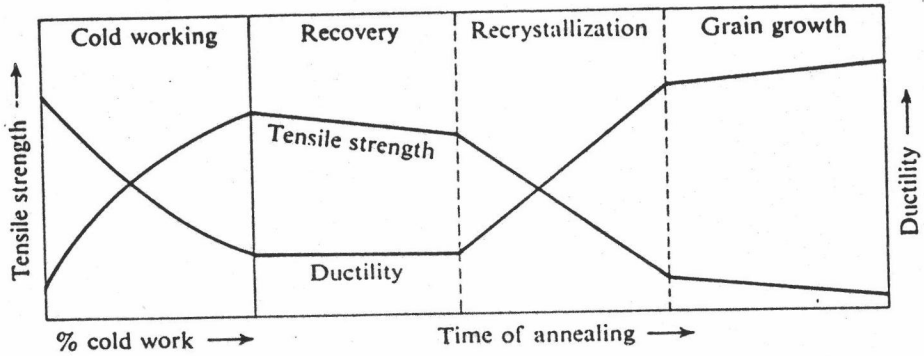
เป็นการกระทำให้โลหะอ่อนตัว โดยเผาโลหะนั้นจนถึงอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาค คงอุณหภูมิไว้ระยะหนึ่ง แล้วปล่อยให้โลหะเย็นลงช้า ๆ ในเตาเผา จนถึงอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ขนาดเกรนตามต้องการ จุดประสงค์เพื่อให้โลหะคลายความเค้นเหลือค้าง (Residual Stress) หรือเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของโลหะ (29, 30, 51)

การอบอ่อนจะทำให้ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นหมดไป (52) เกรนที่บิดเบี้ยวจะกลับสู่ปกติ ความอ่อนตัว (Ductility) จะเพิ่มขึ้น

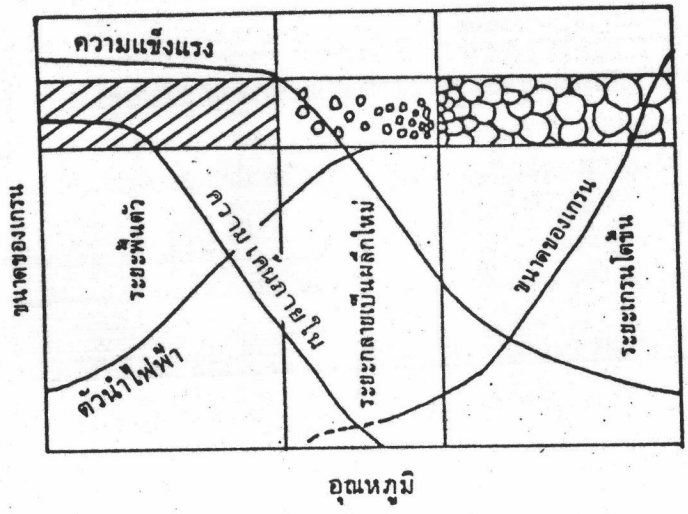
การอบอ่อนมี 3 ระยะ คือ

1.1 ระยะฟื้นตัว (Recovery Period) เป็นระยะที่โลหะเริ่มถูกเผาในอุณหภูมิต่ำ ๆ ระยะนี้สามารถแยกออกจากระยะอื่นคือ จะสูญเสียความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นไปแต่ไม่มากนัก เป็นช่วงก่อนที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้จากกล้องจุลทรรศน์ จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) เปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย แต่ความอ่อนตัว (Ductility) ไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม การนำกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นจะมีความเค้นสะสมอยู่มาก ทำให้เกิดการโก่งงอ ลักษณะเช่นนี้จะหายไปในระยะฟื้นตัว ถ้าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีไม่มากคือ การยืดตัวไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนที่ใช้ในระยะฟื้นตัวนี้จะสามารถกำจัดความเค้นทั้งหมดได้ เครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันซึ่งได้จากการนำลวดมาดัดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามความเหมาะสมในการใช้งาน จะถูกนำมาผ่านความร้อนในระยะฟื้นตัว เพื่อกำจัดความเค้น ก่อนนำไปใช้งาน ทำให้รูปร่างของเครื่องมือคงที่ และให้แรงที่เหมาะสม ขณะอยู่ในช่องปาก การผ่านความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การอบอ่อน เพื่อกำจัดความเค้น (Stress Relief Anneal)

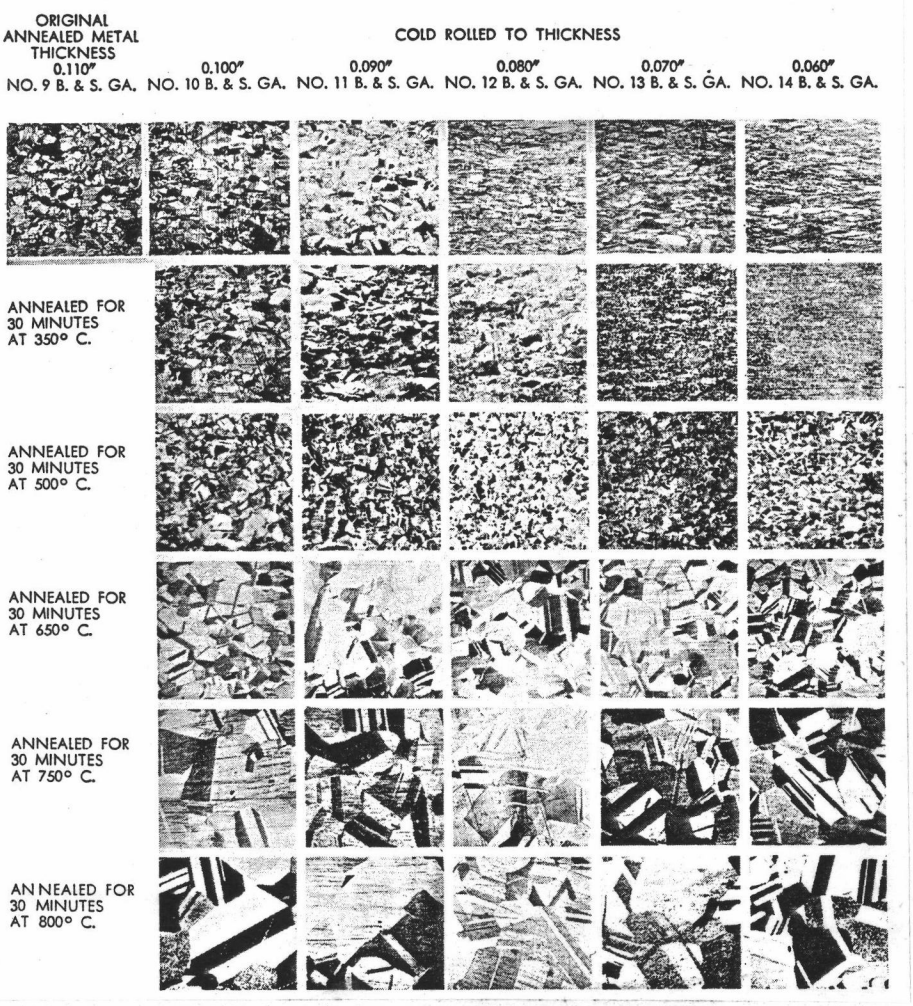
1.2 ระยะกลายเป็นผลึกใหม่ (Recrystallization Period) หลังจากโลหะผสมได้รับความร้อนผ่านระยะฟื้นตัวแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระยะกลายเป็นผลึกใหม่ ดังในรูปที่ 6 และ 7 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมตัวประมาณ $\frac{1}{3}$ หรือ $\frac{1}{2}$ เท่า เมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดผลึกใหม่จะเพิ่มขึ้น (43) ถ้าความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นมีปริมาณไม่มาก จะถูกกำจัดออกไป ตั้งแต่ระยะฟื้นตัว ในระยะนี้เกรนเดิมจะสลายตัว และเกิดเกรนใหม่ ซึ่งไม่มีความเค้นเหลือค้างขึ้นมาแทนที่ เกรนใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเค้นสะสมอยู่สูง ได้แก่ บริเวณขอบเกรน สิ้นสุดระยะนี้ วัสดุจะมีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งผิว ความเค้นแรงดึง และเขตปฏิภาคจะลดลง โดยเขตปฏิภาคจะลดลงมากกว่าความเค้นแรงดึง การอบอ่อนจนถึงระยะนี้จะทำให้คุณสมบัติ ซึ่งเป็นผลจากการขึ้นรูปเย็นสูญเสียไป โดยไม่กลับคืน ถ้าลวดได้รับความร้อนจนแดง แสดงว่าอยู่ในระยะกลายเป็นผลึกใหม่แล้ว (20)



รูปที่ 6 แสดงถึงความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) และความอ่อนตัว ซึ่งเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขึ้นรูปเย็น และการอบอ่อน ระหว่างการขึ้นรูปเย็น ความเค้นแรงดึงจะเพิ่มขึ้น ขณะความอ่อนตัวจะลดลง ในช่วงระยะฟื้นตัวคุณสมบัติทั้งสองเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในระยะกลายเป็นผลึกใหม่ ค่าความเค้นแรงดึงจะลดลงขณะที่ความอ่อนตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระยะเกรนโตเร็ว จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งสองเพียงเล็กน้อย (30)



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเกรนโลหะที่ถูกเผาในระดับอุณหภูมิต่าง ๆ กัน (29)



รูปที่ 8 แสดงขนาดเกรนของทองเหลือ (ทองแดง 66 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี 34 เปอร์เซ็นต์) ขยาย 40 เท่า) ซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นให้มีความหนาน้อยลงตามลำดับ รูปทางด้านล่างแสดงถึงขนาดเกรน ภายหลังการอบอ่อน (Anneal) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน (30)

1.3 ระยะเกรนโตขึ้น (Grain Growth) วัสดุที่ผ่านระยะกลายเป็นผลึกใหม่แล้ว จะมีขนาดเกรนขึ้นกับจำนวนนิวเคลียส ซึ่งทำให้เกิดเกรน ถ้าเกรนมีความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นมาก จะมีนิวเคลียสจำนวนมาก ดังนั้นขนาดของเกรนอาจจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดค่อนข้างหยาบ

เกรนขนาดเล็กเมื่อได้รับความร้อนนานขึ้น จะมีขนาดโตขึ้น (43) ดังรูปที่ 7 โดยขึ้นกับพลังงานบริเวณขอบเกรน เกรนที่ใหญ่จะรวมเกรนที่เล็กเข้าไป แต่เกรนจะไม่รวมกันจนเกิดเป็นผลึกเดียว (Single Crystal) ในที่สุดเกรนที่ได้จะหยาบ และเกรนหยุดเจริญ ดังรูปที่ 8

ระยะเกรนโตขึ้น และระยะกลายเป็นผลึกใหม่ เกิดขึ้นพร้อมกันในเวลาเดียวกันได้

เกรนที่ใหญ่จะทำให้โลหะมีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากมีขอบเกรนซึ่งป้องกันการคลาดที่ (Dislocation) ได้น้อย เมื่อทำการขึ้นรูปเย็น ในโลหะเกรนใหญ่ จะเพิ่มความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) และเขตปฏิภาค (Proportional Limit) ได้น้อยกว่าโลหะเกรนเล็ก แต่จะมีความอ่อนตัว (Ductility) ดีกว่า

2. การชุบ (Quenching) (29)

เป็นการกระทำให้โลหะที่ถูกเผาถึงช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาค (Tranformation Temperature Range) จนเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งชิ้นวัตถุ เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยสัมผัสกับตัวกลางสำหรับชุบ (Quenching Medium) อาจเป็นก๊าซหรือของเหลว ถ้าต้องการให้เกรนมีขนาดเล็ก จะต้องใช้ตัวกลางที่มีคุณสมบัตินำความร้อนได้เร็ว ถ้าตัวกลางนำความร้อนได้ช้า เกรนจะโตขึ้น

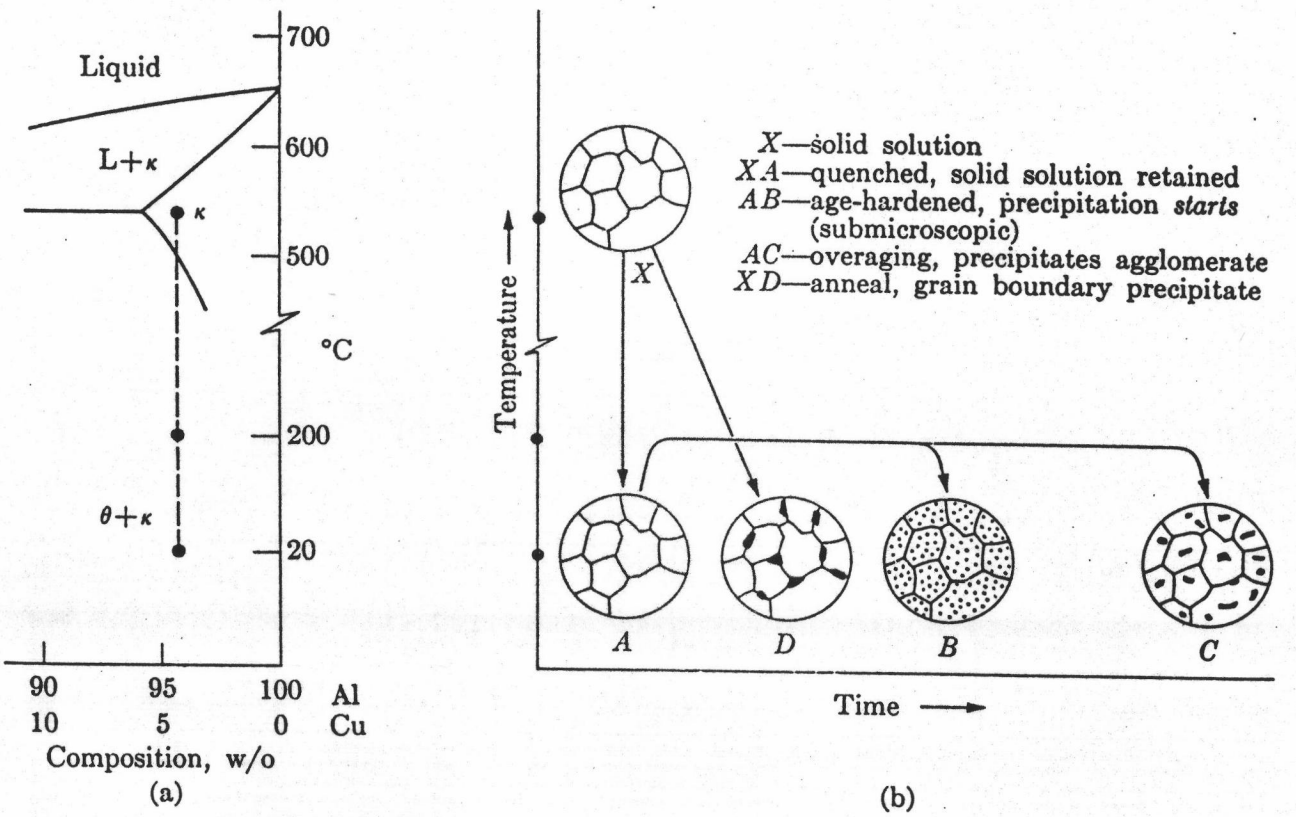
โลหะที่ได้จากการชุบจะมีความแข็งผิวสูง แต่เปราะ

3. การชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation Hardening หรือ Age Hardening) (31, 36)

เป็นการเพิ่มความแข็งในระหว่างช่วงแรกที่สารละลายของแข็งซึ่งอิ่มตัว (Saturated Solid Solution) ตกผลึก เมื่อโลหะผสมได้รับความร้อน ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิ

เปลี่ยนวัฏภาค และถูกชุบ (Quench) ไปสู่อุณหภูมิที่มีอัตราการตกผลึกต่ำ หลังจากนั้นจึงให้ความร้อนโลหะผสมอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้อุณหภูมิที่เริ่มมีการตกผลึก ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิในการอบอ่อนเล็กน้อย และเวลาที่เหมาะสม ดังรูปที่ ๑ ผลที่ได้คือความแข็งแรง (Strength) จะเพิ่มขึ้น ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ไม่ใช้วิธีนี้ในการเพิ่มความแข็งแรง แต่ใช้ในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม

ถ้าเวลาที่ใช้นานเกินไป จะทำให้โลหะผสมอ่อน (Over Aging)



รูปที่ ๑ แสดงกรรมวิธีการชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation Hardening) (๓๑)

4. กรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ

ในทางทันตกรรมจัดฟันสามารถทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในระยะฟื้นตัว โดยเครื่องมือให้ความร้อนชนิดต่าง ๆ แต่ที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป มีดังนี้คือ

4.1 การอบด้วยเตาอบ (38) เป็นวิธีที่เชื่อถือได้มากที่สุด เนื่องจากลวดจะได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดเส้น การใช้เวลาที่ยาวนาน จะสามารถทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่า ในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนระหว่างกรรมวิธีการผลิต ถ้าลวดมีขนาดใหญ่ หรือเป็นขดลวด (coil) จะต้องใช้เวลานานขึ้น เพื่อให้วัสดุทั้งชิ้นมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ ในขดลวดที่หนา ๆ ควรจะใช้เวลานาน แม้ว่าจะใช้เวลาอบนานหลายชั่วโมงก็ตาม อุณหภูมิทางด้านนอกและด้านในจะต่างกันได้ถึง 100° แม้ว่าลวดขนาดเล็กก็ตาม จะต้องใช้เวลานานกว่าจะมีอุณหภูมิสม่ำเสมอกันทุกส่วน

ในทางคลินิก ถ้านำลวดเส้นเล็ก ๆ มาทำกรรมวิธีผ่านความร้อน โดยนำไปใส่ในเตาอบให้ถึงอุณหภูมิสูงสุดทันที ลวดจะถูกกำจัดความเค้นออกไปเกือบหมดในเวลา 1 นาที หลังจากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และช้า ๆ ในการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างของลวด

เตาที่นำมาอบลวดควรเปิดทำงานตลอดวัน เพื่อป้องกันการเสื่อม เนื่องจากการขยายตัว สลับกับการหดตัว ขณะเตาร้อนและเย็น

ในลวดแต่ละชนิด จะมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่เหมาะสม ดังจะได้กล่าวต่อไป

4.2 การผ่านกระแสไฟฟ้า (38) กระทำได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้กระแสไฟฟ้าจากเครื่องเชื่อมด้วยไฟฟ้า หรือแหล่งกำเนิดแบบอื่น ๆ พบว่าการผ่านความร้อนแบบนี้ไม่ได้ใช้เวลาน้อยกว่าการใช้เตาอบ การผ่านความร้อนด้วยไฟฟ้า มักจะทำให้ลวดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนดเล็กน้อย และหยุดทันทีเมื่ออุณหภูมิสูงเท่าที่ต้องการแล้ว

ปัญหาสำคัญเกี่ยวกับกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าคือ อุณหภูมิของลวดจะไม่สม่ำเสมอตลอดเส้น โดยเฉพาะบริเวณลูป เนื่องจากลวดที่ถูกผ่านความร้อนด้วยวิธีนี้ ความร้อนจะแผ่ออกไปทุกทิศทาง เมื่อลวดเข้ามาชิดกันบริเวณขาลูป ลวดจะได้รับความร้อน

มากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นลวดจะเพิ่มอุณหภูมิได้เร็วกว่าบริเวณอื่นของลวดเส้นเดียวกัน ดังนั้นในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดขนาดเล็ก ซึ่งดัดเป็นลูป ด้วยไฟฟ้า จึงทำให้บริเวณลูปซึ่งได้รับความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นแดงได้

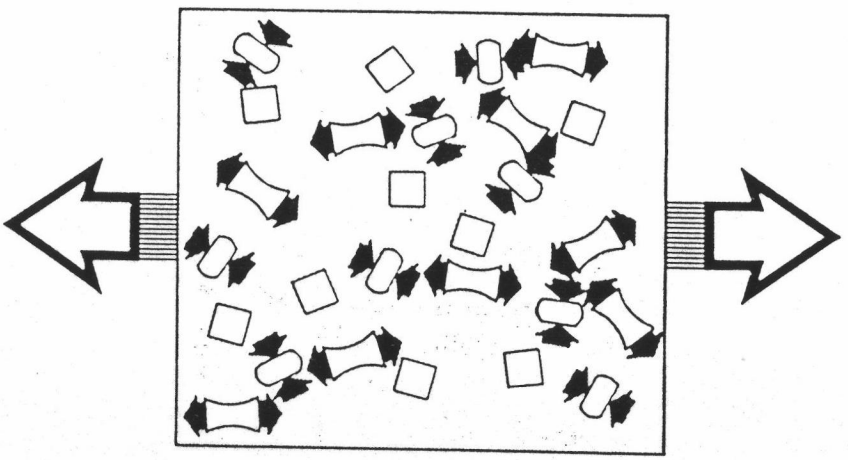
ในการกำหนดเวลาและอุณหภูมิในการผ่านกระแสไฟฟ้านั้น กำหนดโดยการใช้อินดิเคตั้งเพส (Indicating Paste) ซึ่งจะลุกเป็นไฟ เมื่ออุณหภูมิถึงขีดที่เหมาะสมร่วมกับการสังเกตสีที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสีหญ้าแห้งเข้ม (Dark Straw Color)(21)

4.3 การผ่านเปลวไฟ เป็นวิธีที่นิยมใช้มากในคลินิก เนื่องจากสามารถหาแหล่งกำเนิดความร้อนได้ง่ายที่สุด คือ ตะเกียงแอลกอฮอล์ หรือไฟแช็ก ถ้าไม่มีเครื่องเชื่อมด้วยไฟฟ้า หรือเตาอบ ขณะผ่านเปลวไฟจะต้องทำให้ลวดได้รับความร้อนสม่ำเสมอทั้งเส้น เขตของเปลวไฟที่เหมาะสมคือ เขตที่สองนับจากทางด้านนอก (Interconal Zone) ซึ่งเป็นส่วนของเปลวไฟที่เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ (24, 25) และมีความสมดุลของความร้อน (Thermal Equilibrium) เขตนี้มีอุณหภูมิสูงสุด เวลาที่ใช้กำหนดได้จากการดูสีของลวดที่เปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน (Light Brown Color Stage) (17) หรือสีหญ้าแห้งเข้ม (Dark Straw Color) (18)

5. กรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค

กรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดชนิดนี้กระทำที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อกำจัดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกรรมวิธีการผลิต และระหว่างการดัดลวดให้มีลักษณะที่เหมาะสมตามการใช้งานในคลินิก ความเค้นเหลือค้างจะถูกกำจัดออกไป โดยไม่สูญเสียความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นต่างจากการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง (37, 38)

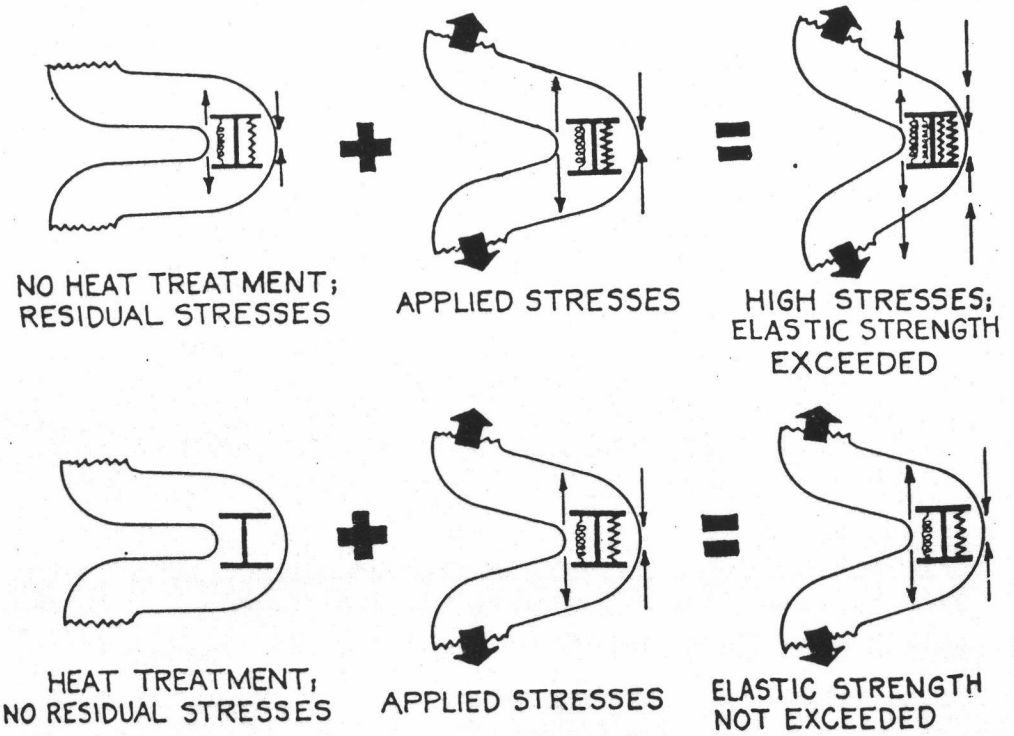
ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) เป็นผลเนื่องจากแรงซึ่งยึดกันระหว่างเกรนและอะตอมของโลหะ ทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณดังกล่าว เกรนบางเกรนได้รับแรงดึง บางเกรนได้รับแรงกด บางเกรนก็ไม่ได้รับแรง ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ภาพแสดงความเค้นในลักษณะแรงดึงและแรงกดภายในโลหะ หลังจากถูกขึ้นรูปเย็น แรงดึงที่ยังคงค้างอยู่ จะทำให้วัตถุเสียรูปเร็วกว่าที่ควรจะเป็น เมื่อได้รับแรงจากภายนอก (38)

ในการนำลวดมาดัดให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ เช่น ลูป หรือดัดให้โค้งตามรูปร่างขากรรไกร เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน ความเค้นที่เกิดกับลวดมีสาเหตุ 2 ประการคือ

1. ความเค้นเนื่องจากการดัดหรือขึ้นรูปเย็น ซึ่งมีอยู่เดิม
2. ความเค้นที่เกิดจากแรงใหม่



รูปที่ 11 แสดงถึงความเค้นที่เกิดในลูป กรณีที่ไม่ได้ทำ และทำกรรมวิธีผ่านความร้อน (5)

ถ้าทิศทางของทั้งสองของแรงไปในทางเดียวกัน จะทำให้วัตถุเปลี่ยนรูปด้วยแรงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น การทำกรรมวิธีผ่านความร้อน เพื่อกำจัดความเค้น เนื่องจากการตัดหรือในรูปเย็น จะทำให้เครื่องมือทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีของลูปปิด (Closing Loop) Backofen และ Gales (5) อธิบายไว้ว่า จะมีความเค้นค้างอยู่ตลอดช่วงที่ลวดโค้ง ทางด้านในของส่วนโค้งจะมีแรงดึงซึ่งพยายามแยกให้ลวดห่างจากกัน ขณะที่ด้านนอกของส่วนโค้งเป็นแรงอัด โดยพยายามดึงผิวลวดให้เข้าหากัน ดังรูปที่ 11 ด้านซ้ายบน ลูกศร แสดงถึงทิศทางของความเค้นที่ด้านในและด้านนอกของส่วนโค้ง ในรูปกลางแถวบน เมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางแยกขาลูปออกจากกัน ทำให้ด้านในของส่วนโค้งมีแรงดึงเพิ่มขึ้น และด้านนอกของส่วนโค้งมีแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย แรงรวมแสดงไว้ในรูปขวาบน ถึงแม้ว่าแรงใหม่ที่มากระทำจะมีขนาดน้อย แต่เมื่อรวมกับ

ความเค้นภายในที่มีอยู่เดิม ทำให้ลูปไม่สามารถทนต่อแรง และเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ความเค้นที่ค้างอยู่ภายในจะถูกกำจัดออกไปได้โดยกรรมวิธีผ่านความร้อน (Heat Treatment) ดังรูปล่างซ้าย แรงกระทำจากภายนอกแสดงไว้ในรูปกลางล่าง และผลรวมของแรงที่เกิดขึ้นในรูปล่างขวา จะเป็นผลจากแรงภายนอกที่มากระทำเท่านั้น ลูปจะทนต่อแรงได้มากขึ้น

ถ้าแรงที่มากระทำมีทิศทางด้านขาของลูปเข้ามาชิดกัน ความเค้นที่ตกค้างอยู่จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่มากระทำ ทำให้ลูปสามารถทนต่อแรงได้มากขึ้น

ในลวดที่ดัดเป็นรูปโค้งตามการเรียงตัวของฟันในขากรรไกรนั้น จะมีรูปแบบการเสียรูปเช่นเดียวกับลูป ลวดทางทันตกรรมจัดฟันมักจะผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่มาก เพื่อนำมาดัดให้โค้ง ลวดจะคลายตัวออกในทิศทางกลับสู่เส้นตรงอย่างช้า ๆ (8, 38) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้การเรียงตัวของฟันที่ลวดบังคับอยู่เปลี่ยนแปลงไป กรรมวิธีผ่านความร้อนเพื่อกำจัดความเค้น จะเร่งให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้เกิดเร็วขึ้น ลวดจะมีการคงรูป (Dimensional Stability) ดีขึ้น แต่รูปร่างจะแตกต่างไปจากที่ดัดไว้ครั้งแรก หลังจากทำกรรมวิธีผ่านความร้อนแล้ว ต้องตรวจสอบและปรับรูปร่างของลวดอีกครั้งหนึ่ง (4) หลังกรรมวิธีผ่านความร้อนลวดจะทนต่อแรงต่าง ๆ ได้ดีขึ้น (52)

ในการกำจัดความเค้นให้ได้อย่างเพียงพอ สำหรับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค Marcotte(10) กล่าวว่า จะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,650 องศาฟาเรนไฮต์ (900 องศาเซลเซียส) ซึ่งลวดจะสูญเสียความต้านทานต่อการสึกกร่อน และคุณสมบัติเชิงกล (43) ดังการศึกษาของ Wilkinson (7) ซึ่งทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0198 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส (930-1,290 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 15-120 วินาที ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) และความแข็ง (Vicker Hardness) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากนี้ Wilkinson (43) ได้ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 600 และ 675 องศาเซลเซียส (1,110 และ 1,250 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 1 นาที เปรียบเทียบกับลวดที่ไม่ได้ทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (1,110 องศาฟาเรนไฮต์) เขตปฏิภาค (Proportional Limit) ลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ลดลงเพียง

21 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 675 องศาเซลเซียส (1,250 องศาฟาเรนไฮต์) เขตปฏิภาค (Proportional Limit) ลดลง 53 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ลดลง 33 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงทำให้ทั้งค่าเขตปฏิภาค (Proportional Limit) และความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ลดลง แต่มีผลต่อเขตปฏิภาคมากกว่า Kohl (39) กล่าวว่า ในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน เพื่อกำจัดความเค้นที่ตกค้าง ไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงถึงระยะกลายเป็นผลึกใหม่ (Recrystallization) อุณหภูมิต่ำสุดของระยะนี้คือ 1,100 องศาฟาเรนไฮต์ (590 องศาเซลเซียส) Marcotte (10) กล่าวว่า ที่อุณหภูมิ 1,000-1,200 องศาฟาเรนไฮต์ (540-650 องศาเซลเซียส) จะสามารถกำจัดความเค้นได้ 25-40 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 400-900 องศาฟาเรนไฮต์ (200-480 องศาเซลเซียส) จะลดได้เฉพาะความเค้นสูงสุด

Goldberg, Vanderby และ Burstone (53) ศึกษาลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.406 มิลลิเมตร (0.016 นิ้ว) โดยทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 1,010 องศาเซลเซียส (1,850 องศาฟาเรนไฮต์) 5 นาที และที่ 454 องศาเซลเซียส (800 องศาฟาเรนไฮต์) 400 องศาเซลเซียส (1,750 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 3 นาที เปรียบเทียบกับลวดในสภาพที่ผลิตมาจากโรงงาน จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 5 การทดสอบกระทำโดยแรงดึง การวิเคราะห์จุดคราก กระทำที่ออฟเซต 0.01 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 1,010 องศาเซลเซียส (1,850 องศาฟาเรนไฮต์) ทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ค่าความเค้นที่จุดครากลดลงมาก ขณะที่ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (750 องศาฟาเรนไฮต์) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น และความเค้นที่จุดคราก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่อุณหภูมิ 454 องศาเซลเซียส (800 องศาฟาเรนไฮต์) ค่าของโมดูลัสของการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และความเค้นที่จุดครากลดลง

Kemler (6) ศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติค หมายเลข 302 ขนาด 0.020 x 0.025 นิ้ว ที่ดัดเป็นลูปกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1}{8}$ นิ้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 200-1,500 องศาฟาเรนไฮต์ (90-820 องศาเซลเซียส) นาน 5 10 และ 15 นาที ที่อุณหภูมิต่ำ จะเพิ่มค่าเขตปฏิภาค (Proportional Limit) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และโมดูลัสริชิเลียนซ์ (Modulus of

Resilience) ที่อุณหภูมิสูง ค่าเขตปฏิภาค และโมดูลัสริซิเลียนซ์จะลดลง อุณหภูมิและเวลาซึ่งทำให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นสูงสุด คือ 700-800 องศาฟาเรนไฮต์ (370-430 องศาเซลเซียส) 5-15 นาที

Craig (49) ศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 18/8 ขนาด 0.014 และ 0.022 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 482 องศาเซลเซียส (900 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 3 นาที จำนวนครั้งในการดัดลวดเป็นมุมฉากจนลวดขาด เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อทดสอบลวดในลักษณะดัดโค้ง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเล็กน้อย กรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง คือ ที่ 816 องศาเซลเซียส (1,500 องศาฟาเรนไฮต์) จะลดความแกร่ง (Stiffness) และค่ามุมซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร แต่เพิ่มค่ามุมซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งคงเหลืออยู่ภายหลังดัดโค้งลวดจนเป็นมุมฉาก อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น คุณสมบัติดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

Mutchler และ Callender พบว่า กรรมวิธีผ่านความร้อนสามารถเพิ่มค่าขีดยืดหยุ่น (Elastic Limit) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และโมดูลัสริซิเลียนซ์ (Modulus of Resilience) ขณะที่ Funk พบว่า กรรมวิธีผ่านความร้อน สามารถปรับปรุงคุณสมบัติในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Properties) ของลูปได้มาก ซึ่งไม่พบในลวดตรงเมื่อนำมางอ (8)

Wagner และ Nikolai (54) ทำการทดสอบความแกร่งของลวดในลักษณะบิด (Torsional Stiffness) ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.022 นิ้ว ดัดเป็นรูปโค้ง ตามการเรียงตัวของฟันในขากรรไกร ร่วมกับลูป และดัดลวดงอเป็นรูปตัววี (V bend) ตำแหน่งหน้าต่อแบรกเก็ตฟันเขี้ยว กลุ่มละ 6 ตัวอย่าง นำลวดไปทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ที่อุณหภูมิ 850 องศาฟาเรนไฮต์ (450 องศาเซลเซียส) 4 นาที เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ไม่พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค Adams (18) แนะนำอุณหภูมิ 850 องศาฟาเรนไฮต์ (450 องศาเซลเซียส) นาน 8 นาที ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเป็น 950 องศาฟาเรนไฮต์ (510 องศาเซลเซียส) จะใช้เวลาเพียง 3 นาที แต่ถ้าลดอุณหภูมิลงเป็น 750 องศาฟาเรนไฮต์

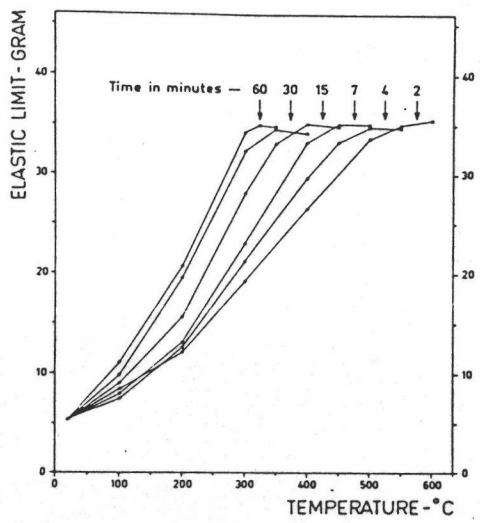
(400 องศาเซลเซียส) จะต้องใช้เวลาเพิ่มเป็น 20 นาที ในทางโลหะวิทยาแนะนำให้ใช้เวลา ซึ่งนานกว่านี้ เพื่อกำจัดความเค้นภายใน

Salzman (20) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิ 500 องศาฟาเรนไฮต์ (260 องศาเซลเซียส) นาน 20 นาที หรือ 750-820 องศาฟาเรนไฮต์ (400-440 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที

Thurow (38) กล่าวว่า การควบคุมกรรมวิธีผ่านความร้อน กระทำได้โดยการปรับอุณหภูมิและเวลา ปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิต่ำ คือ 400-700 องศาฟาเรนไฮต์ (200-350 องศาเซลเซียส) ด้วยเวลาที่นานพอสมควร ทั้งนี้ขึ้นกับขบวนการผลิตด้วย แต่ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถนำลวดที่ดัดโค้งไปทำกรรมวิธีผ่านความร้อนได้เป็นเวลานาน ๆ ในการใช้อุณหภูมิช่วงสั้น ๆ อุณหภูมิที่ใช้คงจะเป็น 800 องศาฟาเรนไฮต์ (425 องศาเซลเซียส) ในกรณีที่ได้กระทำกรรมวิธีผ่านความร้อน เพื่อกำจัดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกรรมวิธีการผลิตมาแล้ว

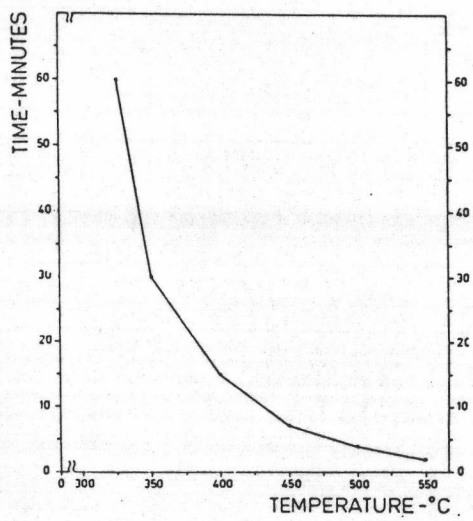
Ingerslev (8) ศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 18/8 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.45 มิลลิเมตร ซึ่งดัดเป็นรูปโค้งตามการเรียงตัวของฟันในขากรรไกร กลุ่มละ 10 ตัวอย่าง นำไปอบที่อุณหภูมิ 37, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 องศาเซลเซียส (100-932 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 7 นาที ขีดยืดหยุ่นจะสูงขึ้นภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อน เมื่อทดสอบลวดในลักษณะขยาย (Expansion) และดัดโค้งส่วนตรงของลวด (Bending) โดยที่อัตราเพิ่มของขีดยืดหยุ่นจะสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส (570 องศาฟาเรนไฮต์) แต่ขีดยืดหยุ่นจะลดลงเมื่อทดสอบลวดในลักษณะบีบปลายลวดเข้าหากัน (Compression) โดยอัตราลดของขีดยืดหยุ่นจะต่ำสุดที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส (120-210 องศาฟาเรนไฮต์) การวัดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร กระทำที่ส่วนปลายของลวด 0.5 มิลลิเมตร การศึกษาอีกส่วนหนึ่งของ Ingerslev คือ การศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน โดยใช้ลวดเช่นเดิม และจำนวนกลุ่มตัวอย่างเท่าเดิม อุณหภูมิที่ใช้คือ 100, 200, 300 องศาเซลเซียส (210-570 องศาฟาเรนไฮต์) และสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งขีดยืดหยุ่นคงที่ เวลาที่ใช้คือ 2, 4, 7, 15, 30 และ 60 นาที การทดสอบกระทำในลักษณะขยาย (Expansion) ผลที่ได้แสดงไว้

ในรูปที่ 12 และ 13 การเพิ่มเวลาสามารถลดอุณหภูมิลงได้ โดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงขีดยืดหยุ่น เขาแนะนำอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือ 350-375 องศาเซลเซียส (660-710 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 20-25 นาที



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 12 ขีดยืดหยุ่นของลวดโค้งซึ่งทดสอบโดยการขยาย อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ต่างกัน (8)



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและช่วงเวลาในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน เพื่อให้ได้ขีดยืดหยุ่นสูงสุด (8)

Backofen และ Gales (5) ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดตรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.020 นิ้ว โดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 500, 750 และ 820 องศาฟาเรนไฮต์ (260, 400, 440 องศาเซลเซียส) นาน 3, 10, 20 นาที จนถึง 2 ชั่วโมง การทดสอบทำในลักษณะแรงดึงเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ค่าความเค้นที่ขีดยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 820 องศาฟาเรนไฮต์ (440 องศาเซสเทียส) ค่าที่ได้จะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เวลาซึ่งนานกว่า 10 นาที ไม่มีผลทำให้ค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น การศึกษาอีกส่วนหนึ่งกระทำในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นเดิม ขนาด 0.021 x 0.025 นิ้ว ซึ่งดัดเป็นลูปปิด แบบไม่มีวงลวด (Closing loop with no helix) กรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบใช้อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที ความเค้นที่ขีดยืดหยุ่น (Elastic Strength) เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

Howe, Greener และ Crimmin (2) ทำการศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม หมายเลข 302 และ 316 ในลักษณะเส้นตรงยาว 7 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 500 จาก 700-1,050 องศาฟาเรนไฮต์ (260, 370-570 องศาเซลเซียส) โดยเพิ่มอุณหภูมิช่วงละ 50 องศา เวลานาน 30 วินาที 5 และ 15 นาที กลุ่มละ 6 ตัวอย่าง การทดสอบกระทำในลักษณะแรงดึง ในอัตรา 0.1 นิ้ว ต่อนาที ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองหมายเลข ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เพิ่มขึ้น 8 เปอร์เซ็นต์ ในหมายเลข 302 และค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เพิ่มขึ้น 8 เปอร์เซ็นต์ ในหมายเลข 302 และ 3-4 เปอร์เซ็นต์ ในหมายเลข 316 อุณหภูมิซึ่งทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงสุดคือ 700-900 องศาฟาเรนไฮต์ (370-480 องศาเซลเซียส) ช่วงอุณหภูมิซึ่งสามารถกำจัดความเค้นได้อย่างเหมาะสมคือ 750-950 องศาฟาเรนไฮต์ (400-510 องศาเซลเซียส) ปริมาณความเค้นที่ถูกกำจัดได้ที่ช่วงอุณหภูมินี้คือ 20-40 เปอร์เซ็นต์ ในหมายเลข 302 และ 12-30 เปอร์เซ็นต์ ในหมายเลข 316

Marcotte (10) ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค หมายเลข 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

0.016 นิ้ว โดยดัดเป็นสปริงแบบมีวงลวด (Coil Spring) กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง อุณหภูมิที่ใช้ได้แก่ 650, 700, 850, 950, 1,050 และ 1,150 องศาฟาเรนไฮต์ (340-620 องศาเซลเซียส) นาน 1, 6, 11 และ 16 นาที อุณหภูมิและเวลาซึ่งสามารถเพิ่มการดีดกลับ (Spring back) สูงสุดคือ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) นาน 11 นาที และการคืนรูป (Recovery) ของสปริง ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อน เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 650 องศาฟาเรนไฮต์ (340 องศาเซลเซียส) นาน 11 นาที

บริษัทยูนิเทก (Unitex Corporation) ได้แนะนำกรรมวิธีผ่านความร้อนสำหรับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์มาโครม ดังนี้ (19)

1. จุดประสงค์ในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนเพื่อกำจัดความเค้น (Stress Relief)

2. กรรมวิธีผ่านความร้อนที่นิยมใช้ในคลินิกคือ การใช้เครื่องเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Spot Welder) ร่วมกับเฟลซเพส (Flash Paste) ซึ่งจะลุกเป็นไฟที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) ในเวลาที่สั้นเป็นวินาที

3. กรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยเตาอบ กระทำที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) นาน 1 ชั่วโมง

Thurow (38) กล่าวว่า กรรมวิธีผ่านความร้อน เพื่อกำจัดความเค้นในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้ค่าเขตปฏิภาค (Proportional Limit) ความแข็งแรง (Strength) และระยะทำงาน (Range) เพิ่มขึ้น ขณะที่ความแกร่ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลง การทดสอบกระทำในลักษณะดัดโค้ง (Bending) ในลวดขนาดเล็ก จำเป็นต้องทำกรรมวิธีผ่านความร้อน มากกว่าในลวดใหญ่

จากการศึกษาที่ผ่านมา สรุปได้ว่า ผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนต่อคุณสมบัติเชิงกล ของลวดเหล็กไร้สนิมนั้น ในลวดตรงจะเพิ่มความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) และความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) ส่วนโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และความแกร่ง (Stiffness) ยังสรุปไม่ได้ว่าค่าที่เพิ่มขึ้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ในลวดที่ดัดเป็นลูป จะเพิ่มแรงของลูปในช่วงยืดหยุ่น และลูปสามารถทนต่อการเสียรูปอย่างถาวรได้ดีขึ้น ส่วนอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวด

ชนิดนี้คือ ประมาณ 600-950 องศาฟาเรนไฮต์ (315-510 องศาเซลเซียส) นาน 5 นาที ถึง 1 ชั่วโมง

ในการเปรียบเทียบกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ Lane และ Nikolai (14) ทำการศึกษาในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งผลิตโดยทีพี ขนาด 0.019 x 0.026 นิ้ว และ 0.021 x 0.027 นิ้ว และลวดเพอร์มาโครม ขนาด 0.019 x 0.025 นิ้ว และ 0.021 x 0.025 นิ้ว นำมาดัดเป็นลูปรูปหยดน้ำ (Tear-drop) ลูปปิดแบบมีวงลวดและไม่มีวงลวด (Simple and Helical Closing Loop) กลุ่มละ 6 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อน โดยเตาอบ กระทำที่อุณหภูมิ 850 องศาฟาเรนไฮต์ (455 องศาเซลเซียส) นาน 3.5 นาที การใช้กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ นาน 4 วินาที เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมความแกร่งของลูป (Loop Stiffness) เพิ่มขึ้น จากการใช้เตาอบ 11.8 เปอร์เซ็นต์ และกระแสไฟฟ้า 6.6 เปอร์เซ็นต์ ระยะทำงาน (Range) เพิ่มขึ้นจากการใช้เตาอบ 13.9 เปอร์เซ็นต์ และกระแสไฟฟ้า 9.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งสองวิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

6. กรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดชนิดนี้เกิดเนื่องจาก

1. การกำจัดความเค้น ในลักษณะเช่นเดียวกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (21)

2. การชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening หรือ Age hardening) (11, 13, 34)

คุณสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกรรมวิธีผ่านความร้อน

1. สปริงดีขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือ (21)

2. ริซิเลียนซ์เพิ่มขึ้นมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (39)

3. เพิ่มเขตปฏิภาคสูงกว่าลวดออสเตรเลียนเล็กน้อย (20)

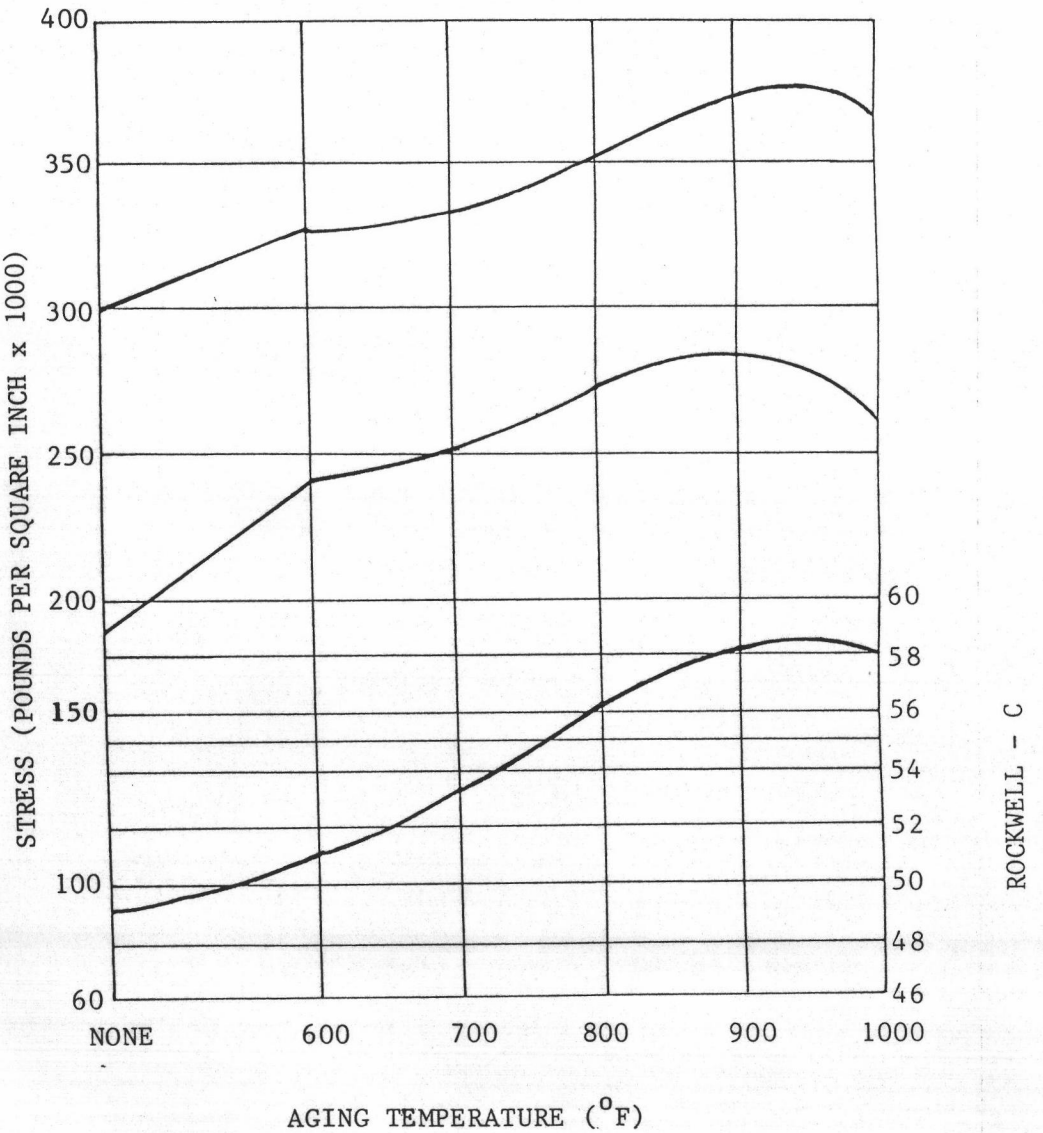
4. ความแข็งแรง (strength) และความแข็ง (hardness) สูงขึ้น (55) ดังรูปที่ 14

ความแข็งของโลหะนี้ ภายหลังจากกรรมวิธีผ่านความร้อน จะขึ้นอยู่กับความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นซึ่งมีอยู่เดิม ลวดอัลจิลอยสีฟ้าเมื่อทำกรรมวิธีผ่านความร้อนแล้ว จะไม่แข็งเท่าอัลจิลอยสีแดง ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อน (25) Fillmore และ Tomlinson (13) ทำการศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ทั้ง 4 ชนิด ขนาด 0.018 นิ้ว โดยดัดเป็นลูป กลุ่มละ 6 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อนกระทำโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮต์ (482 องศาเซลเซียส) นาน 5 นาที เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ก่อนกรรมวิธีผ่านความร้อน อัลจิลอยสีฟ้าสามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปถาวรได้น้อยที่สุด ขณะที่อัลจิลอยสีแดงทนได้มากที่สุด อัลจิลอยสีเหลืองทนต่อแรงได้เท่ากับอัลจิลอยสีเขียว แม้ว่าบริษัทผู้ผลิตจะให้ข้อมูลว่า อัลจิลอยสีเขียวทนแรงได้ดีกว่า เหตุผลเนื่องมาจาก อัลจิลอยสีเหลืองมีอัตราการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าอัลจิลอยสีเขียว จึงทนแรงได้มากหลังจากกรรมวิธีผ่านความร้อน ลูปจะทนต่อแรงได้มากขึ้น โดยที่อัลจิลอยสีฟ้าและแดงสามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปถาวรได้น้อย และมากที่สุด อัลจิลอยสีเหลืองทนต่อแรงได้มากกว่าอัลจิลอยสีเขียว เนื่องจากปริมาณความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น จะทำให้เกิดจุดเริ่มต้น (Nucleation) ของการตกผลึกเพิ่มขึ้น ขณะทำกรรมวิธีผ่านความร้อน

นอกจากนี้บริเวณที่ลวดถูกดัดเป็นมุมแหลม เมื่อทำกรรมวิธีผ่านความร้อน บริเวณนั้นจะเปราะกว่าบริเวณอื่น การป้องกันกระทำได้โดยใช้สำลีเปียกคลุมบริเวณนั้น ขณะทำกรรมวิธีผ่านความร้อน (21)

Thurow (38) กล่าวว่า กรรมวิธีผ่านความร้อนในโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม จะเพิ่มความแข็งแรง (Strength) และระยะทำงาน (Range) โดยการทดสอบลวดในลักษณะดัดโค้ง (Bending) นอกจากนี้ Craig (49) ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 482 องศาเซลเซียส (900 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 7 นาที ความแกร่ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น และจำนวนครั้งในการดัดลวดเป็นมุมฉาก จนลวดขาด ลดลง

Denver (11) ศึกษาผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ และโครเมียม ที่อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮต์ (482 องศาเซลเซียส) นาน 3 นาที ความอ่อนตัว (Ductility) ลดลง 70 เปอร์เซ็นต์ ในลวดที่ดัดเป็นลูป (Verticle loop) กรรมวิธีผ่านความร้อนเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงที่มาทำให้ลูปเสียรูปอย่างถาวรได้ 60 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 14 แสดงถึงความเค้น (Strength) และความแข็ง (Hardness) ที่เพิ่มขึ้นหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในอัลจิลอยที่ทำเป็นแผ่นบาง
เส้นบน แสดงถึง ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Uitimate Tensile Strength)
เส้นกลาง แสดงถึง ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength)
เส้นล่าง แสดงถึง ความแข็ง (Hardness) (55)

Hazel, Rohan และ West (56) ศึกษาการลดลงของแรงเมื่อสัมพันธ์กับเวลา (Force Relaxation) ในลวดโค้งซึ่งหักมุม (Tip Back) 30-45 องศา ตรงบริเวณฟันกรามทั้งสองข้าง การวัดแรงกระทำที่บริเวณฟันหน้า ส่วนหนึ่งของลวดตัวอย่างที่นำมาศึกษาเป็นอัลจิลอยสีเขียว ขนาด 0.016 นิ้ว และอัจจิลอยสีฟ้า ขนาด 0.016 x 0.022 นิ้ว ซึ่งผ่านกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยกระแสไฟฟ้า จากเครื่องเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Spot Welder) ร่วมกับอินดิเคตั้งเพส (Indicating Paste) ซึ่งลุกเป็นไฟที่อุณหภูมิ 482 องศาเซลเซียส (900 องศาฟาเรนไฮต์) และลวดชนิดเดียวกันซึ่งไม่ทำกรรมวิธีผ่านความร้อน สรุปได้ว่า กรรมวิธีผ่านความร้อนลดอัตราการลดลงของแรง (Relaxation) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในลวดอัลจิลอยสีเขียว ขนาด 0.016 นิ้ว สามารถกำจัดการลดลงของแรงได้

Fillmore และ Tomlinson (11) ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดอัลจิลอยสีฟ้า ขนาด 0.016 x 0.022 นิ้ว ซึ่งดัดเป็นลูป กลุ่มละ 6 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบกระทำที่อุณหภูมิ 600-1,500 องศาฟาเรนไฮต์ (320-820 องศาเซลเซียส) โดยเพิ่มอุณหภูมิช่วงละ 100 องศา นาน 5 นาที การใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับอินดิเคตั้งเพส ซึ่งจะลุกเป็นไฟที่อุณหภูมิ 950 องศาฟาเรนไฮต์ (510 องศาเซลเซียส) วัดการเสียรูปของลวดเมื่อได้รับแรงขนาดต่าง ๆ โดยเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 50 กรัม จนถึง 650 กรัม นานครั้งละ 15 วินาที เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม สรุปได้ว่า

1. การต้านทานต่อการเสียรูปอย่างถาวร จะเพิ่มสูงสุดเมื่อทำกรรมวิธีผ่านความร้อน โดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 1,200 องศาฟาเรนไฮต์ (650 องศาเซลเซียส)

2. ความต้านทานต่อการเสียรูปอย่างถาวร เมื่อทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 900 และ 1,200 องศาฟาเรนไฮต์ (482 และ 650 องศาเซลเซียส) เท่ากับ 95 และ 174 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

3. กรรมวิธีผ่านความร้อน โดยใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับอินดิเคตั้งเพส จะให้ผลเทียบเท่ากับการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยเตาอบ ที่อุณหภูมิระหว่าง 800-900 องศาฟาเรนไฮต์ (425-482 องศาเซลเซียส) ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Brenner, Brantley และ Conover (57) ซึ่งทำการศึกษาลวดในลักษณะตรง ทดสอบโดยการดัดโค้ง และลักษณะลูป แบบมีวงลวด (Helical loop)

William, Caputo และ Chaconas (12) ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดอัลจิลอยสีฟ้า ขนาด 0.016 x 0.016 นิ้ว ในลักษณะตรงยาว 7 นิ้ว กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อนกระทำโดยเตาอบที่อุณหภูมิ 700, 800, 900, 950, 1,000 และ 1,050 องศาฟาเรนไฮต์ (370-565 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที การทดสอบกระทำในลักษณะแรงดึง ด้วยอัตรา 0.1 นิ้ว ต่อนาที ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) (ออฟเซต 0.2 เปอร์เซ็นต์) เพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความเค้นสูงสุดจากแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) และโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาฟาเรนไฮต์ (510 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและเวลาซึ่งเพิ่มค่าคุณสมบัติเชิงกลสูงสุด ดังรูปที่ 15 การศึกษาในส่วนหลัง ศึกษาในลวดชนิดและขนาดเดียวกัน โดยดัดเป็นลูปเปิดและปิด แบบที่มีวงลวดและไม่มีวงลวด (Open Loop, Helical Open Loop, Closed Loop, Helical Closed Loop) กลุ่มละ 20 ตัวอย่าง หลังจากกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาฟาเรนไฮต์ (510 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที แรงที่ได้จากการปรับลวด (Force-Activation Characteristic) สูงกว่ากลุ่มควบคุม เมื่อปรับลวดในระยะเท่ากัน ลูปที่มีวงลวด (Helix) จะให้แรงน้อยกว่าลูปที่ไม่มีวงลวด

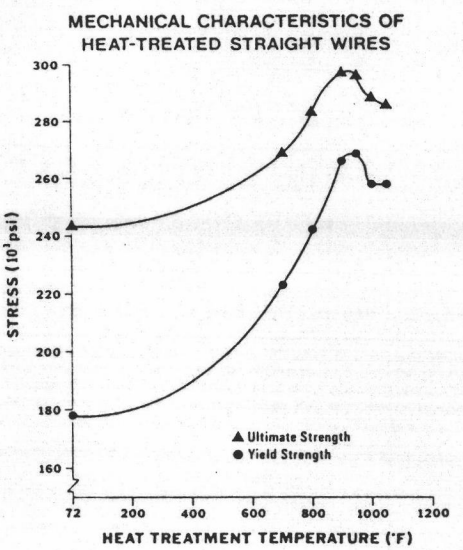
บริษัทรอกกีเมาเทน (Rocky Mountain) (21) ได้แนะนำกรรมวิธีผ่านความร้อน สำหรับลวดอัลจิลอย ดังนี้คือ

1. การใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮต์ (482 องศาเซลเซียส) นาน 7-12 นาที

2. การใช้กระแสไฟฟ้า เนื่องจากลวดขนาดใหญ่จะร้อนเร็วกว่าลวดขนาดเล็ก ดังนั้นในการป้องกันความร้อนที่สูงเกินไป (Overheating) จำเป็นต้องใช้อินดิเคติ้งเพส (RM Temper-Indicating Paste) ในลวดที่ใหญ่กว่า 0.020 นิ้ว (0.508 มิลลิเมตร) โดยป้ายเพสนี้ตรงกลางลวด หรือตรงด้านข้างห่างจากขาจับ $\frac{1}{4}$ นิ้ว หมุนปุ่มปรับความร้อนที่หมายเลข 2 หรือ 3 ให้กระแสไฟฟ้าผ่าน จนกระทั่งอินดิเคติ้งเพสลุกเป็นไฟ จึงหยุดกระแสไฟฟ้า

ในลวดขนาดเล็กกว่า 0.020 นิ้ว (0.508 มิลลิเมตร) กรรมวิธีผ่านความร้อนจะช้ากว่าลวดใหญ่ และจะต้องใช้ความร้อนที่หมายเลข 3 หรือ 4 ในลวดที่มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถทำให้ความร้อนสูงได้อย่างพอเพียง จึงต้องทำกรรมวิธีผ่านความร้อนเป็นส่วน ๆ โดยการใช้สายต่อ (RM Adapting Cable) เพื่อป้องกันความร้อนที่สูงเกินไป (Overheating) อาจจะใช้อินดิเคตั้งเพสร่วมด้วยได้ แต่ไม่จำเป็นนัก เพราะจะบ่ายไม่ติด เวลาที่ใช้อาจจะสังเกตจากสีของลวดที่เปลี่ยนไปเป็นสีหญ้าแห้งเข้ม (Dark Straw Color) ร่วมด้วย ในบางกรณีอาจจะต้องทำกรรมวิธีผ่านความร้อนซ้ำอีกครั้งในลวดขนาดเล็ก

3. การใช้เปลวไฟ เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการเพิ่มสปริงของลวดอัลจิลอย ซึ่งดัดเป็นฟิงเกอร์สปริง (Finger Spring) ลิงกัลอาร์ช (Lingual Arch) หรือดัดเป็นสปริงแบบมีวงลวด (Coil Spring) แหล่งกำเนิดความร้อนได้แก่ ไม้ขีด หรือเปลวไฟ โดยการเคลื่อนลวดผ่านไปมาบนเปลวไฟ วิธีนี้ใช้ได้ผลดีในลวดอัลจิลอยขนาดใหญ่ แต่จะไม่ให้ผลที่สม่ำเสมอตลอดเส้น



รูปที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นที่จุดคราก และความเค้นสูงสุด จากการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (12)

บริษัทเดนเตารุม (Dentaurum) (22) แนะนำอุณหภูมิและเวลาสำหรับกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดชนิดนี้ โดยการอบในเตาที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส (750-930 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 30-60 นาที ขึ้นกับปริมาณความแข็ง (Hardening) ที่ต้องการ

บริษัทออร์มโก (Ormco) (55) แนะนำอุณหภูมิและเวลาสำหรับกรรมวิธีผ่านความร้อน ในลวดกลมชนิดนี้คือ 980 องศาฟาเรนไฮต์ (530 องศาเซลเซียส) นาน 5 ชั่วโมง

จากการศึกษาที่ผ่านมา สรุปได้ว่า การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม เนื่องจากกรรมวิธีผ่านความร้อน ได้ผลคล้ายกับในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม คือในลวดตรงจะเพิ่มค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) โมดูลัสความแกร่ง (Modulus of Stiffness) และความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) ในลวดที่ดัดเป็นลูป พบว่าสามารถทนต่อการเสียรูปอย่างถาวรได้ดีขึ้น ส่วนอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดชนิดนี้คือ ประมาณ 900-1,200 องศาฟาเรนไฮต์ (480-650 องศาเซลเซียส) นาน 5 นาที ถึง 1 ชั่วโมง

Martin, Sarkar และ Schawaninger (15) ศึกษาผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ ในลวดอัลจิลอยสีฟ้า ขนาด 0.016 x 0.022 นิ้ว โดยทำกรรมวิธีผ่านความร้อน ดังนี้

1. การใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 950 องศาฟาเรนไฮต์ (510 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที

2. การใช้กระแสไฟฟ้า โดยเครื่องเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Spot Welder) ร่วมกับเครื่องมือสำหรับทำกรรมวิธีผ่านความร้อน (Heat Treating Unit) ของบริษัทรอกกีเมาเทน โดยหมุนปุ่มปรับความร้อนที่หมายเลข 4 (Heavy) ร่วมกับอินดิเคติ้งเพส

การทดสอบในส่วนแรกกระทำในลวดตรง กลุ่มละ 10 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อน เพิ่มค่าความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง (Flexure Yield Strength) และโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ลดจำนวนครั้งที่สามารถดัดลวดเป็นมุมฉากจนลวดขาด เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม การเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีผ่านความร้อนทั้งสองวิธีนั้น การใช้กระแสไฟฟ้าได้ค่าความเค้นที่จุดครากในลักษณะดัดโค้ง

(Flexure Yield Strength) สูงกว่าการใช้เตาอบ แต่ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และจำนวนครั้งที่สามารถดัดลวดเป็นมุมฉากจนลวดขาด ไม่แตกต่างกัน ($p < .01$)

การทดสอบในช่วงที่สองกระทำในลวดซึ่งดัดเป็นลูปปิด (Closing loop) กลุ่มละ 20 ตัวอย่าง ลูปที่ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยเตาอบ จะให้แรงมากกว่าลูปที่ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยไม่มีสำลีเบียกคลุม ($p < .05$) ลูปที่ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยไม่มีสำลีเบียก จะให้แรงมากกว่าลูปที่ทำกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีสำลีเบียกคลุม และกลุ่มควบคุม ($p < .01$) โดยที่ 2 กลุ่มหลังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปได้จากการศึกษาของ Fillmore และ Tomlinson (11) กับ Martin, Sarkar และ Schawaninger (15) ว่า กรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยเตาอบ เหมาะสมกับลวดที่ดัดเป็นลูป และกรรมวิธีผ่านความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าเหมาะสมกับลวดตรง

ในการทำกรรมวิธีผ่านความร้อนเปรียบเทียบกันระหว่างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม Mahler และ Goodwin (9) ทำการศึกษาในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ชนิด และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม 3 ชนิด นำมาดัดเป็นลูปเปิดและปิด แบบที่มีวงลวดและไม่มีวงลวด (Open Loop, Helical Open Loop, Closed Loop, Helical Closed Loop) กลุ่มละ 10 ตัวอย่าง กรรมวิธีผ่านความร้อนสำหรับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที และสำหรับลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ที่อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮต์ (482 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที โดยเตาอบ ทดสอบโดยใช้แรงดึง วัดค่าแรงที่ขีดยืดหยุ่น (Elastic Force Limit) โดยใช้ออฟเซต (Offset) 0.25 มิลลิเมตร และค่าสัดส่วนการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นต่อแรง (Elastic Deformation/Force Ratio) ผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนเพิ่มค่าแรงที่ขีดยืดหยุ่น ซึ่งค่าสูงสุดได้แก่ ลวด HI-T ของบริษัทยูนิเทก และลดสัดส่วนการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นต่อแรง ซึ่งลวดออสเตรเลียนจะให้ค่าต่ำกว่าลวดชนิดอื่นเล็กน้อย

Asgharnia และ Brantley (16) ได้ทำการศึกษากรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และลวดโลหะผสม ระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม หลายขนาด ทั้งกลม และเหลี่ยม ในลักษณะเส้นตรง กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง การทดสอบกระทำโดยการดัดโค้ง และการดึง การดัดโค้งใช้ช่วงความยาวลวดในการทดสอบ 1 นิ้ว ในอัตรา 1 องศา ต่อวินาที ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) พิจารณาที่ออฟเซต 0.5 เรเดียน (2.9 องศา) การดึงใช้ช่วงความยาวลวดเท่ากัน อัตราการดึง 0.1 นิ้ว ต่อนาที ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) พิจารณาจากออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทำกรรมวิธีผ่านความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮต์ (482 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที สำหรับลวดทั้งสองชนิด ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ หรือน้อยกว่า และในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม เพิ่มขึ้น 10-20 เปอร์เซ็นต์ การดัดโค้งให้ค่าสูงกว่าการดึง ความเค้นที่จุดครากในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 5-20 เปอร์เซ็นต์ และในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม เพิ่มขึ้น 20-30 เปอร์เซ็นต์ การดัดโค้งจะให้ค่าสูงกว่าการดึงเช่นเดียวกัน

Fillmore และ Tomlinson (13) เปรียบเทียบกรรมวิธีผ่านความร้อน ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดอัลจิลอยสีแดง ขนาด 0.018 นิ้ว ก่อนกรรมวิธีผ่านความร้อน ลูปซึ่งตัดจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทนต่อการเปลี่ยนรูปถาวรได้สูงกว่าลูปซึ่งตัดจากลวดอัลจิลอยสีแดง แต่ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนผลที่ได้ตรงข้าม

Thurow (38) กล่าวว่า ความแกร่ง (Stiffness) ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ไม่แตกต่างกัน สามารถใช้แทนกันได้ กรรมวิธีผ่านความร้อนและการขึ้นรูปเย็น มีผลต่อความแกร่งน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบลวดทั้งสองชนิดในด้านความแข็งแรง (Strength) และระยะทำงาน (Range) พบว่าลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ซึ่งมีความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นปานกลางถึงสูง และผ่านกรรมวิธีผ่านความร้อน หรือลวดซึ่งมีความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นสูง แต่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีผ่านความร้อน จะเท่ากับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม ที่มีความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นต่ำ จะมีความแข็งแรง และระยะทำงานต่ำกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค ซึ่งมีความแกร่งเท่ากัน

จากการศึกษาที่ผ่านมา สรุปได้ยากว่า ลวดชนิดใดมีคุณภาพสูงกว่า

กรรมวิธีผ่านความร้อนในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคกระทำเพื่อกำจัดความเค้นภายใน ซึ่งเกิดจากการดัดและกรรมวิธีการผลิต ที่อุณหภูมิ 600-900 องศาฟาเรนไฮต์ (315-510 องศาเซลเซียส) นาน 5 นาที ถึง 1 ชั่วโมง ส่วนในลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม กระทำเพื่อกำจัดความเค้นภายใน และเพื่อเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก ที่อุณหภูมิ 900-1200 องศาฟาเรนไฮต์ (480-650 องศาเซลเซียส) นาน 5 นาที ถึง 1 ชั่วโมง กรรมวิธีผ่านความร้อนเพิ่มค่าคุณสมบัติเชิงกลในลวดตรง ซึ่งได้แก่ โมดูลัสของการยืดหยุ่น ความเค้นแรงดึงสูงสุด และความเค้นที่จุดคราก ในลวดที่ดัดเป็นลูปจะทนต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรได้ดีขึ้น ตรงกันในลวดทั้งสองชนิด การเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ และการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลวดทั้งสองชนิดภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อน ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้