หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Moyer, R.E., Handbook of Orthodontics, pp. 4, 276, Year Book Medical Publishers Incorporated, Chicago, 3rd ed., 1973.
2. Howe, G.L., E.H. Greener, and D.S. Crimmins, "Mechanical Properties and Stress Relief of Stainless Steel Orthodontic Wire," Am. J. Orthod., 38 (3), 244-249, 1968.
3. Kusy, R.P., and A.R. Greenberg, "Effects of Composition and Cross Section on the Elastic Properties of Orthodontic Wires," Angle Orthod., 51 (4), 325-341, 1981.
4. Waters, N.E., W.J.B. Houston, and C.D. Stephens, "The Characterization of Arch Wires for the Initial Alignment of Irregular Teeth," Am. J. Orthod., 79 (4), 373-389, 1981.
5. Backofen, W.A., and G.F. Gales, "Heat Treating Stainless Steel for Orthodontics," Am. J. Orthod., 38 (4), 755-765, 1952.
6. Kemler, E.A., "Effect of Low-temperature Heat Treatment on the Physical Properties of Orthodontic Wire," Am. J. Orthod., 42 (10), 793, 1956.
7. Wilkinson, J.V., "The Effect of High Temperatures on Stainless Steel Orthodontic Arch Wire," Australian Dental Journal, 5 (10), 264-268, 1960.
8. Ingerslev, C.H., "Influence of Heat Treatment on the Physical Properties of Bent Orthodontic Wire," Angle Orthod., 36 (3), 236-247, 1966.
9. Mahler, D.B., and L. Goodwin," An Evaluation of Small Diameter Orthodontic Wires," Angle Orthod., 37 (1), 13-17, 1967.
10. Marcotte, M.R., "Optimum Time and Temperature for Stress Relief Heat Treatment of Stainless Steel Wire," J. Dent. Res., 52 (6), 1171-1175, 1973.

11. Fillmore, G.M., and J.L. Tomlinson, "Heat Treatment of Cobalt-Chromium Alloy Wire," Angle Orthod., 46 (2), 187-195, 1976.

12. Williams, B.R., A.A. Caputo, and S.J. Chaconas," Orthodontic Effects of Loop Design and Heat Treatment," Angle Orthod., 48 (3), 235-239, 1978.

13. Fillmore, G.M., and J.L. Tomlinson," Heat Treatment of Cobalt-Chromium Alloys of Various Tempers," Angle Orthod., 49 (2), 126-130, 1979.

14. Lane, D.F., and R.J. Nikolai," Effects of Stress Relief on the Mechanical Properties of Orthodontic Wire Loops," Angle Orthod., 50 (2), 139-145, 1980.

15. Martin, R.L., N.K. Sarkar, and B. Schwaninger, "Effect of Heat Treatment on Various Properties of Blue Elgiloy," J. Clin. Orthod., 18 (6), 432-435, 1984.

16. Asgharnia, M.K., and W.A. Brantley, "Comparison of Bending and Tension Tests for Orthodontic Wires," Am. J. Orthod., 89 (3), 228-236, 1986.

17. Hasund, A., The Bergen-Technique, p. 13, Orthodontic Department Dental School University of Bergen, Bergen, 1972.

18. Adams, J.W., "Stainless Steels in Dentistry and Orthodontics," Dental Clinics of North America, Symposium on Dental Materials, (Phillips, R.W.), pp. 773-788, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1958.

19. Schmidt, P.A., Unitex Corporation, 2724 South Peck Road, Monrovia, CA 91016, Personal Communication.

20. Salzman, J.A., Practice of Orthodontics, Vol. 2, pp. 725-729, J.B. Lippincotte Company, Philadelphia, 1966.

21. Rocky Mountain/Orthodontics," Elgiloy and Truchrome Stainless Steel," Division of Rocky Mountain/Associates International Inc., Denver, 1977.

22. StÖhrle, J.K., Firma Dentaurum, Hans-Peter Winkelstroeter KG, Postfach 440, D-7530 Pforzheim, Personal Communication.

23. Waters, N.E., C.D. Stephens, and W.J.B. Houston, "Physical Characteristics of Orthodontic Wires and Archwires-Part 1," Br. J. Orthod., 2 (1), 15-24, 1975.

24. สายสุนีย์ เหลียวเรืองรัตน์ และ ยุทธศักดิ์ วณีสอน, Instrument Analysis Manual, หน้า 6-7, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2525-26.

25. Renfroe, E.H., Edgewise, pp. 14-19, 28, Lea & Febiger, Philadelphia, 1975.

26. วัชระ เพชรคุปต์, การจัดฟันด้วย Edgewise Lightwire เทคนิค, หน้า 22, ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2527.

27. Council on Dental Materials and Devices, "New American Dental Association Specification No. 32 for Orthodontic Wires Not Containing Precious Metals," JADA, 95 (6), 1169-1171, 1977.

28. Waters, N.E., "An Improved Method for the Yield in Bending of Straight Orthodontic Wires," Br. J. Orthod., 8 (2), 89-98, 1981.

29. เจน รัตนไพศาล, ทันตวัสดุศาสตร์, หน้า 20-27, 57-61, 63-64, สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, กรุงเทพมหานคร, 2522.

30. Phillips, R.W., Skinner's Science of Dental Materials, pp. 19, 28-42, 258-267, 285-289, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 8th ed., 1982.

31. Van Vlack, L.H., Elements of Materials Science and Engineering, pp. 5-10, 188, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusettes, 3rd ed., 1975.

32. Greener, E.H., J.K. Harcourt, and E.P. Lautenschlager, Materials Science in Dentistry, pp. 44-52, 205-211, The Williams & Wilkins Co., Baltimore, 1972.

33. Jarabak, J.R., and J.A. Fizzell, Technique and Treatment with Light-wire Edgewise Appliances , Vol. 1, pp. 19-27, The C.V. Mosby Company, Saint Louis, 2nd ed., 1972.

34. ทะนง ฉัตรอุทัย, โลหะ (เจือ) ในทางทันตกรรม, หน้า 114-126, คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2528.

35. Twelftree, C.C., G.J. Cocks, and M.R. Sims, "Tensile Properties of Orthodontic Wire," Am. J. Orthod., 72 (6), 682-687, 1977.

36. Nikolai, R.J., Bioengineering Analysis of Orthodontic Mechanics, pp. 95-97, Lea & Febiger, Philadelphia, 1985.

37. Burstone, C., Concurrent Orthodontic Concepts and Technique (Graber, T.M.ed.) Vol. 1, pp. 168-169, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1969.

38. Thurow, R.C., Edgewise Orthodontics , pp. 16-18, 42-46, 49-53, 58, 231-233, The C.V. Mosby Company, St. Louis, 4th ed., 1982.

39. Kohl, R.W., "Metallury in Orthodontics," Angle Orthod., 34 (1), 37-52, 1964.

40. Burstone, C.J., "Variable-Modulus Orthodontics," Am. J. Orthod., 80 (1), 1-16, 1981.

41. มนัส สถิรจินดา, เอกสารประกอบการสอนเรื่องเหล็กกล้าไร้สนิม, ภาควิชาวิศวกรรม โลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร,

42. Gaston, N.G., and La. Monroe, "Chrome Alloy in Orthodontics," Am. J. Orthod., 37 (10), 779-796, 1951.

43. Wilkinson, J.V., "Some Metallurgical Aspects of Orthodontic Stainless Steel," Am. J. Orthod., 48 (3), 192-206, 1962.

44. มนัส สถิรจินดา และ ผาสุข กุลละวณิชย์, โลหะวิทยาขั้นพื้นฐาน, หน้า 13, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2503.

45. Peyton, F.A., "Cast Chromium-Cobalt Alloys," Dental Clinics of North America,Symposium on Dental Materials, (Phillips, R.W.), pp. 759-771, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1958.

46. Drake, S.R., D.M. Wayne, J.M. Powers, and K. Asgar, "Mechanical Properties of Orthodontic Wires in Tension, Bending, and Torsion," Am. J. Orthod., 82 (3), 206-210, 1982.

47. Metals Handbook Committee, Metals Handbook (lyman, T. ed.), pp. 195, 1136-1140, The American Society for Metals, Ohio, 1948.

48. Desy, A. et J. Vidts, Métallurgie Structural (Théorique et Appliquée), pp. 191-192, Dunod, Paris, 1962.

49. Craig, R.G., Dental Materials, pp. 217-223, The C.V. Mosby Company, Saint Louis, 1978.

50. British Standard 3507, "Orthodontic Wire and Tape and Dental Ligature Wire," British Standard Institution, London, 1976.

51. Brick, R.M., A.W. Pense, and R.B. Gordon, Structure and Properties of Engineering Materials, pp. 80-87, Mc Graw-Hill Kokakusha LTD, Tokyo, 4th. ed., 1977.

52. Richman, G.Y., "Practical Metallurgy for the Orthodontist," Am. J. Orthod., 42 (8), 573-587, 1956.

53. Goldberg, A.J., R. Vanderby, Jr., and C.J. Burstone, "Reduction in the Modulus of Elasticity in Orthodontic Wires," J. Dent. Res., 56 (10), 1227-1231, 1977.

54. Wagner, J.A., and R.J. Nikolai, "Stiffness of Incisor Segments of Edgewise Arches in Torsion and Bending," Angle Orthod., 55 (1), 37-50, 1985.

55. Lyon, G., Ormco/Division of Sybron Corporation, 1332 South Lone Hill Avenue, Glendora, CA 91740, Personal Communication.

56. Hazel, R.J., G.J. Rohan, and V.C. West, "Force Relaxation on Orthodontic Arch Wires," Am. J. Orthod., 86 (5), 396-402, 1984.

57. Brenner, J., W. Brantley, and J. Conover, "Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Orthodontic Wires," J. Dent. Res. 60 (Special Issue A), 439, 1981.

58. Williams, J.C., "The Effects of Residual Stress, Thermal Stress-Relief, and Electrolytic Polishing on the Elastic Properties of Australian Wire," Am. J. Orthod., 50 (10), 785, 1964.

59. Waters, N.E., W.J.B. Houston, and C.D. Stephens, "The Heat Treatment of Wires," Br. J. Orthod., 3 (4), 217-222, 1976.

60. Ingram, S.B., D.P. Gipe, and R.J. Smith, "Comparative Range of Orthodontic Wires," Am. J. Orthod., 90 (4), 296-307, 1986.

61. Sterachinda, M., "Les Aciers Maraging (Maraging Steel)," M thesis, Faculté Poly technique de Mons, Belgium, 1964-1965.

62. Yoshikawa, D.K., C.J. Burstone, A.J. Goldberg, and J. Morton, "Flexure Modulus of Orthodontic Stainless Steel Wires," J. Dent. Res., 60 (2), 139-145, 1981.

63. Brantley, W.A., W.S. Augat, C. Louis Myers, and R.V. Winders, "Bending Deformation Studies of Orthodontic Wires," J. Dent. Res., 57 (4), 609-615, 1978.

64. Goldberg, A.J., C.J. Burstone, and H.A. Koenig, "Plastic Deformation of Orthodontic Wires," J. Dent. Res., 62 (9), 1016-1020, 1983.

ภาคผนวก ก

เนื่องจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน เพื่อศึกษาผลของกรรมวิธีผ่านความร้อนต่อคุณสมบัติดังกล่าว ไม่อาจกระทำได้โดยตรงในลวดโค้ง ดังนั้นจึงทดสอบในลวดตรงภายหลังทำกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุด เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมการทดสอบกระทำในลักษณะแรงดึง โดยคุณสมบัติเชิงกลซึ่งนำมาวิเคราะห์ ได้แก่ โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ (Proof Stress 0.1 % Offset) และความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

<u>การรวบรวมข้อมูล</u>

1. ลวดแต่ละบริษัทแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง โดยกลุ่มทดลองทำกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ และกลุ่มควบคุม เป็นกลุ่มตัวอย่างซึ่งไม่ได้ทำกรรมวิธีผ่านความร้อน

2. ขนาดของแรงดึง วัดโดยเครื่องมือ UNIVERSAL TESTING DSS-10T ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 28 ก ลวดจะถูกดึงด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตร ต่อนาที ค่าแรงปรับให้อ่านได้สูงสุด 100 กิโลกรัม และอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กิโลกรัม การทดสอบจะกระทำจนลวดขาด

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความยาวของลวดที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 29 นำมาคำนวณหาค่าดังต่อไปนี้

2.1 โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คำนวณจากสูตร

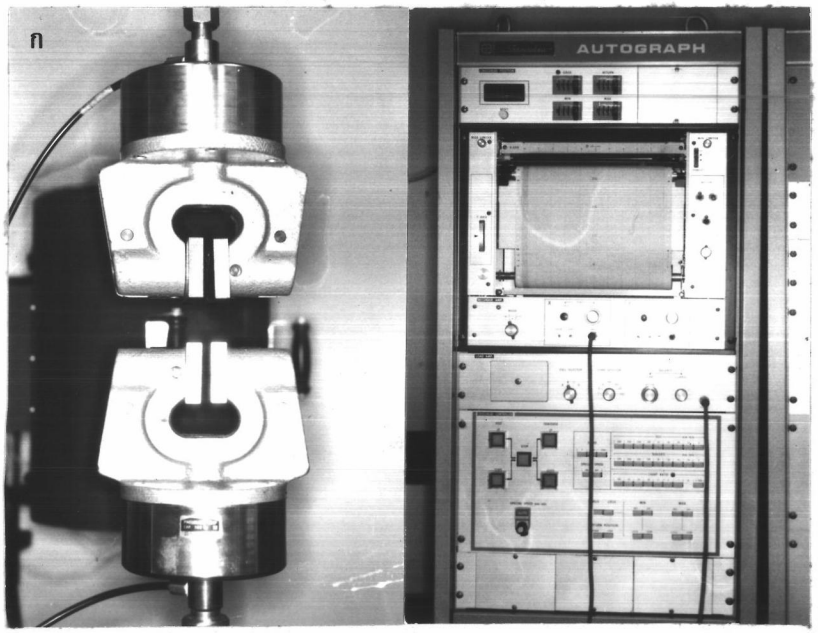
$$E = \frac{F/A}{e/l}$$

เมื่อ E = โมดูลัสของการยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น MPa

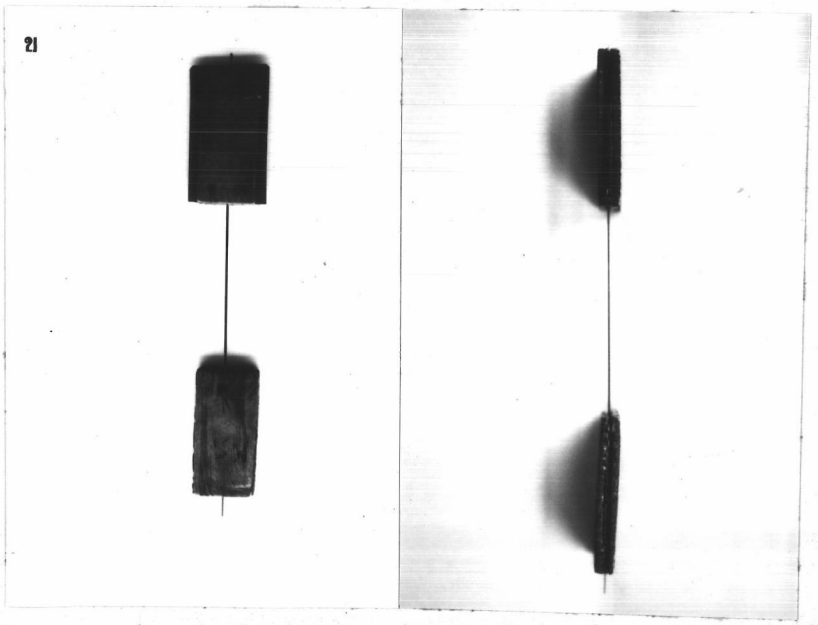
F = แรง ณ จุดซึ่งใช้คำนวณในช่วงยืดหยุ่น มีหน่วยเป็นนิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดของลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

ก



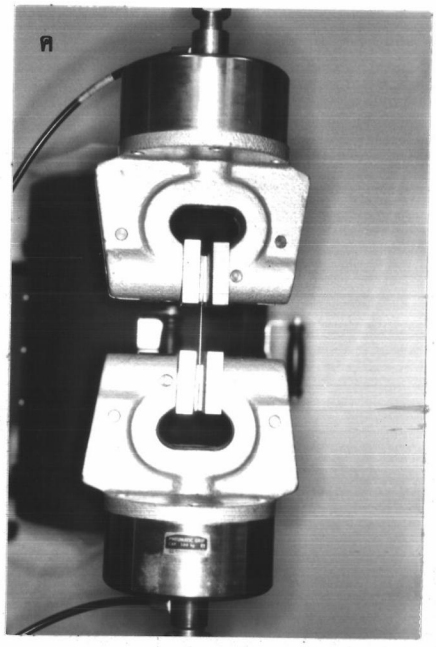
ข

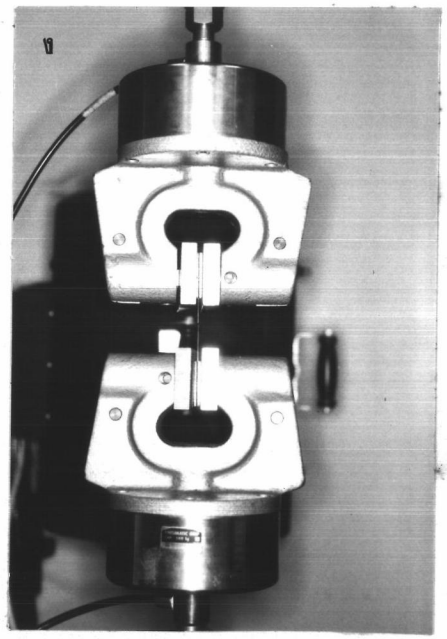


หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 28 ก ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องมือ UNIVERSAL TESTING DSS-10T

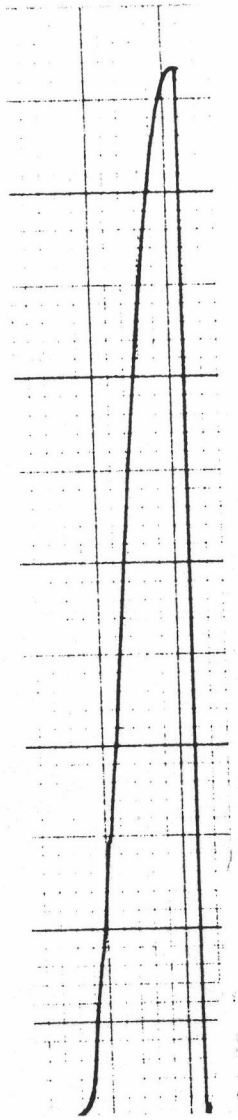
ข ลักษณะของตัวอย่างลวดที่เตรียมเสร็จแล้ว การเตรียมตัวอย่างลวดให้เหมาะสมกับส่วนซึ่งจับชิ้นงาน กระทำได้โดยใช้แผ่นทองเหลืองหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ประกบระหว่างลวดตัวอย่าง และส่วนซึ่งจับชิ้นงาน เพื่อลดแรงกดที่กระทำต่อลวดระหว่างแผ่นทองเหลืองและลวดมีกระดาษทรายหมายเลขเมชนัมเบอร์ 400 (mesh No.400) คั่นกลาง เพื่อเพิ่มความยึดให้กับที่จับลวด ขณะทำการทดสอบ (16) ยึดลวด กระดาษทราย และแผ่นทองเหลืองด้วยกาว เพื่อยึดให้เป็นชิ้นเดียวกัน การเตรียมตัวอย่างกระทำที่ปลายทั้งสองข้างของลวด โดยให้ห่างกัน 2 นิ้ว





ค ลวดตัวอย่างขณะทำการทดสอบ

ง ลวดตัวอย่างซึ่งขาด เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง



รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความยาวของลวดที่เปลี่ยนไป ซึ่งบันทึกโดยเครื่องมือ UNIVERSAL TESTING DSS-10T

e = ความยาวของลวดที่เพิ่มขึ้น ณ จุดซึ่งใช้คำนวณในช่วงยืดหยุ่น มีหน่วยเป็นเมตร

l = ความยาวเริ่มต้นของลวด มีหน่วยเป็นเมตร

จากกราฟในรูปที่ 30 ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสของการยืดหยุ่น คำนวณ ณ จุด ก. ข. และ ค. ซึ่งแต่ละจุดมีค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

2.2 ความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ (Proof Stress 0.1 % Offset) คำนวณจากสูตร

$$Sp = Fp/A$$

เมื่อ Sp = ความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ มีหน่วยเป็น MPa

Fp = แรงดึงที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ มีหน่วยเป็นนิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดของลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

จากกราฟในรูปที่ 31 Fp เป็นแรง ณ จุดตัดระหว่างเส้น ซึ่งลากจากจุดซึ่งมีความเครียด 0.1 เปอร์เซ็นต์ บนแกน x (ความเครียด) ขนานกับเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นกับเส้นกราฟในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร

2.3 ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) คำนวณจากสูตร

$$S\ max = F\ max/A$$

เมื่อ S max = ความเค้นแรงดึงสูงสุด มีหน่วยเป็น MPa

F max = แรงดึงสูงสุดก่อนวัสดุขาด มีหน่วยเป็นนิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดของลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

จากกราฟในรูปที่ 31 แสดงถึงการหาค่า F max

หาค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation, C.V.) และความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error, S.E.) ของค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ (Proof Stress 0.1 % Offset)

และความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังตารางที่ 19-21 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ ซึ่งให้ค่าแรงสูงสุดในลวดโค้ง ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของลวดเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น ความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 เปอร์เซ็นต์ และความเค้นแรงดึงสูงสุด ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ ในลวดตรงทั้งชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติคและโลหะผสมโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม มีค่าเพิ่มขึ้น

WIRE	CONDITION	$\bar{X}$ 10^4 MPa	S.D. 10^4 MPa	C.V. (%)	S.E.
Permachrome	Non Heat-treated	9.5718	0.2204	2.3026	0.0986
	Heat-treated	9.8323	0.5635	5.7311	0.2520
Nubryte	Non Heat-treated	8.2634	1.0041	12.1512	0.4490
	Heat-treated	9.2191	0.7571	8.2123	0.3386
Blue Elgiloy	Non Heat-treated	8.3835	0.9460	11.2841	0.4231
	Heat-treated	10.2920	1.2214	11.8675	0.5462
Remaloy® blue	Non Heat-treated	9.3673	0.8300	8.8606	0.3712
	Heat-treated	11.3424	0.7409	6.5321	0.3313

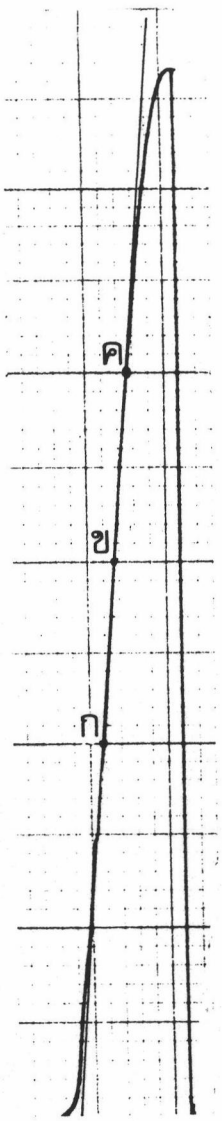
ตารางที่ 19 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม

WIRE	CONDITION	$\bar{X}$ 10^3 MPa	S.D. 10^3 MPa	C.V. (%)	S.E.
Permachrome	Non Heat-treated	1.7619	0.2247	12.7533	0.1005
	Heat-treated	1.9069	0.0801	4.2005	0.0358
Nubryte	Non Heat-treated	1.7367	0.0527	3.0345	0.0236
	Heat-treated	2.0084	0.1021	5.0836	0.0437
Blue Elgiloy	Non Heat-treated	1.3403	0.0166	1.2385	0.0083
	Heat-treated	1.5410	0.0289	1.8754	0.0129
Remaloy® blue	Non Heat-treated	1.4410	0.0629	4.3650	0.0281
	Heat-treated	1.8805	0.0847	4.5041	0.0379

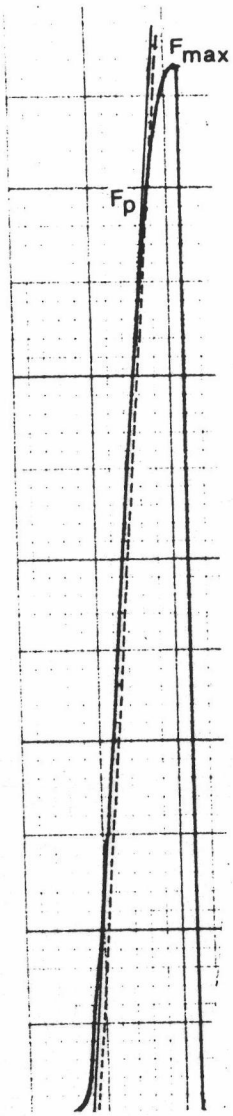
ตารางที่ 20 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของความเค้นพิสูจน์ที่ออฟเซต 0.1 % (Proof Stress 0.1 % Offset) ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม

WIRE	CONDITION	$\bar{X}$ 10^3 MPa	S.D. 10^3 MPa	C.V. (%)	S.E.
Permachrome	Non Heat-treated	2.0872	0.1040	4.9828	0.0465
	Heat-treated	2.3029	0.0558	2.4230	0.0250
Nubryte	Non Heat-treated	2.1767	0.0364	1.6723	0.0163
	Heat-treated	2.3691	0.0112	0.4728	0.0050
Blue Elgiloy	Non Heat-treated	1.6363	0.0410	0.5057	0.0205
	Heat-treated	1.8370	0.0399	2.1720	0.0178
Remaloy® blue	Non Heat-treated	1.7919	0.0270	1.1719	0.0094
	Heat-treated	2.2903	0.0132	0.5763	0.0059

ตารางที่ 21 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนโดยเตาอบ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค และลวดโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ นิเกิล และโครเมียม



รูปที่ 30 แสดงถึงจุดทั้ง 3 จุด ในช่วงยืดหยุ่น ซึ่งใช้คำนวณค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น ได้แก่ จุด ก. ข. และ ค. ค่าซึ่งคำนวณได้ในแต่ละจุดจะแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ นำค่าทั้ง 3 มาเฉลี่ยเป็นค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นของตัวอย่างลวดนั้น



รูปที่ 31 แสดงถึง Fp และ F max ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าความเค้นพิสูจน์ และความเค้นแรงดึงสูงสุด

ภาคผนวก ข

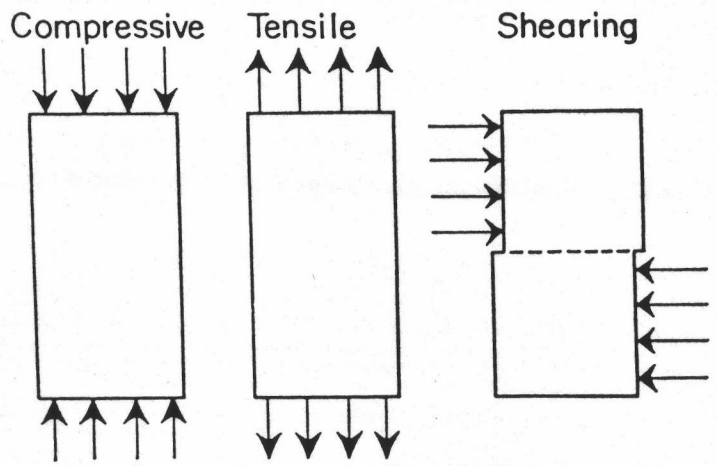
ศัพท์ที่เกี่ยวข้อง (Terminology)

แรง (Force)

คือ อิทธิพลภายนอกที่สามารถทำให้วัตถุเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนรูป (20, 29, 30) แบ่งเป็น

1. แรงอัด (Compression) คือ แรงที่บีบวัตถุเข้าหากัน
2. แรงดึง (Tension) คือ แรงที่ดึงวัตถุออกจากกัน
3. แรงเฉือน (Shear) คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุในแนวเฉียง ทำให้ชั้นบาง ๆ ของวัตถุเคลื่อนออกจากกันไปทางด้านข้าง

นอกจากนี้ยังมีแรงแบบอื่น ๆ อีก ได้แก่ แรงบิด (Torque) แรงดัดโค้ง (Bending) เป็นต้น



รูปที่ 32 แสดงลักษณะต่าง ๆ ของแรง (20)

ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) (20, 30, 31, 32, 33, 39)

1. ความเค้น (Stress)

หมายถึง แรงต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งเกิดขึ้นในวัตถุที่สามารถทนต่อแรงจากภายนอกได้ ถ้ามีแรงขนาด 200 นิวตัน (Newtons) กระทำต่อลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 ตารางมิลลิเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของลวด ดังนั้น

$$S\ (\delta) \text{ หรือ ความเค้น} = \frac{200}{0.000002}$$

$$= 100 \text{ เมกกะนิวตัน ต่อ ตารางเมตร}$$

หรือ เมกกะปัสคาล (MPa)

ในระบบอังกฤษ มีหน่วยเป็น ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว

ในระบบเมตริก มีหน่วยเป็น เมกกะนิวตัน ต่อ ตารางเมตร หรือ เมกกะปัสคาล (MPa)

2. ความเครียด (Strain)

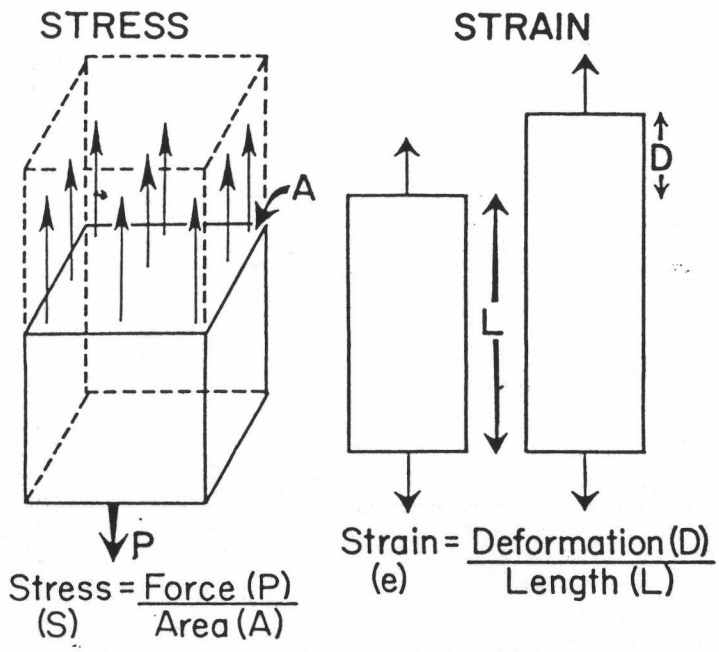
หมายถึง ปริมาณของการเปลี่ยนรูป (Deformation) ต่อความยาว 1 หน่วย ถ้าลวดยาว 10 เซ็นติเมตร และถูกยืดออก 0.1 เซนติเมตร เมื่อมีแรงมากระทำ ดังนั้น

$$e\ (\varepsilon) \text{ หรือ ความเครียด} = \frac{0.1}{1} = 0.1 \text{ เซนติเมตร ต่อ เซนติเมตร}$$

ในระบบอังกฤษ มีหน่วยเป็น นิ้ว ต่อ นิ้ว หรือ ฟุต ต่อ ฟุต

ในระบบเมตริก มีหน่วยเป็น เซนติเมตร ต่อ เซนติเมตร

ความเครียดอาจจะเกิดในช่วงที่วัตถุเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) หรือถาวร (Plastic) หรืออาจจะเป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงทั้งสองแบบ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น วัตถุจะกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อหยุดความเครียดที่มากระทำ แต่การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรนั้น เมื่อหยุดความเครียดที่มากระทำ วัตถุไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในโครงสร้างอะตอม



รูปที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเค้นและความเครียด (20)

การพิจารณาความเค้นจะกระทำทั้งในด้านทิศทางและขนาด จากทิศทางจะสามารถแบ่งความเครียดออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) คือ แรงที่วัสดุออกเพื่อต้านทานการเสียรูป เนื่องจากแรงภายนอกมากระทำในแนวที่ทำให้วัสดุเหยียดหรือยืด ผลที่ตามมาคือ ความเครียดแรงดึง (Tensile Strain)

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) คือ แรงภายในของวัสดุที่ต่อต้านแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ ในลักษณะกด หรือทำให้วัสดุสั้นลง ผลที่เกิดตามมาคือ ความเครียดแรงอัด (Compressive Strain)

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress หรือ Shearing Stress) เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวเฉือน หรือเลื่อนวัตถุให้ขาดจากกัน ผลที่ตามมาคือ ความเครียดแรงเฉือน (Shearing Strain)

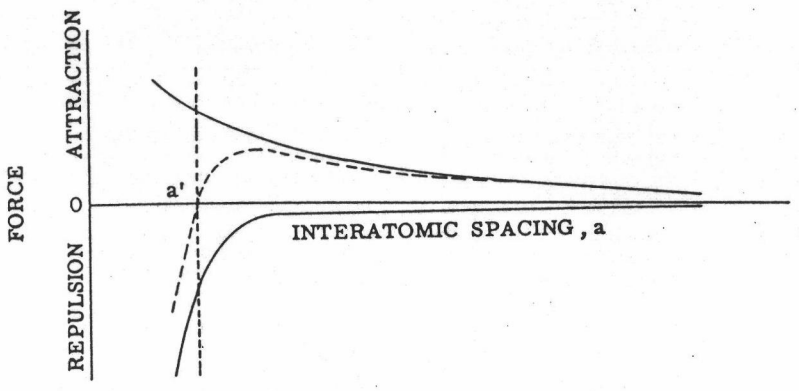
3. การพิจารณาความเค้นและความเครียดในระดับโมเลกุล (30, 31)

ความสมดุลในการรวมกันของอะตอม ขึ้นอยู่กับระดับของพลังงานและแรงระหว่างอะตอม ในรูปที่ 34 แสดงไว้ในรูปของแรง และในรูปที่ 35 แสดงไว้ในรูปของระดับพลังงาน ถ้าพลังงานแรงรวมระหว่างแรงดึงดูดและแรงผลักของอะตอม จะได้เป็นเส้นประในรูปที่ 34 เมื่อนำแรงรวมที่ได้จากเส้นประนี้คูณด้วยระยะห่างระหว่างอะตอม จะได้กราฟดังรูปที่ 35 สภาพที่สมดุลคือมีระดับพลังงานน้อยที่สุด จะตรงกับช่วงที่ระยะห่างระหว่างอะตอม เท่ากับ 0-a' สังเกตได้ว่าระดับพลังงานจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะระหว่างอะตอมน้อยกว่า a' และเช่นเดียวกัน เมื่อระยะระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้นมากกว่า a' ระดับพลังงานจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะกลับลดลงมาจนกระทั่งเป็นศูนย์ เมื่อระยะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

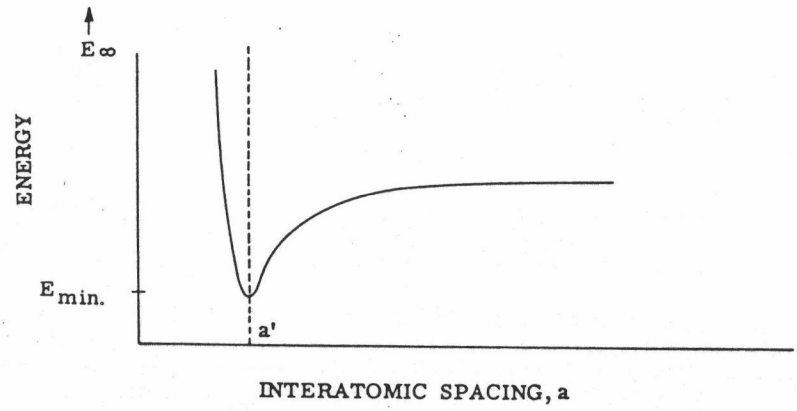
ระยะระหว่างอะตอมซึ่งปกติ (0-a') อาจถูกเพิ่มหรือลด โดยใช้แรงจากภายนอกมากระทำได้ เช่น ถ้าอะตอมถูกแรงดึงให้ห่างออกจากกัน ระยะระหว่างอะตอมจะเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ทั้งแรงรวม (รูปที่ 34) และพลังงาน (รูปที่ 35) จะเพิ่มขึ้น เมื่อหยุดแรงที่มากระทำ พลังงานจะกลับคืนสู่สภาพต่ำสุดเช่นเดิม และอะตอมจะกลับสู่สภาพที่สมดุล (ระยะระหว่างอะตอมเท่ากับ (0-a')

ถ้าแรงที่มากระทำมีค่าสูง พลังงานและแรงดึงดูดระหว่างอะตอมจะลดลงเมื่ออะตอมแยกออกจากกัน จนกระทั่งวัตถุเกิดการแตกหัก

ความเค้นแรงอัดเช่นเดียวกัน แต่ปริมาณของความเครียดจะจำกัด เนื่องจากเมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมน้อยกว่า a' ระดับพลังงานจะสูงขึ้นมากทันที



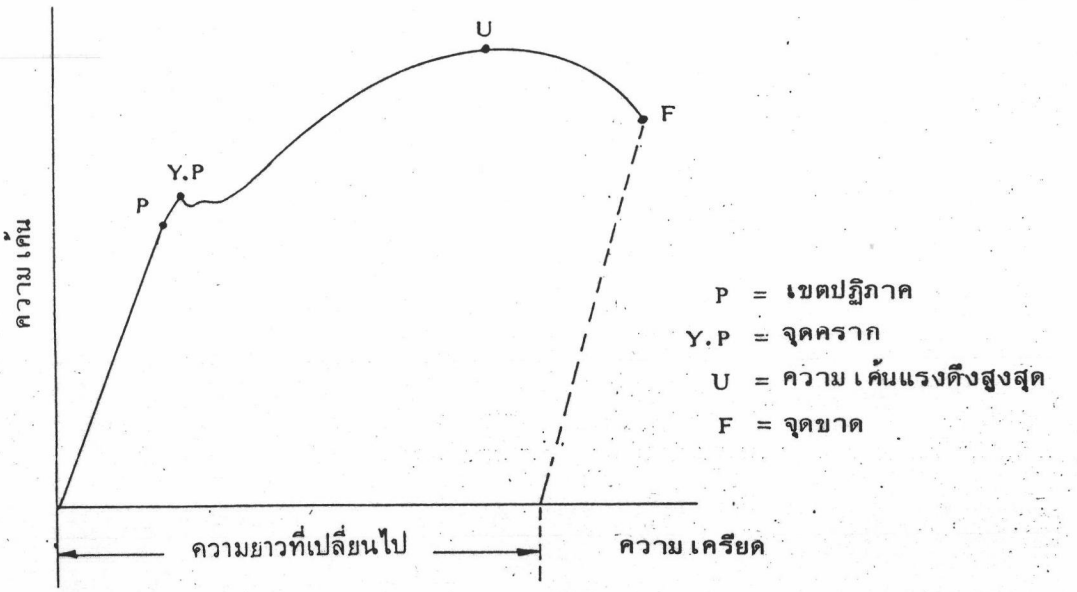
รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ของแรงระหว่างอะตอมกับระยะห่างระหว่างอะตอม (30)



รูปที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานระหว่างอะตอม (Interatomic Potential Energy) กับระยะห่างระหว่างอะตอม (30)

4. เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

โดยทั่วไปการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะกระทำในรูปของกราฟ ซึ่งวางความเค้นไว้ในแนวดิ่ง และความเครียดไว้ในแนวนอน ดังรูปที่ 36 เส้นกราฟนี้เป็นพื้นฐานคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป



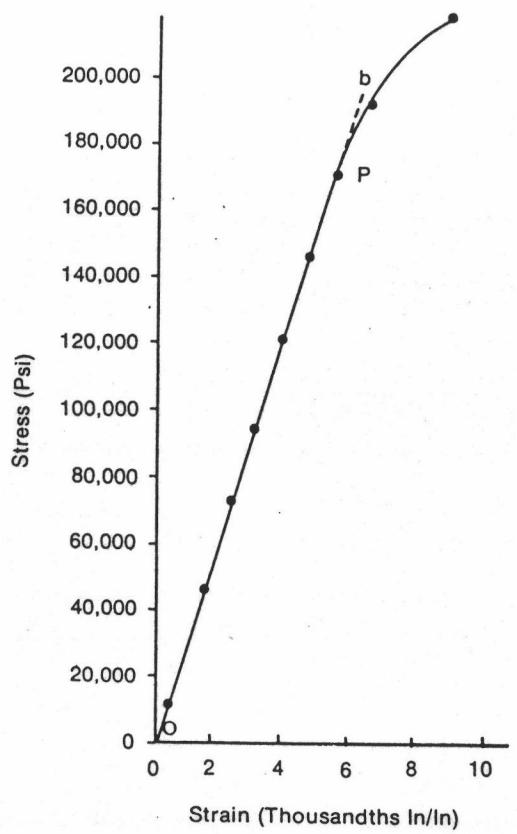
รูปที่ 36 แสดงเส้นสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ของเส้นลวดที่เป็นเหล็กเหนียว เมื่อถูกแรงดึง (29)

ขีดยืดหยุ่น (Elastic Limit) (30)

คือความเค้นสูงสุดที่วัสดุได้รับ และยังคงคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อหยุดแรงที่มากระทำ เมื่อใช้แรงดึงกระทำต่อลวดในปริมาณน้อย หลังจากเอาแรงออก ลวดจะกลับเข้าสู่สภาพเดิม นั่นคืออะตอมจะสามารถเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งปกติได้ ถ้าเพิ่มแรงที่มากระทำต่อไปจนกระทั่งเมื่อเอาแรงออก ลวดก็ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แสดงว่าแรงดังกล่าวมากเกินกว่าขีดยืดหยุ่นของลวด

ขีดยืดหยุ่นเป็นจุดสุดท้ายที่วัสดุสามารถรับน้ำหนักได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร เมื่อเลยขีดนี้ไปแล้ว วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร

จากเส้นกราฟ ขีดยืดหยุ่นจะอยู่เหนือจากจุดสุดท้ายที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ความเค้นที่ขีดนี้เรียกว่า ความเค้นที่ขีดยืดหยุ่น (Elastic Strength) และความเครียดที่ขีดนี้เรียกว่า ความเครียดที่ขีดยืดหยุ่น (Elastic-limit Strain) (36)



รูปที่ 37 เส้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของลวดที่ใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม จากกราฟ เขตปฏิภาคเท่ากับ 1150 MPa (167,000 psi) โมดูลัสของการยืดหยุ่น 230,000 MPa (33,300,000 psi) โมดูลัสริชิเลียนซ์ 2.9 เมกกะจูล ต่อลูกบาศก์เมตร (420 นิ้ว-ปอนด์ ต่อลูกบาศก์นิ้ว) ความเค้นแรงดึงสูงสุด 1620 MPa (235,000 psi) (30)

เขตปฏิภาค (Proportional Limit)(30, 32, 43)

คือจุดสุดท้ายที่เส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง ถ้าลวดถูกดึงให้ยืดออกทีละน้อยจนลวดขาด โดยใช้แรงที่ต่อเนื่องกัน เริ่มต้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง (ดังรูปที่ 37) และถ้าต่อเส้นตรงนี้ออกไปตามจุดไข่ปลา (b) จุด P จะเป็นจุดที่เส้นเริ่มโค้ง ความเค้นที่จุด P เรียกว่าเขตปฏิภาค (Proportional Limit)

จากกฎของฮุค (Hooke's Law) ความเค้นมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดตรงช่วงการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรง เนื่องจากเขตปฏิภาคเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่เป็นไปตามกฎนี้ ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าเขตปฏิภาคคือความเค้นสูงสุดที่วัสดุได้รับในช่วงที่ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด

Kohl (39) กล่าวว่า ค่าของเขตปฏิภาคของลวดขึ้นกับองค์ประกอบดังต่อไปนี้คือ

1. ส่วนประกอบทางเคมีของลวด
2. กรรมวิธีผ่านความร้อน (Heat Treatment)
3. ปริมาณการขึ้นรูปเย็น (Cold Working)

ในทางทันตกรรมจัดฟัน ถ้าลวดที่นำมาใช้มีค่าเขตปฏิภาคสูง แสดงว่าดัดยาก ในการดัดต้องใช้แรงที่มากเพียงพอ เพื่อทำให้ลวดมีรูปร่างตามต้องการ

ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) (16, 29, 30, 31, 36)

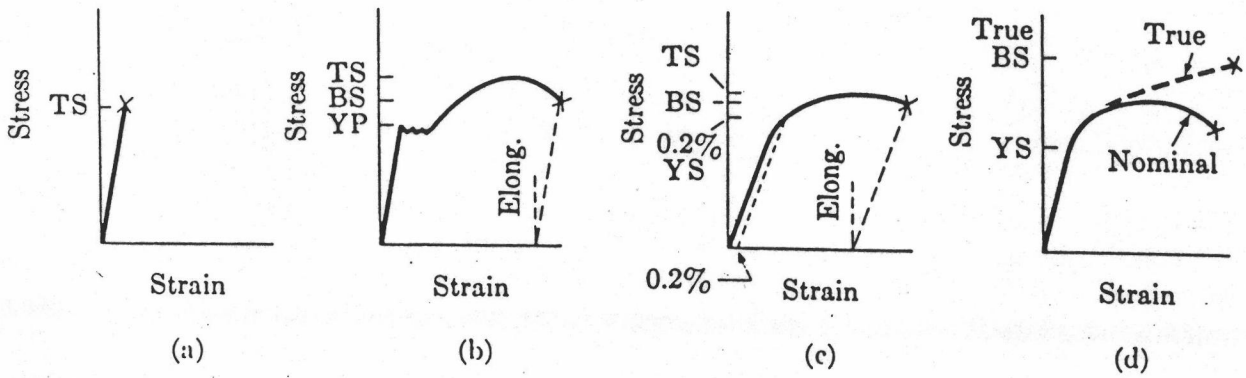
เนื่องจากนิยามของขีดยืดหยุ่นและเขตปฏิภาคไม่เหมาะสมต่อการปฏิบัติ ถ้าเครื่องมือที่นำมาวัดมีความไวเพียงพอ จะสามารถวัดตำแหน่งซึ่งเบี่ยงเบนออกจากกฎของฮุค และเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร โดยเฉพาะในการทดสอบโลหะและโลหะผสม ดังนั้นจากการประมาณ จะสามารถสังเกตจุดที่เริ่มมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงอย่างเห็นได้ชัด จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) ความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) ดังนั้นจุดครากจะสูงกว่าเขตปฏิภาค

ในลวดทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งถูกขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ขณะผ่านกรรมวิธีการผลิต จะไม่สามารถสังเกตจุดคราก (Yield Point) ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 37 การกำหนดขอบเขตของขีดยืดหยุ่น (Elastic Limit) กระทำได้โดย การลากเส้นจากจุดซึ่ง

ความเครียด (Strain) มีค่าเท่ากับ 0.1 หรือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ขนานกับเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดช่วงแรกซึ่งเป็นเส้นตรง ขึ้นไปตัดเส้นเดียวกันนี้ ณ จุดซึ่งสูงกว่าเขตปฏิภาค (Proportional Limit) ดังรูปที่ 38 C ความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress)

ค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ตรงตำแหน่งที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 หรือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะแตกต่างกันมากหรือน้อยนั้น ขึ้นกับอัตราของการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) หรือความชันของเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร นั่นคือขึ้นกับชนิดของโลหะผสมที่นำมาทดสอบ และกรรมวิธีในการผลิต

ถึงแม้ว่าขีดยืดหยุ่น เขตปฏิภาค และความเค้นพิสูจน์ ตามนิยามแล้วจะมีความแตกต่างกัน แต่ในทางปฏิบัติอาจจะใช้แทนกันได้ ค่าเหล่านี้มีความสำคัญในการทดสอบลวดทางทันตกรรมจัดฟัน เพราะแสดงถึงความเครียด ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุ



รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (31)

a) เป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Fragile) ซึ่งจะไม่มีช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation)
b) วัสดุที่มีความเหนียว และเห็นจุดคราก (Yield Point) ชัดเจน เช่น เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมในปริมาณต่ำ
c) วัสดุที่มีความเหนียว แต่ไม่มีจุดครากชัดเจน เช่น อะลูมิเนียม
d) เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยคำนวณพื้นที่หน้าตัดขณะนั้น (True) กับคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดเริ่มแรก (Nominal)

<u>โมดูลัสของการยืดหยุ่น</u> (Modulus of Elasticity) (29, 30, 31, 32, 33, 39)

ในรูปที่ 36, 37 ถ้านำความเค้นที่ต่ำกว่า หรือ เท่ากับ เขตปฏิภาค หารด้วยความเครียด ที่จุดเดียวกัน จะได้ค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น หรือโมดูลัสของยัง (Young's Modulus E) ค่านี้มีความสัมพันธ์กับความชัน (Slope) ของเส้นตรง ในรูปที่ 36, 37 ค่านี้ สามารถนำไปอธิบายความแกร่งของวัสดุได้ (Rigidity หรือ Stiffness)

เนื่องจากโมดูลัสของการยืดหยุ่นเป็นสัดส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด ดังนั้น ลวดซึ่งมีค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นสูง จะดัดได้ยาก

สูตรที่ใช้คำนวณโมดูลัสของการยืดหยุ่นที่เกิดจากแรงดึง ได้แก่

$$E = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

จากนิยาม ความเค้น = F/A

ความเครียด = e/l

ถ้า E = โมดูลัสของการยืดหยุ่น

F = แรงที่มากระทำ

A = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่ได้รับความเค้น

e = ความยาวที่เพิ่มขึ้น

l = ความยาวเดิม

ดังนั้น $E = \frac{F/A}{e/l} = \frac{F/l}{eA}$

หน่วยของโมดูลัสของการยืดหยุ่นมีค่าเป็นแรงต่อ 1 หน่วยพื้นที่ ในระบบอังกฤษ เป็น ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว และระบบเมตริก เป็น ปัสคาล (ดังตารางที่ 22)

ค่าของโมดูลัสของการยืดหยุ่นในโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่สามารถ เปลี่ยนแปลงได้โดยกรรมวิธีผ่านความร้อน หรือการขึ้นรูปเย็น (Cold Working (23, 37, 38)

ความสามารถในการปิดตัว (Flexibility) (30)

ในสภาวะบางอย่างที่ต้องการใช้วัสดุที่มีความเครียดสูง ขณะที่ความเค้นมีขนาดปานกลาง หรือน้อย เช่น ในเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน จะต้องใช้ลวดที่สามารถโค้งงอไปได้เป็นระยะไกล และมีความเค้นต่ำ คุณสมบัตินี้เรียกว่า ความสามารถในการปิดตัว (Flexibility) ความสามารถในการบิดตัวสูงสุด (Maximum Flexibility) คือความเครียดสูงสุด ที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นที่เขตปฏิภาค

ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการบิดตัว เขตปฏิภาค และโมดูลัสของการยืดหยุ่น เป็นดังนี้คือ

ถ้า E = โมดูลัสของการยืดหยุ่น

P = เขตปฏิภาค

ε_m = ความสามารถในการบิดตัวสูงสุด

$E = P/\varepsilon_m$ หรือ $\varepsilon_m = P/E$

MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Property, or characteristic	Symbol	Definition (or comments)	Common units	
			English	SI
Stress	σ	Force/unit area (F/A)	psi* $lb_f/in.^2$	pascal* ($N†/m^2$)
Strain	ϵ	Fractional deformation ($\Delta L/L$)	—	—
Elastic modulus	E	Stress/elastic strain	psi	pascal
Strength		Stress at failure	psi	pascal
Yield	YS	Resistance to plastic deformation		
Tensile	TS	Maximum strength (based on original dimensions)		
Ductility		Plastic strain at failure	—	—
Elongation	El	$(L_f - L_o)/L_o$		
Reduction of area	R of A	$(A_o - A_f)/A_o$		
Toughness		Energy for failure by fracture	ft-lb	joules
Hardness‡		Resistance to plastic indentation	Empirical units	

* 1 pascal (Pa) = 1 newton/m^2 = 0.145×10^{-3} psi; 1000 psi = 6.894 MPa.
† A load of 1 kg mass produces a force F of 9.8 newtons (N) by gravity.
‡ Three different procedures are commonly used to determine hardness values:
Brinell (BHN): A large indenter is used. The hardness is related to the diameter (1 to 4 mm) of the indentation.
Rockwell (R): A small indenter is used. The hardness is related to the penetration depth. Several different scales are available, based on the indenter size and the applied load.
Vickers (DPH): A small diamond pyramid and a very light load are used. The indentation size is measured under a microscope.

ตารางที่ 22 แสดงกลสมบัติของวัสดุ (31)

ในทางทันตกรรมจัดฟัน (38) อาจใช้คำว่าระยะทำงาน (Working Range) แทนความสามารถในการบิดตัวสูงสุดได้ และจะเป็นองค์ประกอบที่บอกได้ว่าสามารถเคลื่อนสปริงไปได้เป็นระยะทางเท่าใดในการปรับลวด (Activate) แต่ละครั้ง

<u>การดีดกลับ</u> (Spring Back) (46)

คืออัตราส่วนระหว่างจุดครากต่อโมดูลัสของการยืดหยุ่น หรืออาจเรียกได้ว่าความเครียดสูงสุดที่ขีดยืดหยุ่น (Maximum Elastic Strain) ค่าของการดีดกลับจะขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของออฟเซต (Offset) ที่ใช้คำนวณจุดคราก ในกรณีที่ไม่สามารถแยกขีดยืดหยุ่นกับช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุได้อย่างชัดเจน ค่าของการดีดกลับที่สูง ทำให้สามารถปรับลวด (Activate) มากขึ้นได้ในแต่ละครั้ง

<u>ริซิเลียนซ์</u> (Resilience) (30, 32, 43)

เนื่องจากเราสามารถวัดพลังงานที่วัสดุได้รับจากแรงภายนอกได้ จากรูปที่ 34 ถ้าระยะระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้น พลังงานระหว่างอะตอมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย พลังงานในช่วงที่ความเค้นไม่เกินเขตปฏิภาค เรียกว่า ริซิเลียนซ์ ดังนั้น ริซิเลียนซ์ หมายถึง ปริมาณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุ เมื่อความเค้นมีค่าไม่เกินเขตปฏิภาค

การวัดค่าริซิเลียนซ์ กระทำในรูปของโมดูลัสริซิเลียนซ์ ซึ่งก็คือปริมาณพลังงานที่สะสมในวัตถุ ถ้าวัสดุ 1 หน่วยปริมาตร ถูกแรงกระทำจนถึงเขตปฏิภาค ค่าของโมดูลัสริซิเลียนซ์จะคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ถ้า R = โมดูลัสริซิเลียนซ์

P = เขตปฏิภาค

ε_m = ความสามารถในการบิดตัวสูงสุด

E = โมดูลัสของการยืดหยุ่น

เนื่องจากวัสดุได้รับความเค้นจาก 0 ถึง P

ดังนั้น ความเค้นโดยเฉลี่ย $= \frac{0 + P}{2} = \frac{P}{2}$

พลังงานต่อ 1 หน่วยปริมาตร $= R = \frac{P}{2} \times \varepsilon_m$

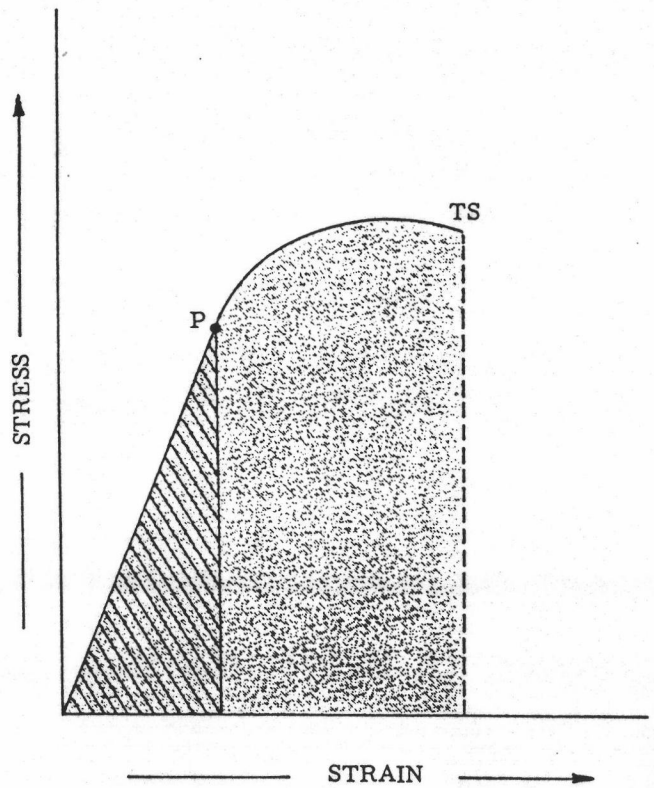
$= \frac{P}{2} \times \frac{P}{E}$

$= \frac{P^2}{2E}$

ค่าของโมดูลัสริซิเลียนซ์ มีค่าเท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 39 จากพื้นที่ของสามเหลี่ยมมุมฉาก เขตปฏิภาคจะเป็นความสูงและความสามารถในการปิดตัวสูงสุดเป็นฐานของสามเหลี่ยม

โมดูลัสริซิเลียนซ์ มีหน่วยเป็น พลังงานต่อปริมาตร 1 หน่วย ระบบอังกฤษเป็น นิ้วปอนด์ ต่อ ลูกบาศก์นิ้ว และระบบเมตริก มีหน่วยเป็น เมกกะจูล ต่อ ลูกบาศก์เมตร

สูตร $R = P^2/2E$ มีความสำคัญในการเลือกวัสดุทางทันตกรรม เห็นได้ว่า เขตปฏิภาคจะมีผลต่อค่าโมดูลัสริซิเลียนซ์มาก



รูปที่ 39 แสดงถึงเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดจากแรงดึง เขตปฏิภาค แสดงไว้ด้วยจุด P และความเค้นแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) แสดงไว้ที่ TS ริซิเลียนซ์ ได้แก่ พื้นที่ที่ได้เส้นสัมพันธ์ส่วนที่ตรง ซึ่งเป็นปริมาณที่ดีไว้ด้วยเส้นขนาน และความเหนียว คือบริเวณพื้นที่ซึ่งเป็นเงาทึบ (30)

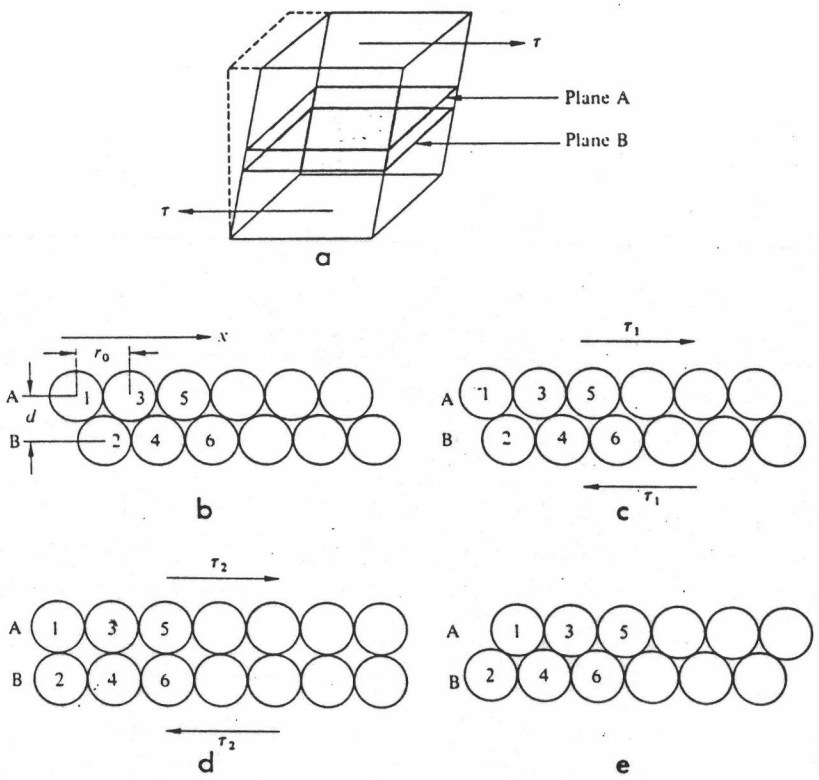
<u>การเปลี่ยนรูปอย่างถาวร</u> (Permanent Deformation) (30)

จากรูปที่ 34 เมื่อแรงกระทำมีค่าสูงมาก อะตอมจะถูกแยกจากกันถาวรและแตก แต่ในความเป็นจริง วัสดุประกอบด้วยอะตอมเป็นจำนวนล้าน ๆ แตกต่างจากในรูปที่ 34 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอะตอมเพียง 2 อะตอม ระยะระหว่างอะตอมจะห่างจากกันได้มากกว่าระยะที่ตรงกับจุดที่มีความเค้นสูงสุด ในรูปที่ 34 อะตอมจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่จะไม่เกิดการแตก

จากรูปที่ 37 เส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะไม่เป็นเส้นตรงที่เหนือจุด P ขึ้นไป แต่จะมีลักษณะโค้งจนกระทั่งวัสดุขาด เส้นในรูปที่ 37 เป็นลักษณะที่สมบูรณ์ แต่ไม่สามารถทำนายลักษณะของเส้นโค้งเหนือจุด P ได้ ต่างจากบริเวณใต้จุด P สังเกตได้ว่า ความเค้นจะไม่เป็นสัดส่วนกับความเครียด เหมือนกับในช่วงแรก

ถ้าเอาแรงออก ค่าของความเค้นที่เกิดจากแรงภายนอกมากระทำจะเป็นศูนย์ แต่ค่าของความเครียดไม่เป็นศูนย์ แม้ว่าเป็นลวดหรือวัสดุอื่นใดก็ตาม ถ้าถูกงอหรือยืดจนเปลี่ยนรูปถาวรไปแล้ว เมื่อเอาแรงที่มากระทำออกไป ก็จะยังคงมีผลของความเค้นระหว่างอะตอมคงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นได้จากความเครียดอย่างถาวร (Plastic Strain)

การอธิบายการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของผลึกเมื่อได้รับแรงเฉือน แสดงอยู่รูปที่ 10 การเปลี่ยนรูปนี้เกิดจากกรรมวิธีการเลื่อน (Slip Process) ของระนาบ A ไปบนระนาบ B ซึ่งอยู่ภายใต้



รูปที่ 40 การเลื่อนของระนาบอะตอมที่ชิดกัน

a) แสดงถึงของแข็งเมื่อได้รับแรงเฉือน และระนาบ A และ B อยู่ชิดกัน

b) แสดงถึงรูปร่างของระนาบ A และ B ขณะที่ยังไม่ได้รับแรง

c) แสดงถึงแรงเฉือนที่มากระทำ ทำให้ระนาบ A เคลื่อนผ่านระนาบ B

d) แสดงถึงแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น ระนาบทั้งสองเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นในตำแหน่งนี้จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานสะสมสูงสุดที่ขีดยืดหยุ่น

e) ระนาบทั้งสองเลื่อนผ่านกันเป็นระยะ r_o เมื่อหยุดแรงสภาพเช่นนี้ก็ยังคงอยู่ ถ้ายังคงให้แรงต่อไปอีก ระนาบทั้งสองจะเลื่อนผ่านกันต่อไป (30)

ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) (30, 39, 43)

ความเค้นสูงสุดในการทำให้วัสดุแตก มักเรียกชื่อตามชนิดของความเค้นที่กระทำต่อวัตถุ ได้แก่ ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความเค้นแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ความเค้นแรงเฉือนสูงสุด (Ultimate Shear Strength)

การวัดความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) ไม่ได้วัดที่แรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างอะตอม แต่วัดจากแรงรวมซึ่งเกิดขึ้นทั้งชิ้นวัสดุ และไม่จำเป็นต้องเท่ากับความเค้นที่ทำให้วัสดุแตกหัก (Breaking Strength) จากรูปที่ 38-d เส้นทึบจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดเมื่อเริ่มแรก ความเค้นสูงสุดที่ได้จากกราฟคือความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ซึ่งนิยมใช้เส้นนี้ในทางปฏิบัติมากกว่าเส้นประ ซึ่งคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดในขณะนั้นของลวด

เป็นที่ทราบกันว่าพื้นที่หน้าตัดของลวดจะเล็กลงเมื่อลวดถูกยืด ดังนั้นถ้าคำนวณความเค้นที่จุดซึ่งอยู่หลังความเค้นแรงดึงสูงสุด จะได้ค่าของความเครียดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 38-d เนื่องจากลวดจะยืดตัวในอัตราสูงก่อนจะขาดจากกัน แต่จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดเดิม ค่าของความเค้นจะลดลง ทำให้ความเค้นตรงจุดที่วัสดุแตก (Breaking Strength) มีค่าน้อยกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัตถุ

กราฟเส้นทึบในรูปที่ 38-d ซึ่งนิยมใช้กันในทางปฏิบัตินั้น ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดจะเป็นตัวที่แสดงความเค้นสูงสุดที่ลวดสามารถทนต่อแรงดึง โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของลวด ดังนั้นความเค้นแรงดึงสูงสุดคือความเค้นสูงสุดที่วัตถุสามารถทนได้ก่อนที่จะขาด

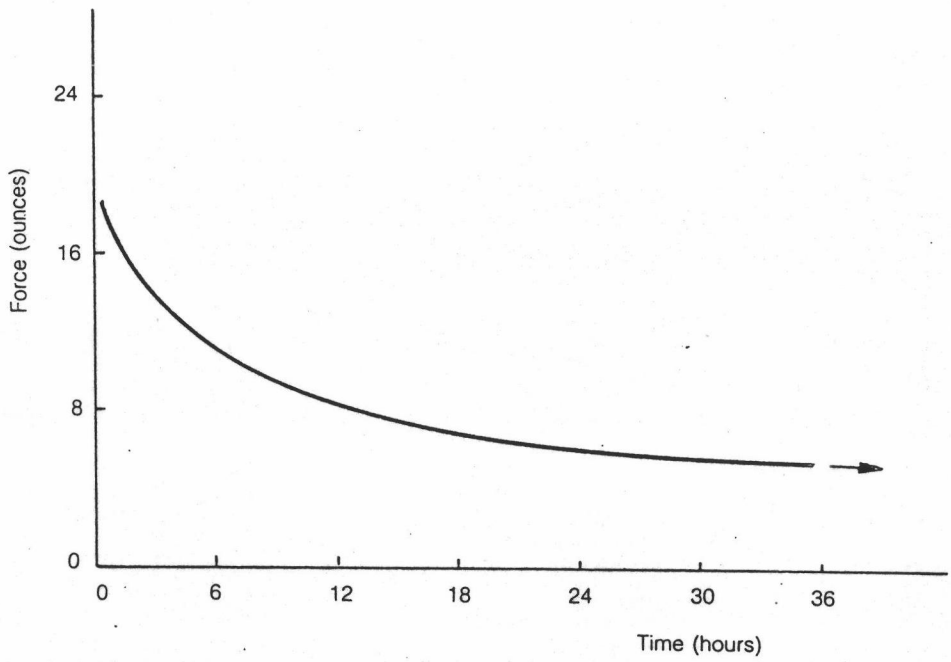
ความล้า (Fatique) (30, 36)

ถ้าวัสดุถูกแรงกระทำซ้ำกันหลายครั้ง โดยที่ค่าความเค้นต่ำกว่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) จะทำให้วัตถุแตกได้ เรียกว่า ความล้า (Fatique)

การทดสอบความล้ากระทำได้โดยให้ความเค้นที่ทราบขนาดแก่วัตถุนานหลาย ๆ ครั้ง และนับจำนวนครั้งที่ความเค้นกระทำต่อวัตถุจนทำให้วัตถุแตกหรือขาด จากการเขียนกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนครั้งที่ทำให้วัตถุแตก จะสามารถคำนวณขีดจำกัดของความทนทานของวัตถุ (Endurance Limit) ได้

ตัวอย่างของความล้าที่เกิดขึ้นทางทันตกรรมจัดฟัน ได้แก่ แรงบดเคี้ยวที่กระทำต่อเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟัน การปรับเครื่องมือ การทดสอบลวด โดยการหักลวดเป็นมุมฉากกลับไปมาจนลวดขาด



รูปที่ 41 กราฟแสดงการทดสอบความล้าในโลหะเมื่อได้รับแรงซ้ำ ๆ กัน ในลักษณะดัดโค้ง (36)

<u>ความเหนียว</u> (Toughness) (30, 32)

เป็นคุณสมบัติในการทนต่อการแตกร้าว นิยามได้เป็นพลังงานที่ใช้เพื่อทำให้วัตถุแตก สามารถหาได้จากพื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากจุดที่ความเค้นเป็นศูนย์ จนถึงจุดที่วัสดุแตกหัก ดังรูปที่ 39

แม้ว่าค่าของพลังงานแตกหักจะวัดได้ยาก แต่จะเห็นได้ว่าค่านี้มีความสัมพันธ์กับเขตปฏิภาค (Proportional Limit) ความอ่อนตัว (Ductility) และความสามารถในการตีแผ่ (Malleability) ของวัสดุมากกว่า ความสามารถในการบิดตัวสูงสุด (Maximum Flexibility) หรือโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

ความเปราะ (Brittleness) (30)

เป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับความเหนียว (Toughness) ตัวอย่างของวัสดุที่มีความเปราะได้แก่ แก้ว ซึ่งไม่สามารถนำมางอได้ เนื่องจากจะแตกเสียก่อน นั่นคือวัสดุที่เปราะ จะแตกตรงจุดซึ่งใกล้กับเขตปฏิภาค

แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุที่เปราะไม่จำเป็นต้องมีความเค้นต่ำ เช่นแก้ว มีค่าความเค้นแรงเฉือนน้อย แต่ความเค้นแรงดึงมีค่าสูง

ความอ่อนตัว (Ductility) และความสามารถในการตีแผ่ (Malleability) (30, 32)

เมื่อวัตถุได้รับความเค้นสูงกว่าเขตปฏิภาค จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรด้วยแรงดึง และวัตถุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรโดยไม่แตก อาจจะกล่าวได้ว่าวัตถุมีความอ่อนตัว (Ductile) ความอ่อนตัวคือ คุณสมบัติของวัตถุในการทนต่อการยืดตัวโดยไม่แตกหัก แรงที่นำมาทดสอบความอ่อนตัวคือ แรงดึง ความอ่อนตัวจะขึ้นกับความสามารถในการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plasticity) และความเค้นแรงดึงของวัตถุ

ความสามารถในการตีแผ่เป็นคุณสมบัติของวัตถุที่จะทนต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรโดยแรงที่มากระทำเป็นแรงอัด เช่น การทุบหรือรีดให้เป็นแผ่น คุณสมบัตินี้จะขึ้นกับความสามารถในการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plasticity) ของวัตถุ แต่ไม่ขึ้นกับความเค้นแรงดึงของวัตถุ

โดยทั่วไปความอ่อนตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการตีแผ่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การวัดความอ่อนตัว กระทำได้โดย (30, 31)

1. วัดการยืดตัว (Elongation) ที่จุดซึ่งวัตถุขาดจากกัน คล้ายกับการวัดความเครียด โดยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (Percent Elongation)

$$\text{ความอ่อนตัว} = (L_f - L_o) / L_o \text{ หรือ } \Delta L/L_o$$

เมื่อ L_o และ L_f เป็นความยาวของวัตถุก่อนทำการทดลอง และขณะวัตถุขาดจากกัน ตามลำดับ

การวัดแบบนี้จะต้องกำหนดจุดบนวัตถุที่ทำการทดสอบ 2 จุด ระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองมีผลทำให้การวัดเปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปการทดสอบวัสดุทางทันตกรรมใช้ระยะเท่ากับ 51 มิลลิเมตร หรือ 2 นิ้ว (34)

2. วัดจากพื้นที่ซึ่งลดลงตรงจุดที่วัตถุขาดจากกัน วัตถุที่มีความอ่อนตัวจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงได้มากก่อนที่วัตถุจะขาด ข้อดีของการวัดแบบนี้คือไม่ต้องทำเครื่องหมายบนวัตถุเช่นเดียวกับวิธีแรก และสามารถบอกถึงความเครียดตรงจุดขาดได้อย่างแน่นอน

3. การทดสอบโดยการงอลวด (Cold Bend Test) กระทำโดยการจับวัตถุไว้ตรงจุดหนึ่ง และหมุนรอบแกนที่มีรัศมีคงที่ นับจำนวนครั้งที่วัตถุสามารถงอได้โดยไม่หัก วัตถุที่มีความอ่อนตัวสามารถงอได้หลายครั้ง จำนวนครั้งเป็นดัชนีที่บอกถึงความอ่อนตัว

<u>การขึ้นรูปด้วยวิธีเชิงกล</u> (Mechanical Working) (29)

โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะ แต่คุณสมบัตินั้นอาจเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีเชิงกล ซึ่งสามารถให้คำนิยามได้ว่า เป็นการกระทำให้โลหะมีรูปร่างตามต้องการ โดย

1. การขึ้นรูปร้อน (Hot Working) ทำโดยการเผาโลหะให้ถึงอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาค (Transformation Temperature) แล้วใช้ฆ้อนทุบหรือใส่เครื่องรีด ทำให้โลหะนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร อาจจะเป็นแผ่นบาง ๆ หรือยืดเป็นเส้น

เกรนของโลหะที่ถูกทุบจะมีรูปร่างแบนออกทางด้านข้างมากกว่าเดิม ส่วนเกรนของโลหะที่ถูกรีดจะมีรูปร่างรีกว่าเดิม

2. การขึ้นรูปเย็น (Cold Working) คือการรีดหรือดัดโลหะจนเกิดความเครียดที่อุณหภูมิห้อง เกรนถูกยืดให้ยาวรี และเกยกับเกรนข้างเคียง โลหะจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลง แต่ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความแข็งที่ได้เรียกว่า ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Cold work Hardening หรือ Strain Hardening) การขึ้นรูปเย็นสามารถเพิ่มความแข็งให้กับโลหะแต่จะลดความเหนียวและความอ่อนตัว

ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Strain Hardening) (29, 30, 31)

เป็นผลที่เกิดจากการเลื่อน (Slip) ในโลหะที่ประกอบด้วยเกรนเป็นจำนวนมาก (Polycrystalline) โดยจะเกิดการคลาดที่ (Dislocation) ดังรูปที่ 40 ที่ขอบเกรนการเลื่อนจะถูกขัดขวาง โดยชนกับเกรนที่ชิดกัน ทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณนี้ โลหะจะแข็งขึ้น ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นเกิดจากการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 8 เป็นภาพถ่ายของโครงสร้างเกรนจากกล้องจุลทรรศน์ แสดงถึงเกรนที่ถูกรีดตั้งฉากกับผิวของวัตถุ ยิ่งวัตถุบางมากขึ้นเท่าใด เกรนจะยิ่งบางและแบนขึ้นเท่านั้น ถ้ามองภาพซึ่งทำมุมฉากกับพื้นผิวนี้ (ขนานกับทิศทางการรีด) จะเห็นว่าพื้นที่เกรนกว้างขึ้น

สรุปว่า ความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Strain Hardening) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร มีผลให้ความเค้นแรงดึงสูงสุด จุดคราก เขตปฏิภาค สูงขึ้น โดยจะเพิ่มความเค้นที่จุดครากมากกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ส่วนความอ่อนตัวและความต้านทานต่อการสึกกร่อนจะลดลง นอกจากนี้ Marcotte (10) และ Phillips (30) พบว่า โมดูลัสของการยืดหยุ่นไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ตรงกันข้ามกับการศึกษาของ Goldberg, Vanderby และ Burstone (53) พบว่า การขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่มากจะสามารถลดค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นได้

ผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปเย็นคือ ความแข็งจะเพิ่มขึ้นในทิศทางหนึ่งมากกว่าอีกทิศทางหนึ่ง

การดัดลวดให้เป็นรูปร่างตามต้องการ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร เป็นการขึ้นรูปเย็นแบบหนึ่งเช่นเดียวกัน

ค่าความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น สามารถคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจากกรรมวิธีการผลิต

$$CW = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} \times 100$$

A_o และ A_f เป็นพื้นที่เริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ

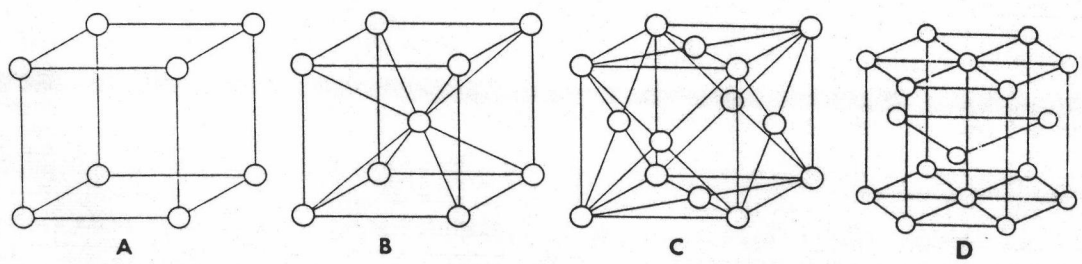
ภาคผนวก ค

โครงสร้างผลึกของโลหะ (Metal Crystallography)

ในการศึกษาธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบของโลหะผสม ควรพิจารณาถึงโครงสร้างของโลหะผสมด้วย หน่วยย่อยที่สุดที่โลหะรวมกันเรียกว่า เกรน (Grain) (29, 30, 31) ในโลหะผสมทั่วไปประกอบด้วยเกรนเป็นจำนวนมาก (Polycrystalline) แต่ละเกรนประกอบด้วย อะตอมของโลหะเรียงกันในลักษณะของโครงสร้างผลึก (Solid Crystal) ซึ่งส่วนประกอบของอะตอมโลหะในแต่ละเกรนอาจแตกต่างกันไป ทิศทางการเรียงตัวของอะตอมในแต่ละเกรนจะแตกต่างกัน

รูปแบบของโครงสร้างผลึกมีทั้งหมด 14 ระบบ แต่โลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบของลวดทางทันตกรรมจัดฟันจะมี 3 แบบคือ

1. แบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลาง (Body-centered Cubic)
2. แบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง (Face-centered Cubic)
3. แบบหกเหลี่ยมชนิดอัดแน่น (Hexagonal Close-packed)



รูปที่ 42 A ผลึกแบบลูกบาศก์

B ผลึกแบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลาง (Body-centered Cubic)

C ผลึกแบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง (Face-centered Cubic)

D ผลึกแบบหกเหลี่ยมชนิดอัดแน่น (Hexagonal Close-packed).

โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบซึ่งมีอะตอมอยู่ตรงกลางจะมีความแข็ง (Hardness) และความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) สูง แต่จะเปราะ ดีเป็นแผ่นหรือรีดมากนักไม่ได้ ส่วนโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง จะค่อนข้างอ่อนและเหนียวกว่า ดีเป็นแผ่นหรือรีดได้ง่ายกว่า ส่วนโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นมาก เมื่อถูกขึ้นรูปเย็น (Cold work) ที่อุณหภูมิปกติ (44)

โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลาง ได้แก่ โครเมียม เหล็ก โมลิบดินัม เป็นต้น โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ซึ่งมีอะตอมอยู่ที่ผนัง ได้แก่ อะลูมิเนียม นิเกิล ทองแดง เป็นต้น โลหะที่มีโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมชนิดอัดแน่น ได้แก่ เบริลเลียม โคบอลต์ แมงกานีส ติตาเนียม เป็นต้น

โลหะบางชนิดสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกได้ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Allotropic Properties) ที่อุณหภูมิปกติจะมีโครงสร้างผลึกดังกล่าวข้างต้น โลหะที่มีคุณสมบัตินี้ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ ติตาเนียม โครเมียม แมงกานีส ทังสเตน เป็นต้น เหล็กที่อุณหภูมิห้อง จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลาง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกิน 910 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ที่ผนัง ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกจนเกิน 1400 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนกลับมาเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลางเช่นเดิม โคบอลต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 417 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมชนิดอัดแน่น (47) ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ที่ผนัง

ขนาดของเกรนจะขึ้นอยู่กับจำนวนและตำแหน่งของจุดเริ่มการแข็งตัว (nuclei) (29, 30, 31, 39) ถ้าหากการแข็งตัวเกิดจากจุดเริ่มต้นออกไปทุกทิศทางในเวลาพร้อมกัน จะได้รูปร่างของเกรนเป็นทรงกลม ถ้าอัตราของการตกผลึกช้าคือ โลหะผสมเย็นลงอย่างช้า ๆ จะได้เกรนขนาดใหญ่ แต่ถ้าโลหะผสมเย็นลงด้วยอัตราที่เร็ว เกรนจะมีขนาดเล็ก

ตรงบริเวณที่ขอบเกรนมาบรรจบกัน จะมีการเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่าง ๆ กัน โครงสร้างบริเวณขอบเกรนจะแตกต่างจากภายในเกรน โดยโครงสร้างผลึกบริเวณนี้จะเรียงตัว

ไม่เป็นระเบียบ พลังงานจึงสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ภายในเกรน มักจะพบสิ่งเจือปนในบริเวณนี้ ขอบของเกรนจะถูกทำลายได้ง่าย โดยใช้สารเคมี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 43 แสดงภาพเกรนของทองแดงขยาย 100 เท่า (48)

เมื่อวัสดุได้รับแรงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร อะตอมจะเลื่อนผ่านบริเวณขอบเกรนได้ยาก แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบเกรนแข็งแรงกว่าเนื้อวัสดุภายในของเกรน ในวัสดุที่มีขนาดเกรนเล็ก จะมีขอบเกรนเป็นจำนวนมาก ทำให้วัสดุแข็งแรง นอกจากนี้ถ้าอะตอมของโลหะที่ผสมลงไปมีขนาดแตกต่างจากโลหะหลักมาก อะตอมจะเลื่อนได้ยากขึ้นเช่นเดียวกัน ค่าของความแข็งแรง (Strength) เขตปฏิภาคจะเพิ่มขึ้น แต่ความอ่อนตัวจะลดลง

ภาคผนวก ง

กรรมวิธีการผลิตลวดทางทันตกรรมจัดฟัน
(Orthodontic Wire Manufacturing)

ปัจจัยสำคัญอีกอันหนึ่งซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติในช่วงยืดหยุ่นของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน ได้แก่ กรรมวิธีผลิตลวด ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ (38)

1. การหลอม (Melting) เป็นขั้นตอนการเลือกโลหะ และนำมาหลอมรวมกัน ส่วนประกอบของโลหะต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติส่วนหนึ่งของลวด เป็นส่วนที่แปรผันได้มาก

2. แท่งโลหะ (Ingot) ได้จากการเทโลหะที่หลอมเหลวลงไปในแบบหล่อ ซึ่งทำด้วยโลหะทนความร้อน แท่งโลหะจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อาจจะมีโพรง ซึ่งเกิดจากการหดตัวในขณะเปลี่ยนสภาวะ และมีฟองอากาศอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก

จากการขยายภาพโครงสร้างของแท่งโลหะ จะเห็นผลึกของโลหะที่เป็นส่วนประกอบผลึกเหล่านี้จะรวมเป็นเกรน โครงสร้างของเกรนเหล่านี้เป็นตัวที่ควบคุมคุณสมบัติเชิงกล ของโลหะผสมหลายประการ ถ้าขนาดของเกรนเล็ก ภายหลังการขึ้นรูปเย็นจนเป็นเส้นลวด จะมีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่า (43)

การสร้างตัวของเกรนจะเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับโลหะแต่ละชนิด แต่ไม่ใช่สภาพที่สมบูรณ์ เนื่องจากสภาพขณะที่แท่งโลหะแข็งตัว ขณะที่แท่งโลหะเย็นตัวและแข็งตัว จะเกิดเกรนหลายชนิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ผลึกจะซ้อนกันมากมาย จะได้แท่งโลหะซึ่งประกอบด้วยเกรนรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) มีโลหะต่าง ๆ รวมกันอยู่ ขนาดและการกระจายของเกรนขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว และขนาดของแท่งโลหะ

ขณะที่เทโลหะซึ่งหลอมเหลวลงในแบบพิมพ์ และขณะที่โลหะเย็นตัว จะทำให้เกิดฟอง ฟองอากาศเกิดได้ 2 สาเหตุคือ ก๊าซซึ่งปะปนอยู่ในเนื้อโลหะ หรือก๊าซที่เกิดจากปฏิกริยาภายในโลหะที่กำลังหลอม ทำให้เกิดฟองติดอยู่ในเนื้อโลหะ อีกกรณีหนึ่ง ขณะที่โลหะแข็งตัว จะหดตัว ส่วนของเนื้อโลหะทางด้านในจะแข็งช้ากว่าทางด้านนอก จึงหดตัวภายหลัง ดังนั้นจึงไม่สามารถปรับปริมาตรให้สมดุลกับการหดตัวได้ เกิดช่องว่างที่เป็นสูญญากาศอยู่ภายในนำแท่งโลหะดังกล่าวมาตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ก่อนที่จะนำไปผ่านกรรมวิธีผลิตต่อไป

โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) เป็นพื้นฐานของคุณสมบัติทางกายภาพของลวด กรรมวิธีผลิตในขั้นตอนต่อไปจะต้องพิจารณาถึงโครงสร้างเกรนโลหะในขั้นตอนนี้ด้วย

3. การรีด (Rolling) เป็นขั้นตอนการรีดแท่งโลหะให้เป็นแท่งยาว การรีดจะกระทำ 2 ขั้น คือ รีดร้อนก่อน เพื่อลดขนาดของแท่งโลหะให้เล็กลง การรีดร้อนก็เพื่อลดพลังงานที่จะใช้ให้น้อยลง เมื่อแท่งโลหะมีขนาดเล็กลงแล้ว จึงนำไปทำการรีดเย็นอีกขั้นหนึ่ง และผ่านการอบอ่อนก่อนนำไปดึงขึ้นรูป การรีดกระทำโดยเครื่องรีดหลายชุด เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งโลหะจะลดขนาดลงไปเรื่อย ๆ ตำแหน่งของเกรนเมื่อสัมพันธ์กับแท่งโลหะยังคงเดิม เช่น เกรนที่อยู่ทางด้านนอกของแท่งโลหะ ก็จะยังคงตำแหน่งอยู่ทางด้านนอกเช่นเดิม แม้ว่าจะถูกรีดลงจนมีขนาดเล็กเท่าไรก็ตาม ลวดแต่ละเส้นที่ผลิตพร้อมกันจะเป็นแต่ละส่วนของแท่งโลหะ

เกรนแต่ละอันจะรักษาตำแหน่งเดิมไว้ แม้จะผ่านการรีดอย่างไรก็ตาม แต่ละเกรนจะยืดออกด้วยอัตราส่วนเช่นเดียวกับแท่งโลหะ โครงสร้างของเกรนจะเปลี่ยนแปลง ความแข็งแรงของโลหะจะเพิ่มขึ้น เดิมผลึกจะรวมกันโดยมีช่องว่างและฟองอากาศแทรกอยู่ จากการรีดเกรนจะยาวออก และประสานกับเกรนข้างเคียง ผลที่เกิดคือ ความแข็ง (Hardness) และความเปราะ (Brittleness) จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกรนถูกทำให้ชิดกันมากขึ้น แทนที่ช่องว่างต่าง ๆ ที่เคยมีอยู่เดิม

การรีดในลักษณะนี้จะเพิ่มความแข็งจากการขึ้นรูปเย็นแก่ลวด เมื่อการรีดดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงขีดจำกัดของโลหะ จะเกิดรอยแตกที่ผิว ก่อนจะถึงสภาพเช่นนี้ต้องหยุดรีด และนำลวดเข้าอบอ่อน (Anneal) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเหมาะสมกับโลหะผสมแต่ละชนิด ผลที่ได้จากการอบอ่อนคือ อะตอมของโลหะปรับตัวเข้าสู่สภาพสมดุลดังเดิม โครงสร้างผลึกที่ถูกอัดจนแน่น และความเค้นภายในซึ่งเกิดจากการรีด จะถูกทำลายให้หมดไป เมื่อโลหะเย็นลง จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแท่งโลหะเดิม แต่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ขนาดของเกรนที่ได้ขึ้นอยู่เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน รวมทั้งอัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling)

4. การดึงขึ้นรูป (Drawing) หลังจากที่แท่งโลหะถูกรีดให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง จะถูกนำมาดึงขึ้นรูปให้ได้ขนาดที่ต้องการ ลวดจะถูกดึงผ่านช่องขนาดเล็กในดาย (Die) ช่องนี้จะมีขนาดเล็กกว่าลวดซึ่งนำไปดึงขึ้นรูปเล็กน้อย ผนังของดายจะบังคับให้ลวดมีขนาด

เท่าที่ต้องการ ขณะที่ลวดเคลื่อนตัวผ่านดาย จะได้รับแรงเท่า ๆ กันทุกด้าน ต่างจากการรีด ซึ่งจะเกิดแรงกระทำต่อลวดเพียงสองด้านพร้อมกัน

โครงสร้างเกรนที่ได้หลังจากการดึงขึ้นรูปจะเหมือนกับเกรนที่ได้จากการรีด ลวดจะถูกดึงขึ้นรูปสลับกับการอบอ่อน เพื่อลดความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Coldwork Hardening) จนกระทั่งได้ขนาดลวดที่ต้องการ การอบอ่อนดังกล่าวมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของลวด และป้องกันไม่ให้ลวดแตกหรือขาดขณะทำการดึงขึ้นรูป

ความแข็งและสปริงของลวดทางทันตกรรมขึ้นกับปริมาณการดึงขึ้นรูปเย็น ขั้นสุดท้าย ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกรรมวิธีการผลิต จะต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ เพื่อให้ได้ลวดซึ่งมีขนาดและคุณสมบัติตามต้องการ ถ้าลวดถูกขึ้นรูปจนเกือบต้องอบอ่อนแล้ว จะมีความแข็งจากการขึ้นรูปและสปริงสูงสุด ถ้าลวดถูกดึงขึ้นรูปเกินจุดนี้ไปแล้ว ลวดจะเปราะและขาดง่าย ถ้าลวดถูกดึงขึ้นรูปน้อยเกินไป ลวดจะนิ่ม มีระยะทำงานและความแข็งแรงต่ำ ในบางกรณีลวดอาจถูกดึงขึ้นรูปจนมีขนาดเล็ก โดยไม่ผ่านการอบอ่อน ทำให้ลวดขนาดเล็กแข็งกว่าลวดขนาดใหญ่

การผลิตลวดเหลี่ยมทำได้โดยการดึงขึ้นรูปวัสดุผ่านดายรูปสี่เหลี่ยม หรือการรีดลวดกลมให้เป็นเหลี่ยม การผลิตโดยวิธีแรกจะทำให้มุมของลวดคมกว่า ซึ่งมีข้อได้เปรียบในการทำทอร์ค (Torque)

ลวดทางทันตกรรมจัดฟันซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นจากกรรมวิธีการผลิตดังกล่าวข้างต้น จะมีค่าความเค้นที่ขีดยืดหยุ่น (Elastic Strength) ระยะการทำงาน (Range) ริซิเลียนซ์ (Resilience) และความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) สูงขึ้น แต่ความอ่อนตัว (Ductility) และโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) จะลดลง (16,36, 46)

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

RAW DATA

1. PERMACHROME

OVEN HEAT-TREATED		ELECTRICAL HEAT-TREATED		FLAME HEAT-TREATED		CONTROL	
VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY
250	1	175	1	220	1	45	2
265	2	180	3	230	2	50	1
270	1	185	2	235	1	55	1
275	5	190	1	240	1	60	2
285	4	195	2	245	1	65	2
295	5	200	7	250	2	70	7
305	2	205	3	255	4	75	4
315	1	210	4	260	3	80	5
320	1	215	1	265	2	85	1
335	2	220	3	270	4	90	4
345	3	225	2	275	1	100	1
360	1	230	1	280	2		
365	1			285	1		
375	1			290	1		
				295	1		
				305	1		
				315	1		
				320	1		

2. NUBRYTE

OVEN		ELECTRICAL		FLAME			
HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		CONTROL	
VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY
160	1	135	3	120	1	35	1
170	4	140	7	125	2	40	2
180	3	145	2	130	1	45	3
185	1	150	1	135	2	50	14
190	2	155	2	145	2	55	5
195	2	160	2	150	1	60	3
200	1	165	2	155	2	75	1
205	2	170	2	160	2	80	1
210	2	185	5	170	2		
215	2	190	1	175	2		
220	2	195	1	180	2		
225	1	200	1	185	4		
235	2	215	1	190	1		
240	1			195	2		
255	4			200	1		
				210	1		
				215	1		
				230	1		

3. BLUE ELGILOY

OVEN		ELECTRICAL		FLAME			
HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		CONTROL	
VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY
240	2	170	2	130	2	40	3
245	1	175	1	135	1	45	5
255	3	185	3	160	1	50	9
260	2	190	1	165	2	55	12
265	4	195	3	170	1	60	1
275	7	200	3	175	1		
285	2	205	4	180	3		
290	2	210	2	185	3		
295	3	215	1	190	1		
300	1	220	2	195	2		
305	2	230	3	210	2		
315	1	235	1	215	1		
		245	1	220	3		
		250	3	225	3		
				235	1		
				240	1		
				250	2		

4. REMALOY® BLUE

OVEN		ELECTRICAL		FLAME			
HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		HEAT-TREATED		CONTROL	
VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY	VALUE	FREQUENCY
650	1	450	2	260	3	50	1
660	2	460	1	265	1	55	5
665	2	475	1	270	3	60	9
670	2	480	3	280	2	65	9
680	1	490	1	290	2	70	4
685	2	495	1	300	2	80	2
695	2	505	4	305	1		
700	1	510	1	310	2		
705	1	515	1	315	1		
710	1	520	1	320	1		
715	1	525	2	330	1		
720	1	530	2	340	1		
745	1	535	1	345	1		
755	1	540	1	350	3		
765	1	550	1	355	1		
770	2	560	1	360	1		
775	1	590	2	370	2		
780	1	600	1	380	1		
785	1	610	1	390	1		
790	1	615	1				
800	2	620	1				
815	1						
825	1						

STATISTICS

1. PERMACHROME, OVEN HEAT-TREATED

MEAN	303.000	STD ERR	6.101	MEDIAN	295.000
MODE	275.000	STD DEV	33.415	VARIANCE	1116.552
KURTOSIS	-.598	S E KURT	.833	SKEWNESS	.655
S E SKEW	.427	RANGE	125.000	MINIMUM	250.000
MAXIMUM	375.000	SUM	9090.000		

2. PERMACHROME, ELECTRICAL HEAT-TREATED

MEAN	202.500	STD ERR	2.688	MEDIAN	200.000
MODE	200.000	STD DEV	14.724	VARIANCE	216.810
KURTOSIS	-.664	S E KURT	.833	SKEWNESS	-.061
S E SKEW	.427	RANGE	55.000	MINIMUM	175.000
MAXIMUM	230.000	SUM	6075.000		

3. PERMACHROME, FLAME HEAT-TREATED

MEAN	265.167	STD ERR	4.424	MEDIAN	262.500
MODE	255.000	STD DEV	24.229	VARIANCE	587.040
KURTOSIS	.100	S E KURT	.833	SKEWNESS	.434
S E SKEW	.427	RANGE	100.000	MINIMUM	220.000
MAXIMUM	320.000	SUM	7955.000		

4. PERMACHROME, CONTROL GROUP

MEAN	72.667	STD ERR	2.453	MEDIAN	72.500
MODE	70.000	STD DEV	13.438	VARIANCE	180.575
KURTOSIS	-.021	S E KURT	.833	SKEWNESS	-.296
S E SKEW	.427	RANGE	55.000	MINIMUM	45.000
MAXIMUM	100.000	SUM	2180.000		

5. NUBRYTE, OVEN HEAT-TREATED

MEAN	206.333	STD ERR	5.246	MEDIAN	205.000
MODE	170.000	STD DEV	28.736	VARIANCE	825.747
KURTOSIS	-.931	S E KURT	.833	SKEWNESS	.298
S E SKEW	.427	RANGE	95.000	MINIMUM	160.000
MAXIMUM	255.000	SUM	6190.000		

6. NUBRYTE, ELECTRICAL HEAT-TREATED

MEAN	161.667	STD ERR	4.196	MEDIAN	157.500
MODE	140.000	STD DEV	22.982	VARIANCE	528.161
KURTOSIS	-.774	S E KURT	.833	SKEWNESS	.588
S E SKEW	.427	RANGE	80.000	MINIMUM	135.000
MAXIMUM	215.000	SUM	4850.000		

7. NUBRYTE, FLAME HEAT-TREATED

MEAN	168.833	STD ERR	5.229	MEDIAN	172.500
MODE	185.000	STD DEV	28.638	VARIANCE	820.144
KURTOSIS	-.649	S E KURT	.833	SKEWNESS	.049
S E SKEW	.427	RANGE	110.000	MINIMUM	120.000
MAXIMUM	230.000	SUM	5065.000		

8. NUBRYTE, CONTROL GROUP

MEAN	52.000	STD ERR	1.637	MEDIAN	50.000
MODE	50.000	STD DEV	8.964	VARIANCE	80.345
KURTOSIS	3.494	S E KURT	.833	SKEWNESS	1.348
S E SKEW	.427	RANGE	45.000	MINIMUM	35.000
MAXIMUM	80.000	SUM	1560.000		

9. BLUE ELGILOY, OVEN HEAT-TREATED

MEAN	275.167	STD ERR	3.600	MEDIAN	275.000
MODE	275.000	STD DEV	19.717	VARIANCE	388.764
KURTOSIS	-.645	S E KURT	.833	SKEWNESS	.064
S E SKEW	.427	RANGE	75.000	MINIMUM	240.000
MAXIMUM	315.000	SUM	8255.000		

10. BLUE ELGILOY, ELECTRICAL HEAT-TREATED

MEAN	208.667	STD ERR	4.261	MEDIAN	205.000
MODE	205.000	STD DEV	23.339	VARIANCE	544.713
KURTOSIS	-.682	S E KURT	.833	SKEWNESS	.292
S E SKEW	.427	RANGE	80.000	MINIMUM	170.000
MAXIMUM	250.000	SUM	6260.000		

11. BLUE ELGILOY, FLAME HEAT-TREATED

MEAN	195.000	STD ERR	6.084	MEDIAN	192.500
MODE	180.000	STD DEV	33.322	VARIANCE	1110.345
KURTOSIS	-.539	S E KURT	.833	SKEWNESS	-.268
S E SKEW	.427	RANGE	120.000	MINIMUM	130.000
MAXIMUM	250.000	SUM	5850.000		

12. BLUE ELGILOY, CONTROL GROUP

MEAN	50.500	STD ERR	.969	MEDIAN	50.000
MODE	55.000	STD DEV	5.309	VARIANCE	28.190
KURTOSIS	-.449	S E KURT	.833	SKEWNESS	-.581
S E SKEW	.427	RANGE	20.000	MINIMUM	40.000
MAXIMUM	60.000	SUM	1515.000		

13. REMALOY® BLUE OVEN HEAT-TREATED

MEAN	726.833	STD ERR	9.900	MEDIAN	712.500
MODE	660.000	STD DEV	54.226	VARIANCE	2940.489
KURTOSIS	-1.376	S E KURT	.833	SKEWNESS	.262
S E SKEW	.427	RANGE	175.000	MINIMUM	650.000
MAXIMUM	825.000	SUM	21805.000		

14. REMALOY® BLUE, ELECTRICAL HEAT-TREATED

MEAN	524.833	STD ERR	8.891	MEDIAN	517.500
MODE	505.000	STD DEV	48.698	VARIANCE	2371.523
KURTOSIS	-.529	S E KURT	.833	SKEWNESS	.527
S E SKEW	.427	RANGE	170.000	MINIMUM	450.000
MAXIMUM	620.000	SUM	15745.000		

15. REMALOY® BLUE, FLAME HEAT-TREATED

MEAN	314.833	STD ERR	7.344	MEDIAN	310.000
MODE	260.000	STD DEV	40.225	VARIANCE	1618.075
KURTOSIS	-1.226	S E KURT	.833	SKEWNESS	.204
S E SKEW	.427	RANGE	130.000	MINIMUM	260.000
MAXIMUM	390.000	SUM	9445.000		

16. REMALOY® BLUE, CONTROL GROUP

MEAN	63.000	STD ERR	1.259	MEDIAN	62.500
MODE	60.000	STD DEV	6.898	VARIANCE	47.586
KURTOSIS	.907	S E KURT	.833	SKEWNESS	.706
S E SKEW	.427	RANGE	30.000	MINIMUM	50.000
MAXIMUM	80.000	SUM	1890.000		

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการวิจัยนี้ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงทดลองตัดค่าสังเกตที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดออกไปด้านละ 10 เปอร์เซ็นต์ ของในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation) ของตัวอย่างที่เหลือ แสดงในตารางที่ 23-26

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าสถิติที่คำนวณได้ก่อนและหลังการตัดตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากการกระจายของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) แต่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมีค่าลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาใช้ตัวอย่างทั้งหมดในการคำนวณค่าสถิติ เพื่อนำมาสรุปผลการวิจัย เนื่องจากจะได้จำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มมากกว่า

TYPE OF HEAT TREATMENT	$\bar{X}$	S.D.	C.V.
1. OVEN HEAT-TREATED	300.417	24.887	8.284
2. ELECTRICAL HEAT-TREATED	202.500	10.935	5.400
3. FLAME HEAT-TREATED	263.958	15.321	5.804
4. CONTROL	73.333	8.928	12.175

ตารางที่ 23 แสดงถึงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) ของขนาดแรงน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ ในลวดเพอร์มาโครม (Permachrome, UNITEX CORPORATION) เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดออกไปด้านละ 10 เปอร์เซ็นต์

TYPE OF HEAT TREATMENT	$\bar{X}$	S.D.	C.V.
1. OVEN HEAT-TREATED	205.208	22.864	11.142
2. ELECTRICAL HEAT-TREATED	159.792	18.266	11.431
3. FLAME HEAT-TREATED	168.333	20.834	12.377
4. CONTROL	51.250	3.970	7.746

ตารางที่ 24 แสดงถึงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) ของขนาดแรงน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน เปลี่ยนรูปอย่างถาวร ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ ในลวดนูไบร์ท (Nubryte, G.A.C. INTERNATIONAL INC.) เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดออกไปด้านละ 10 เปอร์เซ็นต์

TYPE OF HEAT TREATMENT	$\bar{X}$	S.D.	C.V.
1. OVEN HEAT-TREATED	275.208	14.025	5.096
2. ELECTRICAL HEAT-TREATED	208.125	16.863	8.102
3. FLAME HEAT-TREATED	196.458	22.864	11.638
4. CONTROL	51.042	3.895	7.631

ตารางที่ 25 แสดงถึงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) ของขนาดแรงน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน เปลี่ยนรูปอย่างถาวร ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ ในลวดอัลจิลอยสีฟ้า (Blue Elgiloy, ROCKY MOUNTAIN/ ORTHODONTICS) เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดออกไปด้านละ 10 เปอร์เซ็นต์

TYPE OF HEAT TREATMENT	$\bar{X}$	S.D.	C.V.
1. OVEN HEAT-TREATED	724.792	45.480	6.275
2. ELECTRICAL HEAT-TREATED	522.500	35.386	6.772
3. FLAME HEAT-TREATED	313.542	32.919	10.499
4. CONTROL	62.500	4.423	7.077

ตารางที่ 26 แสดงถึงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) ของขนาดแรงน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ภายหลังกรรมวิธีผ่านความร้อนแบบต่าง ๆ ในลวดเรมอลอยสีฟ้า (Remaloy® blue, DENTAURUM) เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดออกไปด้านละ 10 เปอร์เซ็นต์

ONEWAY ANOVA/SCHEFFE .05

1. PERMACHROME

GROUP 1 OVEN HEAT-TREATED

GROUP 2 ELECTRICAL HEAT-TREATED

GROUP 3 FLAME HEAT-TREATED

GROUP 4 CONTROL

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	D.F.	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F RATIO	F PROB.
BETWEEN GROUPS	3	918188.3333	306062.7778	582.7056	.0000
WITHIN GROUPS	116	60928.3333	525.2443		
TOTAL	119	979116.6667			

SCHEEFE PROCEDURE
RANGES FOR THE 0.050 LEVEL -

MEAN	GROUP	GRP 4	GRP 2	GRP 3	GRP 1
72.6667	GRP 4				
202.5000	GRP 2	*			
265.1667	GRP 3	*	*		
303.0000	GRP 1	*	*	*	

SUBSET 1

GROUP GRP 4
MEAN 72.6667

SUBSET 2

GROUP GRP 2
MEAN 202.5000

SUBSET 3

GROUP GRP 3
MEAN 265.1667

SUBSET 4

GROUP GRP 1
MEAN 303.0000

2. NUBRYTE

GROUP 1 OVEN HEAT-TREATED

GROUP 2 ELECTRICAL HEAT-TREATED

GROUP 3 FLAME HEAT-TREATED

GROUP 4 CONTROL

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	D.F.	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F RATIO	F PROB.
BETWEEN GROUPS	3	397112.2917	132370.7639	234.8669	.0000
WITHIN GROUPS	116	65377.5000	563.5991		
TOTAL	119	462489.7917			

SCHEFFE PROCEDURE
RANGES FOR THE 0.050 LEVEL -

MEAN	GROUP	GRP 4	GRP 2	GRP 3	GRP 1
52.0000	GRP 4				
161.6667	GRP 2	*			
168.8333	GRP 3	*			
206.3333	GRP 1	*	*	*	

SUBSET 1

GROUP	GRP 4
MEAN	52.0000

SUBSET 2

GROUP	GRP 2	GRP 3
MEAN	161.6667	168.8333

SUBSET 3

GROUP	GRP 1
MEAN	206.3333

3. BLUE ELGILOY

GROUP 1 OVEN HEAT-TREATED

GROUP 2 ELECTRICAL HEAT-TREATED

GROUP 3 FLAME HEAT-TREATED

GROUP 4 CONTROL

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	D.F.	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F RATIO	F PROB.
BETWEEN GROUPS	3	805558.3333	268519.4444	518.3744	.0000
WITHIN GROUPS	116	60088.3333	518.0029		
TOTAL	119	865646.6667			

SCHEFFE PROCEDURE
RANGES FOR THE 0.050 LEVEL -

MEAN	GROUP	GRP 4	GRP 3	GRP 2	GRP 1
50.5000	GRP 4				
195.0000	GRP 3	*			
208.6667	GRP 2	*			
275.1667	GRP 1	*	*	*	

SUBSET 1

GROUP	GRP 4
MEAN	50.5000

SUBSET 2

GROUP	GRP 3	GRP 2
MEAN	195.0000	208.6667

SUBSET 3

GROUP	GRP 1
MEAN	275.1667

4. REMALOY® BLUE

GROUP 1 OVEN HEAT-TREATED

GROUP 2 ELECTRICAL HEAT-TREATED

GROUP 3 FLAME HEAT-TREATED

GROUP 4 CONTROL

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	D.F.	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F RATIO	F PROB.
BETWEEN GROUPS	3	7290245.625	2430081.875	1393.0616	.0000
WITHIN GROUPS	116	202352.5000	1744.4181		
TOTAL	119	7492598.125			

SCHEFFE PROCEDURE
RANGES FOR THE 0.050 LEVEL -

MEAN	GROUP	GRP 4	GRP 3	GRP 2	GRP 1
63.0000	GRP 4				
314.8333	GRP 3	*			
524.8333	GRP 2	*	*		
726.8333	GRP 1	*	*	*	

SUBSET 1

GROUP GRP 4
MEAN 63.0000

SUBSET 2

GROUP GRP 3
MEAN 314.8333

SUBSET 3

GROUP GRP 2
MEAN 524.8333

SUBSET 4

GROUP GRP 1
MEAN 726.8333

T = TEST

1. OVEN HEAT-TREATED

VARIABLE	NUMBER OF CASES	MEAN	STANDARD DEVIATION	STANDARD ERROR	T-TEST F VALUE	T-TEST 2-TAIL PROB.	POOLED VARIANCE ESTIMATE T VALUE	POOLED VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	POOLED VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE T VALUE	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.
FORCE DEFORMATION FORCE												
GROUP 1	60	254.6667	57.710	7.450	16.06	0.0	-8.00	118	0.000	-8.00	66.32	0.000
GROUP 2	60	501.0000	231.304	29.861								

2. ELECTRICAL HEAT-TREATED

VARIABLE	NUMBER OF CASES	MEAN	STANDARD DEVIATION	STANDARD ERROR	T-TEST F VALUE	T-TEST 2-TAIL PROB.	POOLED VARIANCE ESTIMATE T VALUE	POOLED VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	POOLED VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE T VALUE	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.
FORCE DEFORMATION FORCE												
GROUP 1	60	182.0833	28.108	3.629	33.98	0.0	-3.60	118	0.000	-8.60	52.47	0.000
GROUP 2	60	366.7500	163.851	21.153								

3. FLAME HEAT-TREATED

VARIABLE	NUMBER OF CASES	MEAN	STANDARD DEVIATION	STANDARD ERROR	T-TEST F VALUE	T-TEST 2-TAIL PROB.	POOLED VARIANCE ESTIMATE T VALUE	POOLED VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	POOLED VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE T VALUE	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE DEGREES OF FREEDOM	SEPARATE VARIANCE ESTIMATE 2-TAIL PROB.
FORCE DEFORMATION FORCE												
GROUP 1	60	217.0000	55.236	7.131	1.64	0.061	-3.27	118	0.001	-3.27	111.51	0.001
GROUP 2	60	254.9167	70.654	9.121								

GROUP 1 AUSTENITIC STAINLESS STEEL WIRE

GROUP 2 COBALT-NICKLE-CHROMIUM ALLOY WIRE

ประวัติผู้เขียน

นางสาว กรพินท์ เกษมสันต์ เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2502 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาทันตแพทยศาสตรบัณฑิต จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2525 เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2527