หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความเสียดทาน

เมื่อใดก็ตามที่ผิวหน้าของวัตถุคู่ใดคู่หนึ่งไถลผ่านกัน แต่ละผิวต่างก็จะออกแรงเสียดทานต่อกันในทิศทางขนานกับผิวที่สัมผัสกันนั้น แรงเสียดทานที่กระทำต่อวัตถุนี้ จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับวัตถุหนึ่ง แรงเสียดทานดังกล่าวจะต้านการเคลื่อนที่เสมอ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุเลยก็ตามก็อาจเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุซึ่งสัมผัสกันได้ ถ้ามีความพยายามที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัส (8)

1. ชนิดของความเสียดทาน (9,10)

ความเสียดทานมีหลายประเภท คือ

1.1 ความเสียดทานแบบแห้ง (Dry Friction)

ความเสียดทานแบบแห้ง เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของแข็งซึ่งไม่ได้หล่อลื่นและผิวสัมผัสนั้นไถลหรือพยายามไถลผ่านกัน แรงเสียดทานที่ผิวแรกกระทำต่อผิวที่สองจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศไถลหรือพยายามไถลของผิวที่สอง บางครั้งอาจเรียกความเสียดทานแบบนี้ว่า ความเสียดทานแบบคูลอมบ์ (Coulomb Friction)

1.2 ความเสียดทานของของไหล (Fluid Friction)

แรงเสียดทานในของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) เกิดขึ้นระหว่างชั้นย่อย ๆ ในของไหลที่เคลื่อนที่ โดยเป็นผลรวมจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของของไหลกับพื้นผิวของช่องทางที่มันไหลผ่าน แรงเสียดทานนี้ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความหนืด (Viscosity) ของของไหล

1.3 ความเสียดทานในการกลิ้ง (Rolling Friction)

ความเสียดทานในการกลิ้ง เป็นความต้านทานต่อการกลิ้งของวัตถุที่มีลักษณะกลมเช่น ล้อรถยนต์ ลูกปืนในเครื่องยนต์ เป็นต้น ในปัจจุบันยังไม่พบทฤษฎีในการกลิ้ง

ความเสียดทานในการกลิ้งนี้นับได้ว่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความเสียดทานแบบแห้ง

1.4 ความเสียดทานภายใน (Internal Friction)

ความเสียดทานภายในจะพบในของแข็งทุกชนิดที่ได้รับแรงกลับไปกลับมา (Cyclic load) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะทำให้มีแรงเสียดทานภายในแล้วเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน วัสดุที่ยืดหยุ่นได้ดีก็จะมีการสูญเสียน้อย แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีช่วงยืดหยุ่นจำกัด ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรนี้เองทำให้มีความเสียดทานภายในเกิดขึ้น

2. <u>กฎของความเสียดทาน</u>

กฎของความเสียดทานที่มีอยู่ในปัจจุบัน เป็นเพียงกฎง่าย ๆ ยังขาดความสะดวกในการใช้และให้ความถูกต้องที่ไม่สมบูรณ์นัก ในการพิจารณากฎของความเสียดทานในกรณีวัตถุเป็นของแข็งไถลผ่านกันนี้จะต้องถือว่าผิวนั้นแห้ง (ไม่มีการหล่อลื่น) และไถลผ่านกันโดยไม่มีการกลิ้ง (8) กฎของความเสียดทานมีดังนี้ (8,11,12)

1. แรงเสียดทานจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศที่วัตถุเคลื่อนที่

2. แรงเสียดทานจะมากหรือน้อย ขึ้นกับชนิดของเนื้อวัตถุที่สัมผัสกัน

3. แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับพื้นที่ (ทั้งขนาดและรูปร่าง) ของผิวสัมผัสคู่ใด ๆ ซึ่งกฎข้อนี้คลุมตั้งแต่พื้นที่ผิวสัมผัสขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่

4. ระหว่างผิวสัมผัสคู่หนึ่ง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าคงที่

5. ระหว่างผิวสัมผัสคู่หนึ่ง ขนาดของแรงเสียดทานไม่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แต่เป็นปฏิภาค (Proportion) กับขนาดของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่ผิวสัมผัส

6. ความเสียดทานอันเกิดจากวัตถุที่มีน้ำหนักเท่ากัน จะมีขนาดเท่ากันไม่ว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจะเท่ากันหรือไม่ก็ตาม

7. แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ถ้าน้ำหนักของวัตถุเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

8. ที่ความเร็วต่ำความเสียดทานไม่ขึ้นกับความเร็ว ที่ความเร็วสูงความเสียดทานมีค่าลดลง

9. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่ขึ้นกับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากและไม่ขึ้นกับพื้นที่ของผิวสัมผัส

10. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียด

ทานสถิตเสมอ

ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุ ในขณะที่ต่างฝ่ายต่างอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับอีกฝ่ายหนึ่ง เรียกว่า "ความเสียดทานสถิต" แรงเสียดทานสถิตที่มากที่สุดจะเป็นแรงที่น้อยที่สุดที่พอดีทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้ หลังจากเกิดการเคลื่อนที่แล้วแรงเสียดทานระหว่างวัตถุจะลดลงบ้าง ซึ่งความเสียดทานระหว่างวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แล้ว เรียกว่า "ความเสียดทานจลน์"

อัตราส่วนของขนาดแรงเสียดทานสถิตที่มากที่สุดกับขนาดของแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ใช้สัญญลักษณ์ว่า μ_s และถ้าให้ F_s แทนขนาดแรงเสียดทานสถิต ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$F_s \leq \mu_s N \qquad \text{เมื่อ } N \text{ เป็นแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก}$$

สำหรับอัตราส่วนระหว่างขนาดแรงเสียดทานจลน์กับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ใช้สัญญลักษณ์ว่า μ_k และถ้าให้ F_k แทนขนาดแรงเสียดทานจลน์ก็จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$F_k = \mu_k N$$

เมื่อวัตถุคู่ใดก็ตามสัมผัสกัน ในขณะที่ดูด้วยตาเปล่าอาจเห็นว่าแนบสนิทกันดี แต่เมื่อมองขยายไปแล้วจะพบว่า พื้นที่ที่สัมผัสกันนั้นมีเพียงเล็กน้อยเพราะพื้นผิวมีแต่ความขรุขระ ไม่มีทางทำให้พื้นผิวของวัตถุราบเรียบอย่างสมบูรณ์ได้ (8)

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ชนิดของผิวสัมผัส แผ่นฟิล์มที่อาจจับคลุมอยู่บนผิวหน้าของวัตถุ อุณหภูมิ และระดับความสกปรก ตัวอย่างเช่น ถ้าประกบผิวหน้าของโลหะคู่หนึ่งที่ทำความสะอาดมาเป็นอย่างดี โดยวางอยู่ในห้องสุญญากาศ จะพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นกว่าปกติ ทั้งนี้เพราะไม่เกิดฟิล์มออกไซด์ระหว่างผิวสัมผัส แต่ถ้าประกบกันในบรรยากาศธรรมดา ก๊าซออกซิเจนในอากาศจะออกซิไดส์โลหะ เกิดเป็นโลหะออกไซด์กันไม่ให้โมเลกุลของโลหะทั้งสองอยู่ชิดกัน จึงทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในบรรยากาศน้อยกว่าในสุญญากาศ (8)

3. การลดความเสียดทาน (8)

การลดความเสียดทานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้สารหล่อลื่น การใส่ลูกปืนเข้าไปในเครื่องจักร เป็นต้น แรงเสียดทานต่อวัตถุที่กลิ้งจะน้อยกว่าเมื่อวัตถุมีการไถล ทั้งนี้เป็นเพราะในการกลิ้ง จุดสัมผัสจริง ๆ จะถูกทำให้ขาดด้วยแรงดึง (Tension) ไม่ใช่แรงเฉือน (Shear) เหมือนการไถลของวัตถุ

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปฏิริยาของเนื้อเยื่อต่อแรงในการเคลื่อนฟัน

การรักษาทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อแก้ไขการสบฟันที่ผิดปกติให้ได้ผลดีที่สุด จำเป็นต้องทราบปฏิกิริยาของเนื้อเยื่อต่อแรงในการเคลื่อนฟันด้วยซึ่งมีสาระโดยสังเขปดังนี้

1. การเคลื่อนฟันตามสรีรวิทยา (Physiologic tooth movement) (13,14, 15,16)

การเคลื่อนฟันตามสรีรวิทยาเป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของฟันที่เกิดขึ้นระหว่างการงอกของฟันรวมถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของฟันภายหลังจากฟันงอกเต็มที่แล้วด้วย ในเด็ก ๆ ฟันซี่ที่กำลังงอก จะเคลื่อนตัวสู่ตำแหน่งปกติของมันถ้ามีช่องว่างเพียงพอ เมื่อฟันงอกเต็มที่แล้ว การบดเคี้ยวจะค่อย ๆ ทำให้ฟันสึกไปเรื่อย ๆ ฟันจะพยายามเคลื่อนตัวอยู่เสมอเพื่อให้ฟันสบกันได้ตามปกติและรักษาระยะห่างระหว่างขากรรไกรบนล่างไว้ ตลอดจนคงความสัมพันธ์กับฟันข้างเคียงไว้ด้วย

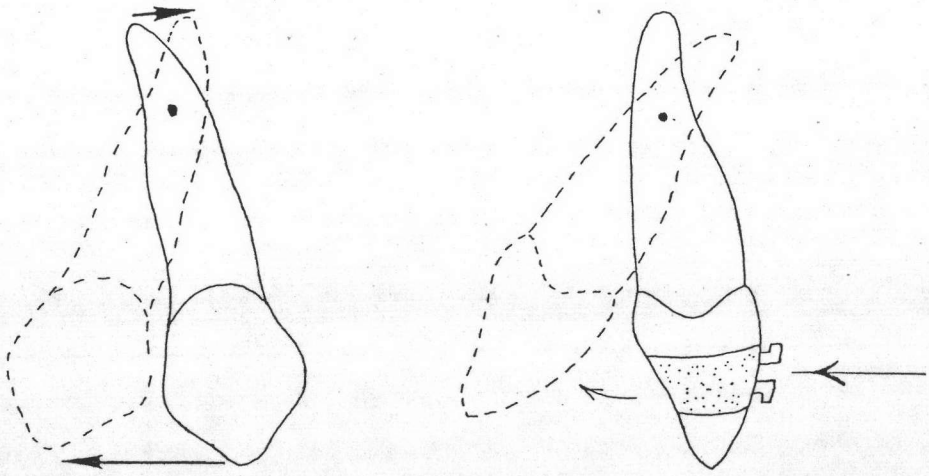
2. การเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟัน (Orthodontic tooth movement)

การเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันอาศัยหลักการว่า (13) ถ้ามีแรงมากระทำที่ฟันเป็นเวลานานพอ ฟันจะเคลื่อนที่ไปในขณะที่กระดูกรอบ ๆ ฟันจะมีการปรับรูปร่าง (Remodel) โดยกระดูกบางบริเวณมีการละลายออกไปและกระดูกบริเวณอื่นมีการพอกตัวขึ้นมาใหม่ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันมีอยู่ 4 ประการคือ ชนิดของการเคลื่อนฟัน (Type of tooth movement) ขนาดของแรงที่ใช้ (Magnitude of force) ระยะเวลาที่ให้แรง (Duration of force) และอายุของผู้ป่วย

2.1 ชนิดของการเคลื่อนฟัน (14,15,16)

2.1.1 การเคลื่อนฟันแบบทิปปิง (Tipping movement)

การเคลื่อนฟันแบบทิปปิง เป็นการเคลื่อนฟันที่ตัวฟัน (Crown) เคลื่อนไปในทิศทางหนึ่งในขณะที่รากฟัน (Root) จะเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่มีระยะทางน้อยกว่า โดยมีจุดหมุนอยู่ที่รากฟันในแนวแกนฟัน (Long axis) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่งได้ ขึ้นอยู่กับกายวิภาคของรากฟัน อวัยวะที่รองรับฟัน ขนาดของแรงและตำแหน่งที่แรงมากระทำ การเคลื่อนฟันแบบนี้มีชื่อเรียกอื่น ๆ อีกคือ การเคลื่อนฟันแบบทิปปิงของตัวฟัน (Crown tipping) หรือการเคลื่อนที่ของตัวฟัน (Crown movement)



ก ข

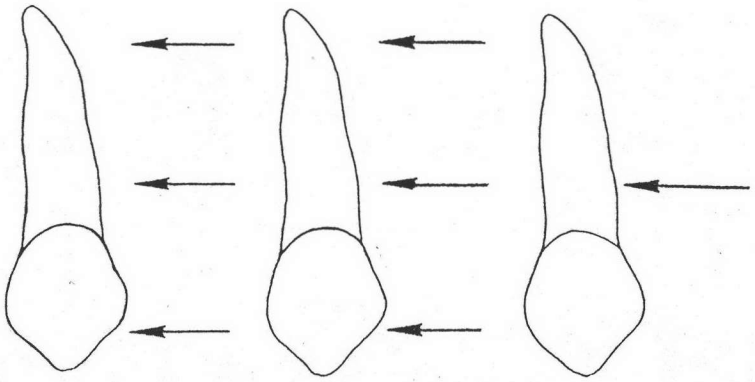
รูปที่ 1ก แสดงการเคลื่อนฟันแบบทิปปิงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (Mesiodistal) (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 148)

รูปที่ 1ข แสดงการเคลื่อนฟันแบบทิปปิงในแนวด้านข้างแก้ม-ด้านลิ้น (Buccolingual) (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 178)

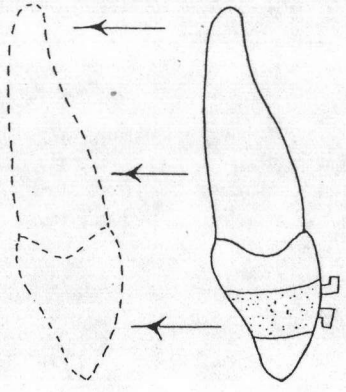
2.1.2 การเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์ (Bodily movement)

การเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์ เป็นการเคลื่อนฟันที่มีตัวฟันและรากฟันเคลื่อนไปในทิศทางเดียวกันด้วยอัตราที่เท่ากันและปราศจากการหมุน การเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์นี้ต้องใช้แรงในการเคลื่อนฟันมากกว่าการเคลื่อนฟันแบบทิปปิง ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยจัดให้มีแรงและโมเมนต์กระทำต่อฟันในขนาดที่พอเหมาะเพื่อให้เกิดผลเหมือนมีแรงเดี่ยวกระทำผ่าน

จุดศูนย์กลางความต้านทาน (Center of resistance) ของฟัน



รูปที่ 2ก แสดงการเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์ในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 146)

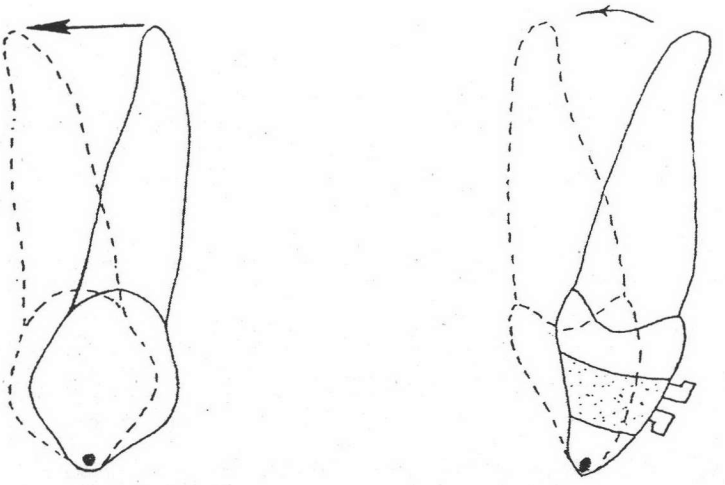


รูปที่ 2ข แสดงการเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์ในแนวด้านข้างแก้ม-ด้านลิ้น (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 184)

2.1.3 การเคลื่อนฟันแบบทอร์ก (Torque movement)

การเคลื่อนฟันแบบทอร์กเป็นการเคลื่อนรากฟันไปในทิศทางที่ต้องการโดยให้ตัวฟันอยู่ที่เดิม ซึ่งในทางทฤษฎีจะมีจุดหมุนอยู่ที่ปลายตัวฟัน แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้รากฟันเคลื่อนที่ไปโดยให้ตัวฟันอยู่กับที่ได้ ตัวฟันมักจะเคลื่อนที่ไปบ้างเล็กน้อย การเคลื่อนฟันแบบทอร์กนี้มีชื่อเรียกอื่น ๆ อีก เช่น การเคลื่อนรากฟัน (Root movement) หรือทอร์กรากฟัน

(Root torque)



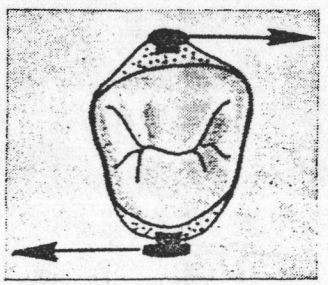
ก ข

รูปที่ 3ก การเคลื่อนฟันแบบทอร์กในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 150)

รูปที่ 3ข การเคลื่อนฟันแบบทอร์กในแนวด้านข้างแก้ม-ด้านลิ้น (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 183)

2.1.4 การเคลื่อนฟันแบบหมุน (Rotational movement)

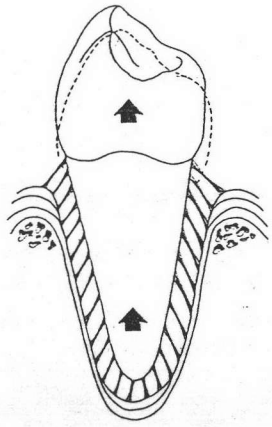
การเคลื่อนฟันแบบหมุนเป็นการเคลื่อนที่ของฟันรอบแนวแกน โดยให้แรงกระทำบนตัวฟันสองตำแหน่งในทิศทางตรงกันข้าม การเคลื่อนฟันแบบนี้ไม่ต้องใช้แรงมากนัก แต่เป็นการเคลื่อนฟันที่ค่อนข้างยากเพราะมักคืนกลับเสมอ



รูปที่ 4 แสดงการเคลื่อนฟันแบบหมุน (จาก Gianelly และ Goldman (15) หน้า 157)

2.1.5 การเคลื่อนฟันแบบเอ็กซ์ทรูซีฟ (Extrusive movement)

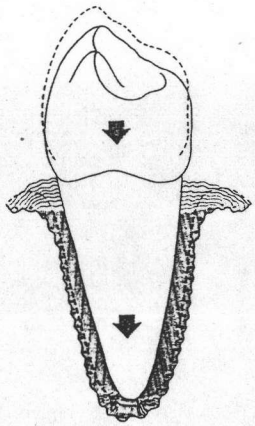
การเคลื่อนฟันแบบเอ็กซ์ทรูซีฟเป็นการเคลื่อนฟันไปทางด้านบดเคี้ยว การเคลื่อนฟันแบบนี้จะได้ผลดีถ้ากระทำในระยะที่ผู้ป่วยยังมีการเจริญเติบโต เพราะนอกจากฟันจะเคลื่อนไปทางด้านบดเคี้ยวแล้ว ยังเป็นการกระตุ้นให้เกิดการเจริญในแนวดิ่งของกระดูกอีกด้วย



รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนฟันแบบเอ็กซ์ทรูซีฟ (จาก Avery (17) หน้า 299)

2.1.6 การเคลื่อนฟันแบบอินทรูซีฟ (Intrusive movement)

การเคลื่อนฟันแบบอินทรูซีฟ เป็นการเคลื่อนฟันไปทางรากฟัน โดยทั่วไปจะได้ผลดีในผู้ป่วยที่ยังมีการเจริญเติบโตเช่นกัน



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนฟันแบบอินทรูซีฟ (จาก Avery (17) หน้า 299)

2.2 ขนาดของแรง

2.2.1 แรงขนาดต่ำ (Low force)

แรงขนาดต่ำที่กระทำต่อฟันเป็นระยะเวลานานพอ สามารถทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้ในอัตราที่ช้ามากจนไม่เกิดประโยชน์ในทางคลินิก

2.2.2 แรงขนาดพอเหมาะหรือแรงน้อย ๆ (Optimal or Light force)

แรงขนาดพอเหมาะเป็นแรงที่สามารถเคลื่อนฟันชี่ที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วโดยทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อน้อยที่สุดและผู้ป่วยเกิดความเจ็บปวดน้อยที่สุด ทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

จากการศึกษาเกี่ยวกับแรงขนาดพอเหมาะสำหรับฟันแต่ละชี่ พบว่า (15)

การเคลื่อนฟันแบบทิปปิง	ฟันตัด	ใช้แรง 20-30	กรัม
	ฟันเขี้ยว	ใช้แรง 50-75	กรัม
การเคลื่อนฟันแบบทอร์ก	ฟันตัด	ใช้แรง 50	กรัม
	ฟันเขี้ยว	ใช้แรง 120-150	กรัม
การเคลื่อนที่แบบบอดิลีย์	ฟันตัด	ใช้แรง 40-50	กรัม
	ฟันเขี้ยว	ใช้แรง 150	กรัม
การเคลื่อนฟันแบบเอ็กซ์ทรูชีฟ		ใช้แรง 25-30	กรัม
การเคลื่อนฟันแบบอินทรูชีฟ		ใช้แรง 15-50	กรัม

2.2.3 แรงขนาดหนัก (Heavy force)

เมื่อมีแรงขนาดหนักกระทำต่อฟัน จะทำให้เอ็นปริทันต์ (Periodontal ligament) ถูกกด เกิดการตีบตันของหลอดเลือดทำให้ขาดสารอาหารมาหล่อเลี้ยง จึงเกิดการตายของเนื้อเยื่อปริทันต์ชนิดไม่ติดเชื้อซึ่งเรียกว่า ไฮยาลินไนเซชัน (Hyalinization) ขึ้น ผลที่ตามมาก็คือ เกิดการละลายของกระดูกแบบอ้อม ในทางคลินิกถ้ามีแรงขนาดหนักมากระทำที่ตัวฟัน ระยะ 2-3 วันแรกฟันจะเคลื่อนที่เร็วมากแต่เป็นระยะทางสั้น ๆ หลังจากนั้นฟันจะหยุดเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่น้อยมากเป็นเวลา 2-3 อาทิตย์ แล้วฟันจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วในระยะที่สาม ดังนั้นการใช้แรงขนาดหนักในฟันที่อยู่กับที่เป็นเวลานาน อาจทำให้

016698

ฟันที่เป็นหลักยึดเคลื่อนที่มาข้างหน้าเกิดการสูญเสียหลักยึด (Loss of anchorage) ได้

2.2.4 แรงสูงมาก (Excessive force)

แรงสูงมากที่กระทำต่อตัวฟัน จะทำให้เอ็นปริทันต์ถูกกดจนหลอดเลือดตีบตัน ขาดสารอาหารมาหล่อเลี้ยง เกิดไฮยาลินไนเซชันและการละลายของกระดูกแบบอ้อมเป็นบริเวณกว้าง รากฟันละลาย ฟันตาย ฟันโยกมากและผู้ป่วยจะรู้สึกปวดมากด้วย

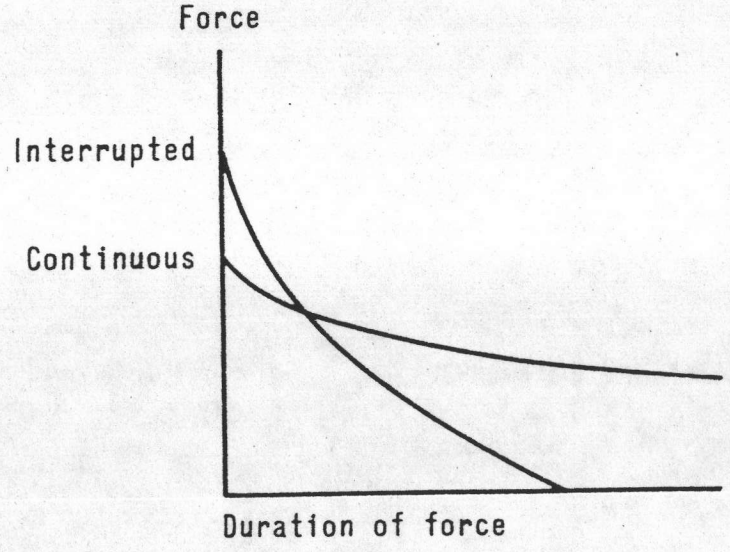
2.3 ระยะเวลาที่ให้แรง

2.3.1 แรงต่อเนื่อง (Continuous force)

แรงต่อเนื่องเป็นแรงที่ฟันได้รับอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ใส่เครื่องมือจัดฟัน เช่น แรงจากสปริงต่าง ๆ เป็นต้น แรงดังกล่าวจะลดลงบ้างเล็กน้อยเมื่อฟันเคลื่อนที่หรือเครื่องมืออ่อนกำลังลง แต่ก็ยังคงมีแรงอยู่ตลอดเวลา

2.3.2 แรงอินเตอร์รัปท์ (Interrupted force)

แรงอินเตอร์รัปท์เป็นแรงที่ฟันได้รับในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่นานพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนของฟัน เมื่อฟันเคลื่อนตัวไปแล้วเครื่องมือจะทำหน้าที่พยุงให้ฟันอยู่กับที่โดยไม่มีแรงมากระทำ เช่น การมัดฟันเข้ากับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน การทำทอร์กเป็นต้น

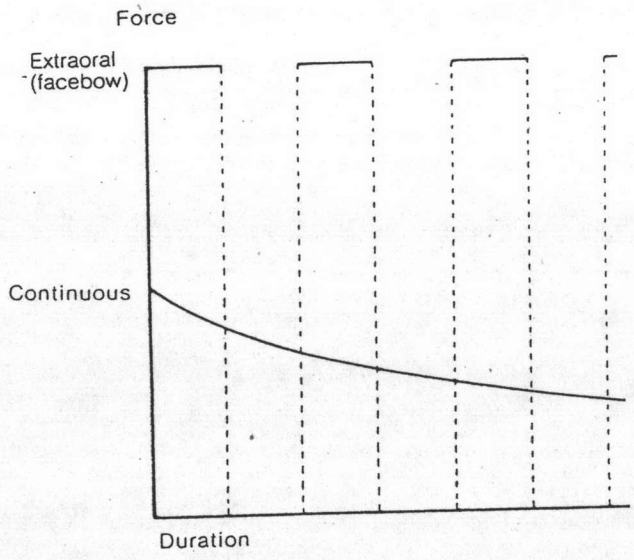


รูปที่ 7 แสดงความแตกต่างของขนาดแรงและระยะเวลาระหว่างแรงต่อเนื่องและแรงอินเตอร์รัปท์ (จาก Reitan (14) หน้า 129)

การเคลื่อนฟันโดยการใช้แรงอินเตอร์รัปท์มีข้อดีคือ มีระยะพักมากพอเพื่อให้เนื้อเยื่อรอบ ๆ ฟันมีการจัดตัวใหม่ (Reorganized) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องมือถูกปลุกฤทธิ์อีกครั้งหนึ่ง

2.3.3 แรงเป็นระยะ (Intermittent force)

แรงเป็นระยะ เป็นแรงที่ฟันได้รับในระยะเวลาอันสั้น แล้วมีช่วงหยุดแรงสลับกันไปเรื่อย ๆ เช่น แรงจากสปริงในเครื่องมือจัดฟันชนิดถอดได้ แรงจากเครื่องมือนอกช่องปาก (Extraoral force) ซึ่งฟันจะได้รับแรงขณะที่ผู้ป่วยใส่เครื่องมือและจะไม่มีแรงมากระทำขณะที่ผู้ป่วยถอดเครื่องมือ



รูปที่ 8 แสดงความแตกต่างของขนาดแรงและระยะเวลาระหว่างแรงต่อเนื่องและแรงเป็นระยะ (จาก Reitan (14) หน้า 151)

การถอดเครื่องมือเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ไม่ทำให้เกิดผลเสีย แต่ถ้าถอดเครื่องมือนานมากไป ฟันที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะเกิดการคืนกลับ (Relapse) การใส่เครื่องมือเพื่อเคลื่อนฟันไปในทิศทางเดิมจะยุ่งยากและเสียเวลามากขึ้น

2.4 อายุของผู้ป่วย

การเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันสามารถเกิดได้ทุกช่วงอายุ แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเคลื่อนฟันจะเกิดได้ช้าลง ถ้าให้แรงเท่ากันในระยะเวลานานเท่ากัน จะพบว่าการ

เคลื่อนฟันในผู้ป่วยอายุน้อยเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าผู้ป่วยอายุมาก

<u>ความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น</u>

Proffit และ Fields (13) คิดว่าความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นขึ้นอยู่กับ

- พื้นที่ที่แบรกเก็ตสัมผัสกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน
- แรงที่ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน ถูกกดเข้ากับร่องแบรกเก็ต
- คุณภาพของผิวสัมผัส เช่น ขรุขระ เรียบ หรือมีสารหล่อลื่น ฯลฯ

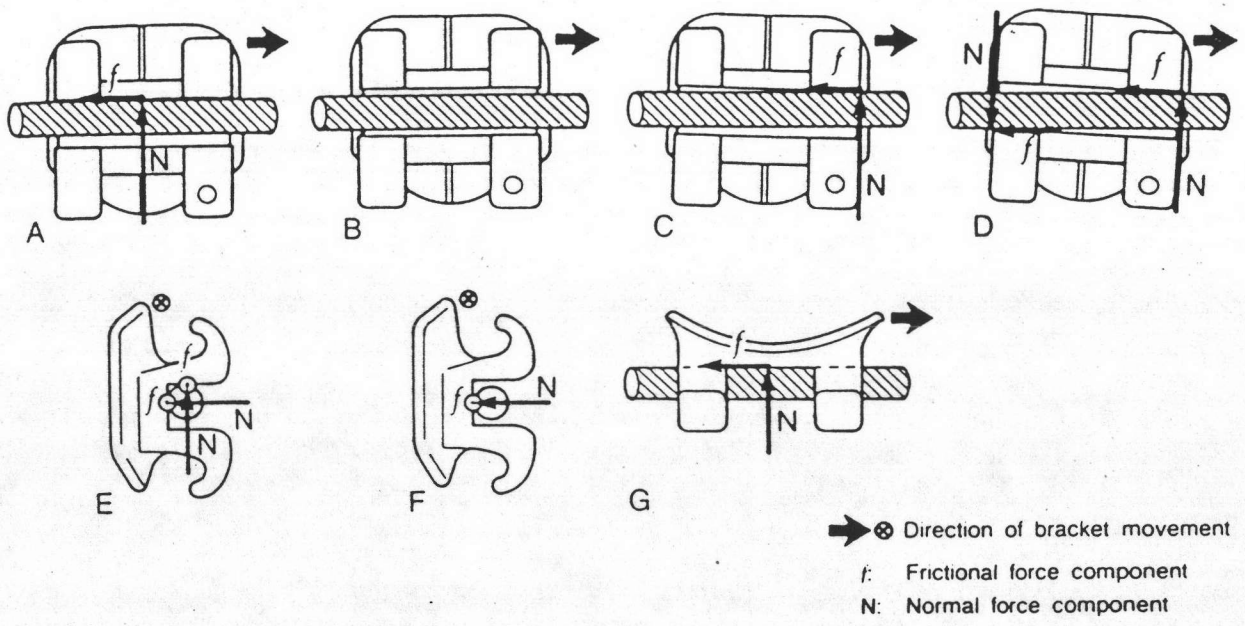
สำหรับ Thurow (18) มีความเห็นว่า สิ่งที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันก็คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงที่ใช้ระหว่างผิวสัมผัสของแบรกเก็ตกับลวด โดยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตกับลวดไม่ได้เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานเลย เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจะเป็นการเพิ่มพื้นผิวที่สร้างความเสียดทาน (Friction-creating surface) ในอัตราเดียวกันกับการลดแรงต่อหน่วยพื้นที่ ดังนั้นผลต่าง ๆ จึงสมดุลย์ซึ่งกันและกัน ส่วน Tidy (19) มีความเชื่อตามกฎของความเสียดทานที่ว่า "ความเสียดทานใด ๆ จะเป็นปฏิภาคกับแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก" ซึ่งในกรณีที่แบรกเก็ตเกิดการไถลไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน แรงปฏิกิริยาตั้งฉากระหว่างผิวสัมผัสของแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน จะเกิดขึ้นจาก

1. การมัด (Engagement) ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับแบรกเก็ตซึ่งอยู่นอกแนวการเรียงตัวของฟัน (Out of alignment)
2. แรงจากการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับฐานของร่องแบรกเก็ต
3. ทอร์กซึ่งมีฤทธิ์ (Active torque) ในลวดเหลี่ยม
4. ความต้านทานที่จุดสัมผัส 2 จุด (Two-point contact) ระหว่างแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันในขณะที่ฟันมีการเคลื่อนแบบบอดิลีย์ (Bodily tooth movement) และมีแนวโน้มที่จะเกิดการล้มเอียงของฟัน (Tipping tendency)

ความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น มีทั้งความเสียดทานสถิตและความเสียดทานจลน์ ในขณะที่เราทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลวดผ่านแบรกเก็ต หรือทำให้แบรกเก็ตเคลื่อนที่ไปตาม

ลวด จะเกิดแรงอยู่ 2 ชนิด (20) คือ แรงเสียดทานซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัส และแรงปฏิกิริยาตั้งฉากซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัสและตั้งฉากกับแรงเสียดทานด้วย

ในขณะที่ฟันเคลื่อน ความสัมพันธ์ระหว่างแบรกเก็ตและลวดอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่าง ๆ (รูปที่ 9) ดังนั้น ขนาดและทิศทางของแรงเสียดทานตลอดจนแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 9 แรงเสียดทานและแรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่เกิดจากลวดกระทำต่อแบรกเก็ตฟันเขี้ยวล่างด้านซ้าย ซึ่งไม่ได้แสดงการมัดลวดเข้ากับร่องแบรกเก็ตเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

รูป A ถึง D เป็นรูปทางด้านหน้าของแบรกเก็ต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบรกเก็ตกับลวดในลักษณะต่าง ๆ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากระหว่างการเคลื่อนฟันด้วย

รูป E และ F เป็นรูปทางด้านใกล้กลางของแบรกเก็ต ⊗ แทนการเคลื่อนที่ของแบรกเก็ตในแนวตั้งฉากเข้าไปในหน้ากระดาษ

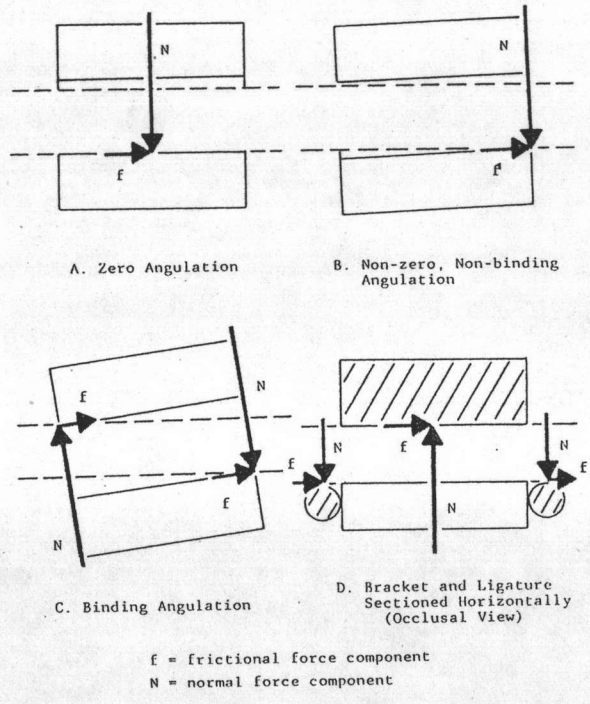
รูป G เป็นรูปทางด้านบดเคี้ยวของแบรกเก็ตและลวด (จาก Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20))

Frank และ Nikolai (2) ได้อธิบายลักษณะของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นเอาไว้ว่า เมื่อพิจารณาทางด้านหน้า (Facial view) แล้ว จะพบว่าแรงปฏิกิริยาตั้งฉากมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

1. ในขณะที่แบรกเก็ตยังไม่เคลื่อนไปตามลวด แรงปฏิกิริยาตั้งฉากของลวดที่กระทำต่อแบรกเก็ตจะกระจายเหนือด้านบดเคี้ยว (Occlusal) หรือด้านใกล้เหงือก (Gingival) ของร่องแบรกเก็ต หรือกระจายเหนือขอบด้านใกล้กลาง (Mesial edge) และขอบด้านไกลกลาง (Distal edge) บนด้านเดียวกันของแบรกเก็ต ซึ่งแสดงไว้ในรูป 10A

2. เมื่อแบรกเก็ตเริ่มมีการล้มเอียง (Tip) ในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางแต่ยังมีช่องว่าง (Clearance) ระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ต ลวดจะสัมผัสขอบของร่องแบรกเก็ตทางด้านใกล้กลางหรือด้านไกลกลางดังในรูปที่ 10B

3. เมื่อแบรกเก็ตมีการเอียงมากขึ้นจนไม่มีช่องว่างระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ตแรงปฏิกิริยาตั้งฉากจากลวดจะมี 2 แห่งคือ ที่ขอบของร่องแบรกเก็ตในแนวทะแยงมุมดังในรูปที่ 10C



รูปที่ 10 แรงที่เกิดจากลวดกระทำต่อแบรกเก็ตในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งเมื่อแตกแรงแล้ว ในแนวดิ่งจะเป็นแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก ส่วนในแนวระดับจะเป็นแรงเสียดทาน ในแต่ละภาพแสดงให้เห็นว่าแบรกเก็ตเอียงไปทางด้านซ้ายเมื่อเทียบกับลวด (จาก Frank และ Nikolai (2))

แรงปฏิกิริยาตั้งฉากทั้งสามลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นเป็นประจำระหว่างการดึงฟันเขี้ยวไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน แรงปฏิกิริยาตั้งฉากทั้งสามลักษณะอาจมีความแตกต่างกันบ้างระหว่างลวดกลมและลวดเหลี่ยม ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อความเสียดทานด้วย เมื่อพิจารณาทางด้านบดเคี้ยว (Occlusal view) ดูบ้าง (รูป 10D) ก็จะพบว่าแรงปฏิกิริยาตั้งฉากเกิดจากการสัมผัสระหว่างลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันกับร่องแบรกเก็ตทางด้านใกล้ลิ้น (Lingual surface) และเกิดจากการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับร่องแบรกเก็ตด้วยลวดมัดแบรกเก็ต (Ligature tie or Ligature wire) ยางมัดแบรกเก็ต (Elastic ligature) หรือ โฮลดิง พิน (Holding pin) ในการวิเคราะห์แผนผังของแรงทางด้านบดเคี้ยว (Occlusal plane analysis) นั้น ต้องพิจารณาด้วยว่าการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับร่องแบรกเก็ตนั้น เรามัดเฉพาะขอบด้านใกล้กลางหรือขอบด้านไกลกลางของแบรกเก็ต เช่นในกรณีฟันหมุน หรือมัดที่ขอบแบรกเก็ตทั้งสองด้าน

การดึงฟันเขี้ยวไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันในทางคลินิกนั้น Frank และ Nikolai (2) แยกแยะออกเป็น 3 ระยะด้วยกัน คือ

ระยะแรก จะเกิดการเคลื่อนฟันแบบทิปปิงของตัวฟันไปทางด้านไกลกลาง (Distal crown tipping) ซึ่งเกิดจาก แรงจากแหล่งกำเนิดแรงมีมากกว่าความต้านทานของเนื้อเยื่อปริทันต์และความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตกับลวด การเคลื่อนฟันแบบทิปปิงตัวฟันไปทางด้านไกลกลางนี้จะเกิดต่อไปเรื่อย ๆ เกิดการทำมุมของร่องแบรกเก็ต (Bracket-slot angulation) เมื่อเทียบกับลวดมากขึ้นจนกระทั่งช่องว่างระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ตหมดไป ฟันเขี้ยวจึงเริ่มเกิดการยึดเหนี่ยว (Binding) ขึ้น

ระยะที่สอง ฟันเขี้ยวยังคงเคลื่อนที่ไปทางไกลกลางต่อไปเรื่อย ๆ แต่ขณะนี้จะมีแรงคู่ควบที่เกิดจากการที่ลวดแตะกับขอบของร่องแบรกเก็ตในแนวทะแยงมุม แรงคู่ควบนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงที่ทำให้ตัวฟันล้มเอียง (Tipping force) ฟันเขี้ยวจึงเริ่มเปลี่ยนจากการเคลื่อนฟันแบบทิปปิง กลายเป็นการเคลื่อนฟันแบบบอดิลีย์

ระยะที่สาม ระยะนี้แรงจากแหล่งกำเนิดแรงจะค่อย ๆ ลดลง ในขณะเดียวกัน แรงคู่ควบก็จะลดลงด้วย ฟันเขี้ยวในระยะนี้จึงเกิดการเคลื่อนรากฟัน (Root movement) เกิดการตั้งฟัน (Upright) และเมื่อแรงจากแหล่งกำเนิดแรงลดลงมาจนเกือบเป็นศูนย์ การทำมุมของร่องแบรกเก็ตก็จะกลับสู่ช่วงท้ายของระยะที่หนึ่ง

ปริมาณการเกิดการเคลื่อนฟันแบบทิปปิงในระยะแรกนั้น Frank และ Nikolai (2) คิดว่าขึ้นอยู่กับ

- การทำมุมของร่องแบรกเก็ตตั้งแต่เริ่มแรก
- การโก่งงอแบบเกเบิล (Gable bend) ในลวด
- ความกว้างของแบรกเก็ต
- ขนาดร่องแบรกเก็ต
- ขนาดของลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน

ส่วนการเคลื่อนฟันแบบทิปปิงที่เพิ่มขึ้นในระยะที่สองนั้น ขึ้นอยู่กับการหมดฤทธิ์ (Deactivation) ของแหล่งกำเนิดแรงและความแข็งตึงของลวดในการโก่งงออร์เดอร์ที่สอง (Second order/ or Rotational bending stiffness) ซึ่งความแข็งตึงของลวดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด วัสดุที่ใช้ทำลวด และระยะห่างระหว่างแบรกเก็ตบนฟันแต่ละซี่ (Interbracket distance)

Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) แบ่งแยกการดึงฟันเขี้ยวไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันออกเป็น 4 ระยะด้วยกัน คือ

ระยะแรก เป็นระยะที่มีการปรับฟันให้อยู่ในระดับที่ดีแล้ว และยังไม่มีการให้แรงแก่ฟันในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ระยะนี้ลวดและร่องแบรกเก็ตจะอยู่ในแนวเดียวกัน (รูป 11A)

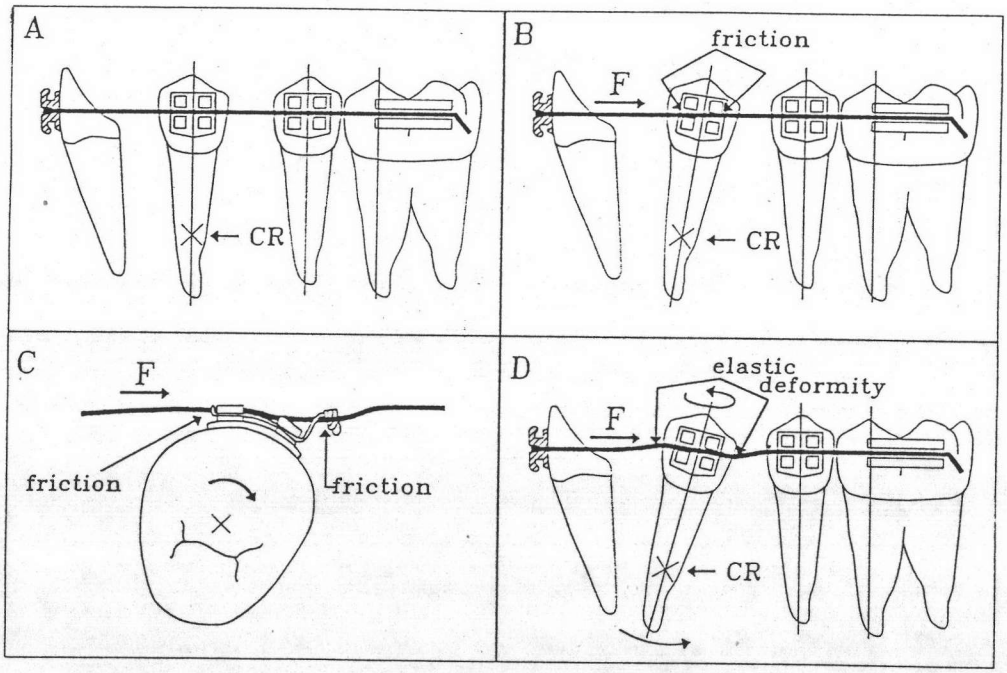
ระยะที่สอง เมื่อมีการให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ฟันจะเริ่มล้มเอียงและหมุน เนื่องจากจุดที่แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางมากระทำอยู่เหนือจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟัน (รูป 11B,11C)

ระยะที่สาม การให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางอย่างต่อเนื่องจะทำให้ลวดเกิดการผิดรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic deformity) ในขณะเดียวกันแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างลวดและแบรกเก็ตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ทำให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางหายไป การผิดรูปในช่วงยืดหยุ่นของลวดจะทำให้เกิดการต้านการล้มเอียง (Antitip) และต้านการหมุน (Antirotate) ของฟัน (รูป 11D)

การเคลื่อนฟันไปตามลวดจะเกิดการเคลื่อนที่ของฟันตั้งแต่ระยะที่หนึ่งถึงระยะที่สามซ้ำ ๆ กันหลายหน อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยหลายประการที่มาเกี่ยวข้อง เช่น แรงจากการบดเคี้ยวที่อาจมีผลให้การเคลื่อนที่ของฟันทั้งสามระยะเสียไปโดยทำให้ลวดเกิดการผิดรูปอย่าง

ถาวร (Permanent deformation) ได้

ระยะที่สี่ เป็นระยะที่ลวดเกิดการผิดรูปร่างอย่างถาวรจากปัจจัยอื่น ๆ ที่มาเกี่ยวข้อง ระยะนี้เป็นระยะที่ต้องพยายามหลีกเลี่ยง



รูปที่ 11 แสดงการเคลื่อนฟันไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันทั้งสามระยะ

ระยะแรก เป็นระยะที่ฟันมีการปรับระดับดีแล้วก่อนการให้แรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง (รูป 11A)

ระยะที่สอง เมื่อฟันได้รับแรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ฟันจะล้มเอียง (รูป 11B) และหมุน (รูป 11C) ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน และเกิดแรงเสียดทานขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันกับลวดมัดแบรกเก็ตด้วย

ระยะที่สาม เมื่อลวดได้รับแรงในแนวใกล้กลาง-ไกลกลางอย่างต่อเนื่องจะทำให้ลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเกิดการผิดรูปร่างในช่วงยืดหยุ่น แรงเสียดทานที่จุดสัมผัสจึงค่อย ๆ สูงขึ้น เกิดการต้านการล้มเอียงและต้านการหมุนของฟัน (รูป 11D)

(จาก Drescher, Bourauel และ Schumacher (21))

ศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานในการจัดฟันชนิดติดแน่น

1. เลเซอร์ (Laser) (22)

1.1 เลเซอร์ เป็นแสงชนิดหนึ่งมีกำลังสูง เป็นแสงสีเดียวมีความยาวคลื่นขนาดหนึ่งโดยเฉพาะ ยอดคลื่นของแต่ละคลื่นและท้องคลื่นของแต่ละคลื่นทับซ้อนกันพอดี เลเซอร์เป็นแสงที่ส่องไปได้ไกลและมีประสิทธิภาพสูง เมื่อกระทบกับวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาจะสามารถจับเวลาในการเดินทางไปและกลับของมันได้อย่างแม่นยำ ใช้เป็นเครื่องวัดระยะทางจากโลกถึงดวงจันทร์ได้ละเอียดถึงหน่วยเซ็นติเมตร

1.2 เลเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เหนี่ยวนำอะตอมของแก๊สให้เปล่งแสงเลเซอร์ออกมาเป็นห้วง ๆ อุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องบรรจุอะตอมผนึกไว้ให้ได้รับรังสีหรือสนามไฟฟ้าอย่างแรงเพื่อให้อะตอมถูกกระตุ้นหรือไม่ก็กลายเป็นไอออนที่สามารถคายโฟตอน (Photon) ออกมา โฟตอนที่ถูกคายออกมาจากอะตอมเหล่านั้น จะเหนี่ยวนำให้อะตอมอื่น ๆ คายโฟตอนออกมาต่อไปเรื่อย ๆ เกิดเป็นลำแสงซึ่งมีกำลังสูงมาก

2. สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) (22)

สเปกโทรสโกปีเป็นวิทยาศาสตร์ว่าด้วยการศึกษาสสารและพลังงานโดยใช้เครื่องสเปกโทรสโคป

3. สเปกคูลาร์ รีเฟลกแทนซ์ (Specular reflectance) (22)

สเปกคูลาร์ รีเฟลกแทนซ์ เป็นการสะท้อนของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์หรือสม่ำเสมอ เกิดเมื่อพื้นผิวที่ทำหน้าที่สะท้อนแสงราบและมีความเรียบสม่ำเสมอภายใน 1/8 ของความยาวคลื่นของรังสีที่ตกกระทบ

4. ค่าอาร์เอมเอส (RMS value) (22)

อาร์เอมเอส ย่อมาจากคำว่า Root Mean Square ค่าอาร์เอมเอสของค่าใดคือรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของค่านั้นที่ได้จากช่วงเวลาหนึ่ง สามารถเขียนเป็นสูตรง่าย ๆ ได้ดังนี้

$$\text{ค่าอาร์เอมเอส} = \sqrt{\frac{\text{ผลบวกของกำลังสองแต่ละตัวของตัวแปรค่า}}{\text{จำนวนตัวแปรค่าทั้งหมด}}}$$

5. โลหศาสตร์ (Metallography) (22,23)

โลหศาสตร์ เป็นวิทยาศาสตร์ที่ว่าด้วยโครงสร้างผลึกของโลหะและโลหะผสม ในสมัยก่อนโลหศาสตร์มีความหมายรวมถึงโลหกรรม (Metallurgy) ด้วย แต่ปัจจุบันโลหกรรมแยกออกเป็นอีกสาขาหนึ่งโดยเฉพาะ

6. โลหกรรม (Metallurgy or Metallergy) (22,23)

โลหกรรม เป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งว่าด้วยการสกัดเอาโลหะออกมาจากสินแร่ การอบและการชุบด้วยความร้อนและการทำโลหะผสมต่าง ๆ

7. การขัดตามวิธีโลหศาสตร์มาตรฐาน (Standard metallographic polishing procedure) (23)

การขัดตามวิธีโลหศาสตร์มาตรฐานเริ่มจากการนำโลหะตัวอย่างมาขัดถูด้วยกระดาษสำหรับขัดถู (Emery paper) ซึ่งมีความละเอียดมากขึ้นเรื่อย ๆ แล้วขัดต่อด้วยอลูมิเนียมออกไซด์, แมกนีเซียมออกไซด์ หรือกากเพชร

การขัดนี้จะทำให้โลหะตัวอย่างไม่มีรอยขีดข่วนและมีผิวคล้ายกระจก แต่การขัดดังกล่าวแม้ว่าจะกระทำอย่างถูกต้องทุกขั้นตอนก็จะทำให้โลหะตัวอย่างเกิดการบิดเบี้ยวเป็นผิวบาง ๆ (Thin layer of distored metal)

8. สัมพรรคภาพทางเคมี (Chemical affinity) (22)

สัมพรรคภาพทางเคมี คือแรงดึงดูดทางเคมี หรือแรงยึดเหนี่ยวอะตอมเข้าด้วยกัน

9. โพลาไรเซชัน (Polarisation) (22)

โพลาไรเซชันสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "การเกิดขั้ว" เป็นการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์อันมีสาเหตุต่าง ๆ กัน ส่วนใหญ่เกี่ยวกับการเกิดมีโมเลกุลของแก๊สรวมตัวเกาะกันอยู่บนขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ปลดปล่อยโมเลกุลของแก๊สนั้นออกมา

10. การกระจาย (Dispersion) (22)

การกระจายในที่นี้ หมายถึงการกระจายแสง เป็นการแยกกระจายของแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ผสมกันอยู่ออกเป็นสเปกตรัมซึ่งมีแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ แยกกัน ลำแสงสีขาวเช่นแสงอาทิตย์ เมื่อผ่านแท่งแก้วปริซึม หรือ Diffraction grating จะแยกหรือกระจายออกเป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นขนาดต่าง ๆ ที่ประกอบรวมกันอยู่ ถ้าลำแสงที่ส่องผ่านออกมาหลังการแยกกระจายแล้วตกบนฉาก จะเห็นแถบสีต่าง ๆ เรียงกันอยู่เป็นสเปกตรัม การแยกกระจาย

ด้วยแท่งแก้วปริซึมเป็นเพราะแสงความยาวคลื่นขนาดต่างกันหักเหเป็นมุมมากน้อยต่างกัน เมื่อผ่านเข้าไปในปริซึมจึงแยกออกจากกัน

11. ซีโร รีซีสแตนซ์ แอมเมตตรีย์ (Zero resistance ammetry) (33)

ซีโร รีซีสแตนซ์ แอมเมตตรีย์ คำนี้ไม่สามารถหาเอกสารอ้างอิงมาอธิบายความหมายได้ ท่านผู้อำนวยการสถาบันโลหวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กล่าวว่า "คำว่าแอมเมตตรีย์ไม่มี มีแต่คำว่า แอมมิเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้หมายถึงเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความต้านทานต่ำ มีความแม่นยำสูงมาก"

12. การฉาบด้วยโลหะ (Sputtering) (22)

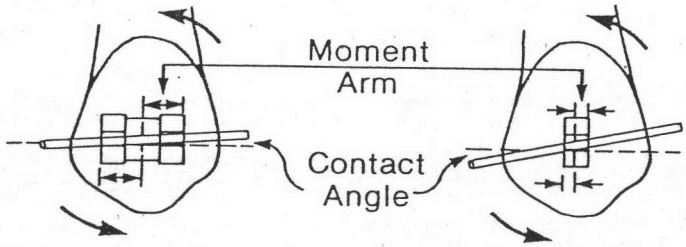
การฉาบด้วยโลหะ เป็นกระบวนการทำให้โลหะไปเกาะตัวเป็นผิวบาง ๆ บนพื้นผิวของวัตถุ ทำได้โดยนำเอาโลหะที่ต้องการให้ไปเกาะเป็นผิวบาง ๆ บนวัตถุมาทำให้เป็นแคโทดของระบบปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าความดันต่ำ นำวัตถุที่ต้องการฉาบด้วยโลหะวางไว้ระหว่างแคโทดและแอโนด ทั้งหมดนี้นำไปบรรจุในภาชนะผนึกสนิท สูบอากาศออกจนความดันต่ำลงเป็น 1 ถึง 0.01 มิลลิเมตรปรอท ต่อไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเข้ากับขั้วทั้งสองให้กระแสไฟฟ้าเดินผ่านระหว่างแอโนดและแคโทด อะตอมของโลหะจะถูกพ่นจากแคโทดไปเกาะอยู่บนผิววัตถุที่จะฉาบ

<u>ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น</u>

1. <u>ความกว้างของแบรกเก็ต</u> (Bracket Width)

ในการเคลื่อนฟันไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันนั้น จะเกิดความเสียดทานระหว่างลวดกับแบรกเก็ตขึ้น ความเสียดทานดังกล่าว Proffit และ Fields (13) แนะว่าเกิดจากแรงที่แบรกเก็ตสัมผัสกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันและมุมสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน (รูปที่ 12) แบรกเก็ตที่กว้างกว่า สามารถลดปริมาณของแรงที่ขอบร่องแบรกเก็ตและลดมุมสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันลงได้ด้วย ดังนั้นแบรกเก็ตที่กว้างจึงมีข้อดีในการลดแรงเสียดทานลง อย่างไรก็ตาม แบรกเก็ตที่กว้างจะมีระยะห่างระหว่างแบรกเก็ตบนฟันแต่ละซี่ (Interbracket span) ค่อนข้างน้อย ดังนั้นส่วนของลวด (Archwire segment) ระหว่างฟันแต่ละซี่จึงค่อนข้างสั้น ทำให้การสปริง (Springiness)

และระยะการทำงาน (Range of action) ของลวดน้อยลง และยังทำให้การควบคุมแรงในลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันยุ่งยากขึ้นด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงไม่ควรใช้แบรกเก็ตที่กว้างเกินไป แบรกเก็ตที่เหมาะที่สุดควรกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของความกว้างตัวฟัน ส่วนในฟันซ้อนเกควรใช้แบรกเก็ตแคบ เพราะจะมีระยะห่างระหว่างแบรกเก็ตบนฟันแต่ละซี่มาก ช่วยให้ลวดมีความสามารถในการบิดตัว (Flexibility) สูงขึ้น



รูปที่ 12 ความกว้างของแบรกเก็ตจะเป็นตัวพิจารณาความยาวของแขนโมเมนต์ (Length of movement arm) ซึ่งควบคุมตำแหน่งรากฟันในแนวใกล้กลาง-ไกลกลาง ความกว้างของแบรกเก็ต ยังมีอิทธิพลต่อมุมสัมผัส (Contact angle) ของลวดและแบรกเก็ตด้วย แบรกเก็ตที่กว้างกว่าจะมีมุมสัมผัสที่เล็กกว่า (จาก Proffit และ Fields (13) หน้า 259)

สำหรับ Thurow (18) คิดว่าแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันมีผิวสัมผัสราบเรียบ จึงถือว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากันตลอดผิวสัมผัส ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานก็คือ แรงที่เกิดขึ้นระหว่างแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน แบรกเก็ตที่แคบจะเกิดแรงเสียดทานมากกว่าแบรกเก็ตที่กว้างเพราะ

1. แบรกเก็ตแคบจะเกิดแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตและลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันมากกว่า ตลอดจนเพิ่มความเป็นไปได้ในการทำให้ลวดเป็นรอย (Indentation)

2. แบรกเก็ตแคบจะทำให้เกิดการล้มเอียงของตัวฟันได้มากกว่าแบรกเก็ตที่กว้าง จึงทำให้มีแรงเสียดทานมากกว่า

ในการศึกษาของ Kamiyama และ Sasaki (2) ตลอดจนการศึกษาของ Tidy (5,19) พบว่าแรงเสียดทานเป็นปฏิภาคผกผัน (Inversely proportion) กับความกว้างของแบรกเก็ต แต่การศึกษาของ Frank และ Nikolai (2) Freeney, Morton และ Burstone (24) Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) กลับให้ผลตรงกันข้าม คือ แรงเสียดทานจะเพิ่มตามขนาดความกว้างของแบรกเก็ต ที่เป็นเช่นนี้ Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) เชื่อว่าเกิดจากการใช้ยางมัดแบรกเก็ต แบรกเก็ตที่กว้างจะเกิดการยืดของยางมัดแบรกเก็ตมาก จึงเกิดแรงปฏิกิริยาตั้งฉากจากการมัดของยางมากกว่าแบรกเก็ตที่แคบ ผลที่ตามมาจึงพบว่าแบรกเก็ตที่กว้างเกิดความเสียดทานมากกว่าแบรกเก็ตแคบ ๆ ในการศึกษาของ Drescher,Bourauel และ Schumacher (21)ก็พบว่าแบรกเก็ตแคบให้แรงเสียดทานสูง แต่แบรกเก็ตขนาดกลางและแบรกเก็ตกว้างจะให้แรงเสียดทานน้อยเท่า ๆ กัน การที่แบรกเก็ตแคบให้แรงเสียดทานสูงดังกล่าว Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ให้ความเห็นว่าแบรกเก็ตแคบจะทำให้เกิดการล้มเอียงของตัวฟันได้ง่ายกว่าแบรกเก็ตกว้าง จึงเกิดแรงเสียดทานสูงกว่า

ส่วนการศึกษาของ Andreasen และ Quevedo (2) Garner, Allai และ Moore (6) พบว่าความกว้างของแบรกเก็ตไม่มีความเกี่ยวข้องกับความเสียดทานเลย นอกจากนี้ Perterson, Spencer และ Andreasen (1) ก็พบเช่นกันว่าขนาดความกว้างของแบรกเก็ตไม่มีผลต่อปริมาณแรงเสียดทานสถิตในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดไนตินอลทุกขนาดเช่นกัน

2. <u>ขนาดของร่องแบรกเก็ตและความอิสระในการเคลื่อนที่ของลวด</u> (Slot size and Freedom of wire movement)

การเคลื่อนฟันโดยเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น บางครั้งก็จำเป็นต้องเคลื่อนลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันผ่านแบรกเก็ตและบัคคัล ทิวบ์ (Buccal tube) หรืออาจต้องเคลื่อนแบรกเก็ตไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน Proffit และ Fields (13) แนะนำให้ใช้ลวดที่มีขนาดเล็กกว่าร่องแบรกเก็ต (Undersized wire) ในกรณีที่ต้องการลดความเสียดทานลงซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องมีช่องว่างระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ตตั้งแต่ 0.002 นิ้ว (0.05 มิลลิเมตร)

ขึ้นไป ถ้ามีช่องว่างระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ตน้อยกว่า 0.002 นิ้ว จะเกิดความเสียดทานมากขึ้น (18) ยิ่งในกรณีที่มีรอยขรุขระบนลวดด้วยแล้ว ฟันอาจจะหยุดเคลื่อนที่เลยก็ได้

จากการศึกษาของ Tidy (19) พบว่าความเสียดทานที่เกิดจากการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว และ 0.018x0.025 นิ้ว ทดลองกับแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้ว ตลอดจนลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว และ 0.019x0.025 นิ้ว ที่ทดลองกับแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้ว ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเลย Tidy จึงสรุปว่าขนาดร่องแบรกเก็ตมีผลต่อความเสียดทานน้อยมาก อย่างไรก็ตามลวดที่มีความกระชับ (Fit) กับร่องแบรกเก็ตมาก ๆ ก็มีโอกาสเกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ตได้เช่นกัน

3. <u>ขนาดของลวด</u> (Archwire Size)

Frank และ Nikolai (2) ได้ทำการศึกษาทดสอบหาความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตและลวด พบว่า แรงเสียดทานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของลวด ลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น รูปร่างหน้าตัดของลวดก็มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานด้วย โดยที่ลวดเหลี่ยมจะมีแรงเสียดทานมากกว่าลวดกลม

Tidy (5) พบว่าการใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018x0.025 นิ้วแทนลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว จะทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงขึ้นประมาณร้อยละ 30

Echols (3) ได้ทดลองวัดแรงเสียดทานสถิตที่ใช้ในการทำให้ลวดขนาดต่าง ๆ ไถลผ่านแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้ว Echols พบว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นต้องการแรงในการเคลื่อนที่มากกว่า

Riley, Garrett และ Moon (4) ตลอดจน Garner, Allai และ Moore (6) พบว่าการเปลี่ยนลวดกลมไปเป็นลวดเหลี่ยมและการเพิ่มขนาดของลวดเหลี่ยมจะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Peterson, Spencer และ Andreasen (1) สร้างเครื่องมือเลียนแบบการดึงฟันเขี้ยวไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน จุดประสงค์ก็เพื่อต้องการทราบว่าลวดไนตินอลต้องการแรงในการไถลผ่านแบรกเก็ตน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจริงหรือไม่ ผลการทดลองพบว่า ในกรณีลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดของลวดจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณแรงที่ต้องเอาชนะ

แรงเสียดทาน แต่ในกรณีของลวดไนตินอลไม่เป็นเช่นนั้น พวกเขาพบว่าเมื่อแบรกเก็ตเอียงทำมุมกับลวด 15 องศา ลวดเหลี่ยมไนตินอลขนาด 0.019x0.025 นิ้ว ต้องการแรงที่จะเอาชนะความเสียดทานน้อยกว่าลวดกลมไนตินอลขนาด 0.020 นิ้ว

Baker, Neilberg, Weimer และ Hanna (25) ได้ศึกษาทดลองเพื่อประเมินแรงเสียดทานที่เปลี่ยนไปเมื่อใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดต่าง ๆ (0.018 นิ้ว 0.020 นิ้วและ 0.018x0.025 นิ้ว) กับแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022x0.028 นิ้ว ในภาวะ (Condition) ต่าง ๆ คือ ภาวะแห้ง ภาวะเปียกด้วยน้ำลายเทียม (Xero-Lube$^{(TM)}$) และภาวะเปียกด้วยกลีเซอรีน ผลจากการทดลองพบว่า ลวดกลมขนาด 0.020 นิ้วให้ความเสียดทานน้อยที่สุดทั้งสามภาวะ ที่เป็นเช่นนี้พวกเขามีความเห็นว่าเป็นเพราะ ลวดกลมขนาด 0.020 นิ้วมีความกว้างในแนวด้านบดเคี้ยว-ด้านใกล้เหงือก (Occlusogingival) มากกว่าลวดกลมขนาด 0.018 นิ้ว และมากกว่าลวดเหลี่ยมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว จึงมีช่องว่างระหว่างร่องแบรกเก็ตกับลวดน้อย มุมที่ลวดจะเอียงเมื่อเทียบกับแบรกเก็ตจึงมีน้อย ดังนั้นจึงเกิดการยึดเหนี่ยวน้อยด้วย นอกจากนี้ลวดกลมขนาด 0.020 นิ้ว ยังมีความแข็งตึงมากกว่าลวดกลมขนาด 0.018 นิ้ว ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ขณะได้รับแรงน้อยกว่า

จากการศึกษาของ Kapila, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) เพื่อประเมินผลของขนาดลวด และชนิดของลวดที่มีผลต่อแรงเสียดทานระหว่างการเลื่อนแบบการดึงฟันเคี้ยว โดยใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ลวดนิเกิล-ติตาเนียม และลวดบีตา-ติตาเนียมขนาดต่าง ๆ ทดสอบกับแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม ผลจากการทดลองพบว่าการเพิ่มขนาดลวดทำให้ความเสียดทานเพิ่มขึ้น ในกรณีการควบคุม 2 มิติ (Two dimensional control) จะพบว่าลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลขนาด 0.016 นิ้วในแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้วแบบมีเดียม ทวิน (Medium twin), ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018 นิ้วในแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้วแบบมีเดียมทวินและลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลขนาด 0.018 นิ้วในแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้วแบบไวด์ ทวิน (Wide twin) มีความเสียดทานต่ำ

กรณีการควบคุม 3 มิติ (Three dimensional control) จะพบว่าลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ขนาด 0.016x0.016 นิ้ว ในแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้ว แบบมีเดียม ทวิน และลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 0.017x0.017 นิ้ว ในแบรกเก็ตขนาดร่อง

0.022 นิ้วแบบมีเดียม ทวิน มีความเสียดทานต่ำ

จากการศึกษาของ Tidy (19) นั้นกลับพบว่าขนาดของลวดมีอิทธิพลต่อความเสียดทานน้อยมาก ผลการศึกษาของ Tidy แตกต่างจากการศึกษาอื่น ๆ ที่เป็นเช่นนี้ Tidy ให้ความเห็นว่า ในกรณีที่แบรกเก็ตอยู่นอกแนวการเรียงตัวของฟัน ความแข็งตึงของลวดจะมีอิทธิพลต่อแรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่จุดสัมผัส ลวดที่มีความแข็งตึงสูงจะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่จุดสัมผัสมาก ความเสียดทานจึงมากตามไปด้วย แต่ในกรณีที่แบรกเก็ตมีการเรียงตัวอยู่ในแนวที่ดีแล้ว ความแข็งตึงของลวดจะไม่มีผลต่อความเสียดทานเลย

สำหรับ Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดลวดต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น โดยใช้ลวด 5 ขนาด คือ ลวดกลม 0.016 นิ้ว 0.018 นิ้ว ลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว 0.017x0.025 นิ้ว และ 0.018x0.025 นิ้ว ทดลองกับแบรกเก็ตที่มีร่องขนาด 0.018 นิ้ว Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) พบว่า ลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดความสียดทานสูงขึ้น แต่ลวดกลมขนาด0.016 นิ้ว และลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว จะให้แรงเสียดทานค่อนข้างน้อยและไม่แตกต่างกันเลย ส่วนลวดเหลี่ยมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว จะให้แรงเสียดทานสูงที่สุด

4. <u>แรงจากการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับร่องแบรกเก็ต</u> (Force from Ligation)

ผลการทดลองของ Frank และ Nikolai (2) ที่เกี่ยวกับแรงจากการมัดลวดพบว่าถ้าแบรกเก็ตเอียงทำมุมกับลวดไม่มาก ไม่เกิดการยึดเหนี่ยวออร์เดอร์ที่สองแล้ว แรงจากการมัดจะมีอิทธิพลต่อความเสียดทานสูง

Echols (3) ให้ความเห็นเอาไว้ว่า ในการปฏิบัติงานทางคลินิกนั้น แรงที่จะใช้ในการเคลื่อนฟันนั้นควรจะคำนึงถึงแรงยึดเหนี่ยว (Binding force) ของยางมัดแบรกเก็ตด้วย และเมื่อต้องการให้ลวดเกิดการไถลผ่านแบรกเก็ตแล้วก็ควรที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ยางมัดแบรกเก็ต

Thurow (26) ให้ความเห็นว่า ลวดมัดแบรกเก็ตนั้นมีความแข็งแรงมาก ส่วนยางมัดแบรกเก็ตมีความยืดหยุ่นมากและความแข็งแรงต่ำ การใช้ลวดมัดแบรกเก็ตจึงเกิดแรงใน

การมัดสูงกว่าการใช้ยางมัดแบรกเก็ต จึงอาจทำให้ฟันหยุดเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าด้วย Thurow แนะนำให้ระมัดระวังการหมุนของฟันในขณะที่ฟันเคลื่อนที่เมื่อใช้ยางมัดแบรกเก็ต และไม่ควรใช้แรงในการเคลื่อนฟันมาก เนื่องจากเราได้ใช้ยางมัดแบรกเก็ตแทนลวดมัดแบรกเก็ตแล้ว

Riley, Garrett และ Moon (4) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดลวด วัสดุที่ใช้ทำแบรกเก็ต ชนิดของการมัด และเวลาในการมัดที่มีผลต่อขนาดแรงเสียดทาน พวกเขาพบว่าลวดมัดแบรกเก็ตทำให้เกิดแรงเสียดทานสูง เมื่อเทียบกับการใช้ยางมัดแบรกเก็ต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้กับแบรกเก็ตพลาสติก

5. <u>วัสดุที่ใช้ทำลวด</u> (Archwire Material)

จากการศึกษาของ Peterson, Spencer และ Andreasen (1) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบว่า ลวดไนตินอลต้องการแรงในการไถลผ่านแบรกเก็ตน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจริงหรือไม่ ผลจากการทดลองพบว่า ในกรณีที่ไม่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างแรงที่ต้องใช้ในการทำให้แบรกเก็ตเริ่มเคลื่อนที่ไปตามลวดไนตินอลและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ในกรณีที่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันสูงขึ้นจาก 5 ถึง 10 องศาแล้ว ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมต้องการแรงที่จะเอาชนะความเสียดทานมากกว่าลวดไนตินอล ถ้าให้แบรกเก็ตเอียงทำมุมกับลวด 15 องศา จะพบว่าลวดไนตินอลขนาด 0.019x0.025 นิ้ว ต้องการแรงที่จะเอาชนะความเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมถึงร้อยละ 61

ในการศึกษาของ Garner, Allai และ Moore (6) เพื่อเปรียบเทียบความเสียดทานระหว่างการเลื่อนแบบการดึงฟันเขี้ยวในลวด 3 ชนิด คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดไนตินอล และลวดบีตา-ติตาเนียม ผลจากการทดลองกลับพบว่า ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมต้องใช้แรงในการทำให้แบรกเก็ตไถลไปตามลวดน้อยที่สุด ตามด้วยลวดไนตินอล ส่วนลวดบีตา-ติตาเนียมต้องการแรงในการทำให้แบรกเก็ตไถลไปตามลวดมากที่สุด

Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินผลของขนาดลวดและชนิดของลวดที่มีต่อแรงเสียดทานระหว่างการเลื่อนแบบการดึงฟันเขี้ยว พบว่า ลวดบีตา-ติตาเนียมมีความเสียดทานมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวด

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล

Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) ได้ศึกษาเปรียบเทียบแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเก็ตเซรามิกและแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม โดยให้ลวดไนตินอลและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านร่องแบรกเก็ตอย่างอิสระ พวกเขาพบเช่นกันว่า ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีความเสียดทานน้อยกว่าลวดไนตินอล

Tidy (19) ได้ทำการศึกษาเพื่อดูผลของวัสดุที่ใช้ทำลวด Tidy พบว่าลวดไนตินอลมีความเสียดทานมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมประมาณ 2 เท่า ส่วนลวดบีตา-ติตาเนียมมีความเสียดทานมากกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมถึง 5 เท่า

Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ได้ทำการศึกษาลวด 5 ชนิด คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชื่อการค้าว่า สเตนเลส สตีลมาตรฐาน (Standard stainless steel$^{(TM)}$) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชื่อการค้าว่าไฮ-ที (Hi-T$^{(TM)}$) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน ลวดเอลจิลอยสีฟ้า ของบริษัทรอกกี เมาเทน ออร์โธดอนติกส์ ลวดไนตินอลของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน และลวดบีตา-ติตาเนียมของบริษัทออร์มโก คอร์ปอเรชัน Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) พบว่าลวดไฮ-ทีให้แรงเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยลวดสเตนเลส สตีลมาตรฐาน ลวดเอลจิลอยสีฟ้า ลวดไนตินอล และลวดบีตา-ติตาเนียม ตามลำดับ

6. <u>วัสดุที่ใช้ทำแบรกเก็ตและรูปแบบของแบรกเก็ต</u> (Bracket Material and Style)

Riley, Garrett และ Moon (4) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุที่ใช้ทำแบรกเก็ตที่มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทาน Riley, Garrett และ Moon พบว่าแบรกเก็ตพลาสติกมีความเสียดทานสูงกว่าแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม

Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแรงเสียดทานสถิตระหว่างแบรกเก็ตเซรามิก 2 ชนิด คือ ทรานส์เซนด์ (Transcend$^{(TM)}$) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน (Unitek Corporation) และอัลยูร (Allure$^{(TM)}$) ของบริษัท จีเอซี อินเตอร์เนชันแนล อินคอร์ปอเรชัน (G.A.C

International Incorporation) กับแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่า แบรกเก็ตเซรามิกมีความเสียดทานสถิตสูงกว่าแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เมื่อเปรียบเทียบกันเองระหว่างแบรกเก็ตเซรามิกในการทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ในเรื่องรูปแบบของแบรกเก็ตนั้น Frank และ Nikolai (2) ได้เคยทำการศึกษาไว้แล้วพบว่า แบรกเก็ตแบบเบกก์ (Begg(TM)) ของบริษัทอเมริกัน ออร์โธดอนติกส์ (American Orthodontics) แบรกเก็ตแบบเอดจ์ล็อค (Edgelok(TM)) ของบริษัทออร์มโกคอร์ปอเรชัน และแบรกเก็ตแบบเลวิส แอนตีทิป (Lewis anti-tip(TM)) ของบริษัทอเมริกันออร์โธดอนติกส์ จะมีความแตกต่างจากแบรกเก็ตเอดจ์ไวส์แบบมาตรฐานที่มีความกว้างเท่ากัน ในกรณีที่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดไม่มาก แบรกเก็ตแบบเบกก์และเอดจ์ล็อค มีความเสียดทานน้อยมากจนอาจกล่าวได้ว่าไม่มีความเสียดทานเลยถ้าไม่ใช้ลวดหรือยางมัดแบรกเก็ต ส่วนในกรณีที่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดมาก ๆ แบรกเก็ตแบบเลวิส แอนตีทิปจะให้ความเสียดทานน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ทั้งหมด

7. <u>การทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน</u>

Frank และ Nikolai (2) ได้ศึกษาความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตและลวด โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 6 ตัวคือ ขนาดและรูปร่างของลวด ความกว้างและรูปแบบของแบรกเก็ต การทำมุมออร์เดอร์ที่สอง (Second order angulation) ระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน วัสดุที่ใช้ทำลวด แรงจากการมัดลวด และระยะระหว่างแบรกเก็ตบนฟันแต่ละซี่ หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลแล้วพบว่า ในตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษา การทำมุมออร์เดอร์ที่สองระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันจะมีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานมากที่สุด ในกรณีที่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดไม่มาก โดยไม่ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวออร์เดอร์ที่สองระหว่างแบรกเก็ตกับลวด (Second order bracket-wire binding) แล้วแรงจากการมัดจะมีอิทธิพลต่อความเสียดทานสูง ส่วนในกรณีที่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดมาก ๆ จนเกิดการยึดเหนี่ยวออร์เดอร์ที่สองแล้ว พบว่าความแข็งตึงของลวดในการโก่งงอ (Wire stiffness in bending) มีอิทธิพลในการพิจารณาแรงเสียดทานด้วยซึ่งความแข็งตึงของลวดในการโก่งงอนี้ ขึ้นกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด รูปร่าง วัสดุที่ใช้ทำลวดและระยะ

ระหว่างแบรกเก็ตบนฟันแต่ละซี่

Peterson, Spencer และ Andreasen (1) ได้ทำการศึกษาเพื่อดูว่าลวดไนตินอล ต้องการแรงในขณะไถลผ่านแบรกเก็ตน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจริงหรือไม่ โดยใช้ลวดไนตินอลและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ขนาดคือ ลวดกลมขนาด 0.020 นิ้ว ลวดเหลี่ยมขนาด 0.019x0.025 นิ้วและลวดเหลี่ยมขนาด 0.021x0.025 นิ้ว แบรกเก็ตเอียงทำมุมกับลวด 4 ระดับคือ 0,5,10 และ 15 องศา จากการทดลอง Peterson, Spencer และ Andreasen พบว่า

- เมื่อการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดมากขึ้น แรงเสียดทานในขณะที่แบรกเก็ตเริ่มเคลื่อนที่ไปตามลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และลวดไนตินอลจะมากขึ้น

- เมื่อไม่มีการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวด จะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างแรงที่ต้องใช้ในการทำให้แบรกเก็ตเริ่มเคลื่อนที่ไปตามลวดไนตินอลและลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

- ถ้าการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดสูงขึ้นจาก 5 องศาถึง 10 องศาแล้ว ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมต้องการแรงที่จะเอาชนะแรงเสียดทานมากกว่าลวดไนตินอล และเมื่อการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดสูงถึง 15 องศา ลวดไนตินอลขนาด 0.019x0.025นิ้ว ต้องการแรงที่จะเอาชนะความเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเดียวกันถึงร้อยละ 61

8. <u>ภาวะเปียกและแห้ง</u> (Wet and dry condition)

Thurow (26) เคยเสนอแนะปัจจัย 2 ตัว ที่อาจจะช่วยลดแรงที่จำเป็นต้องใช้ในการเคลื่อนฟันลง ปัจจัยทั้งสองคือ น้ำลายและการทำงานของฟันระหว่างการบดเคี้ยว Thurow เชื่อว่าน้ำลายเป็นสารหล่อลื่นที่ดีมาก ส่วนการทำงานของฟันระหว่างการบดเคี้ยว จะทำให้เกิดสิ่งซึ่ง Thurow เรียกว่า ผลวอล์คกิง (Walking effect) แบรกเก็ตจึงเคลื่อนไปตามลวดได้ง่ายขึ้น

Baker, Neilberg, Wiemer และ Hanna (25) ได้ศึกษาทดลองเพื่อประเมินความเสียดทานในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปจากภาวะแวดล้อม 3 ประการคือ ภาวะแห้ง, ภาวะเปียกด้วยน้ำลายเทียม (Xero-Lube$^{(TM)}$) และภาวะเปียกด้วยกลีเซอรีน พบว่าน้ำลายเทียมเป็นสารหล่อลื่นที่ดีสามารถลดแรงเสียดทานลงได้ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 19

แต่สำหรับกลีเซอรีน ยูเอสพี (USP glycerin) เมื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ปรากฏว่าไม่มีประสิทธิภาพในการลดแรงเสียดทานเลย เหตุที่กลีเซอรีนไม่ได้ช่วยลดความเสียดทานเลย เป็นเพราะความหนืดของกลีเซอรีน กลีเซอรีนมีความหนืดมากกว่าน้ำลายเทียมถึง 23 เท่า กลีเซอรีนจึงไม่เหมาะในการใช้เป็นสารหล่อลื่น

Stannard, Gau และ Hanna (28) ได้ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดบีตา-ติตาเนียม ลวดนิเกิล-ติตาเนียม และลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ขนาด 0.017x0.025 นิ้ว ที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ (Smooth stainless steel grip) และที่จับเตตรา-ฟลูออโรเอธีลีน (Tetra-fluoroethylene grip) ซึ่งมีชื่อการค้าว่า เทฟลอน (Teflon$^{(TM)}$) การวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ดังกล่าว ทำการทดลองทั้งภาวะแห้งและภาวะเปียกด้วยน้ำลายเทียม โดยให้ลวดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 เซ็นติเมตรต่อนาที

พบว่าแรงเสียดทานจลน์ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์สูงขึ้นตามขนาดของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่มากขึ้นไม่ว่าจะเป็นลวดชนิดใดก็ตาม ในภาวะแห้งนั้น ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไถลผ่านเทฟลอนมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยมาก ลวดบีตา-ติตาเนียมที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อย ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยจนถึงปานกลาง ลวดนิเกิล-ติตาเนียมที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานปานกลาง สำหรับลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง

ในภาวะเปียกด้วยน้ำลายเทียมก็ให้ผลคล้าย ๆ กัน โดยพบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไถลผ่านเทฟลอนมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยลวดบีตา-ติตาเนียมและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ ส่วนลวดนิเกิล-ติตาเนียมและลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลที่ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างสูง ในการทดลองในภาวะเปียกด้วยน้ำลายเทียมนี้ ตัวน้ำลายเทียมเองจะเพิ่มความเสียดทานให้กับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดบีตา-ติตาเนียมและลวดนิเกิล-ติตาเนียมเมื่อไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ แต่น้ำลายเทียมไม่ได้เพิ่มความเสียดทานในกรณีที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมไถลผ่านเทฟลอนและในกรณีที่ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ไถลผ่านที่จับเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเรียบ

ตามปกติ ของเหลวจะช่วยลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสลง แต่ในการศึกษานี้ปรากฏว่า น้ำลายเทียมทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดบีตา-ติตาเนียม และลวดนิเกิล-ติตาเนียมเพิ่มขึ้น แต่ไม่เปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล หรือเทฟลอนเลย ทั้งนี้ Stannard, Gau และ Hanna (27) คิดว่าเป็นไปตามทฤษฎีการยึดติดของความเสียดทาน (Adhesion Theory of friction) ของ Robinowics ที่อธิบายว่าน้ำและของเหลวที่มีประจุไฟฟ้า (Polar liquid) ทำให้เกิดการยึดติดหรือมีการดึงดูดกันระหว่างชนิดไอออน (Ionic species) การยึดเกาะของผิวสัมผัสที่ไม่ราบเรียบจึงเกิดในน้ำลายได้ง่าย ดังนั้นแรงที่จำเป็นต้องใช้ในการทำลายแรงดึงดูดดังกล่าวจึงสูง ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้ สามารถพบได้ในวัสดุทางทันตกรรมชนิดอื่น ๆ ด้วย (29)

ในการศึกษาของ Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) ที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตเซรามิกและแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าน้ำลายเทียมเป็นตัวเพิ่มความเสียดทานสถิตเมื่อเทียบกับอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การศึกษาของ Pratten และคณะ (27) ให้ผลต่างไปจากการศึกษาของ Baker, Neilberg, Weimer และ Hanna (25) ที่เป็นเช่นนี้ Pratten และคณะคิดว่ามีสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นระหว่างแบรกเก็ตและลวด ในกรณีที่มีแรงเกิดขึ้นระหว่างแบรกเก็ตกับลวดน้อย น้ำลายจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น แต่ถ้ามีแรงเกิดขึ้นระหว่างแบรกเก็ตกับลวดสูง น้ำลายจะถูกดันออกจากจุดสัมผัสระหว่างแบรกเก็ตและลวด จึงมีผลทำให้เกิดความต้านทานแบบเฉือน (Shear resistance) ขึ้น

9. <u>ความขรุขระของพื้นผิวลวด</u> (Roughness of the archwire surface)

การศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Garner, Allai และ Moore (6) พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีผิวขรุขระน้อยกว่าลวดไนตินอลและลวดบีตา-ติตาเนียม Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) ก็พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีผิวขรุขระน้อยกว่าลวดไนตินอล นอกจากนี้ Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ก็พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดเอลจิลอยมีสภาพผิวใกล้เคียงกัน และมีความขรุขระน้อยกว่าลวดไนตินอลกับลวดบีตา-ติตามเนียมด้วย

Kusy, Whitley, Mayhew และ Buckthal (7) ได้ใช้เลเซอร์

สเปกโทรสโกปี แบบสเปกคูลาร์ รีเฟลกแทนซ์ (Specular reflectance) เพื่อศึกษาลักษณะผิวของลวด 4 ประเภทที่นิยมใช้กันคือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ชื่อการค้า ไฮ-ที, ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ชื่อการค้า เอลจิลอยสีฟ้าและเอลจิลอยสีเหลือง, ลวดบีตา-ติตาเนียม ชื่อการค้า ทีเอ็มเอ (TMA(TM)) และลวดนิเกิล-ติตาเนียม ชื่อการค้า ติตาแนล (Titanal(TM)) และลวดไนตินอล พบว่า ลวดไฮ-ที มีผิวราบเรียบที่สุด ตามด้วยลวดเอลจิลอยสีฟ้า ลวดเอลจิลอยสีเหลือง ลวดทีเอ็มเอ ลวดติตาแนลและลวดไนตินอล ตามลำดับ สำหรับลวดนิเกิล-ติตาเนียม 2 ชนิดที่มีสภาพผิวต่างกันนั้น Kusy และคณะสรุปว่าเกิดจากกรรมวิธีในการขัดซึ่งบริษัทแลนเซอร์แปซิฟิก (Lancer Pacific) ผู้ผลิตลวดติตาแนลอ้างว่าลวดติตาแนลได้ผ่านการขัดมาเป็นอย่างดี สามารถลดแรงเสียดทานลงได้ถึงร้อยละ 50

Kusy และ Whitley (30) วัดความขรุขระของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน 4 ชนิดคือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ลวดนิเกิล-ติตาเนียม และลวดบีตา-ติตาเนียม แล้ววัดความขรุขระของแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีสเปกคูลาร์รีเฟลกแทนซ์ พบว่าค่าออพติคัล อาร์เอ็มเอส (Optical RMS value) เท่ากับ 0.04,0.012, 0.22,0.14 และ 0.15 μm ตามลำดับ จากนั้น Kusy และ Whitley ได้นำลวดทั้ง 4 ชนิดแบ่งเป็น 3 กลุ่ม จำนวนเท่า ๆ กันนำไปขัดตามวิธีโลหศาสตร์มาตรฐาน (Standard metallographic procedure) ให้แต่ละกลุ่มมีค่าอาร์เอ็มเอส 0.22,0.14 และ 0.030 μm แล้วจึงนำลวดทั้งสามกลุ่มไปทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ พบว่าการขัดให้ผิวของลวดขรุขระน้อยลง ไม่ได้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ต่ำลงไปด้วย พวกเขาคิดว่าน่าจะมีปัจจัยอื่นที่มีบทบาทสำคัญ เช่น สัมพรรคภาพทางเคมี (Chemical affinity) ความเร็วในการไถล (Sliding velocity) ตลอดจนน้ำลายที่อาจมีอิทธิพลต่อความเสียดทาน

10. <u>การกัดกร่อนของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน</u> (Corrosion of the archwire)

Riley, Garrett และ Moon (4) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดลวด วัสดุที่ใช้ทำแบรกเก็ต ชนิดของการมัด และเวลาในการมัดที่มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทาน พบว่าการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันในน้ำกลั่น แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากมีการกัดกร่อนเกิดขึ้น

Sarkar, Redmond, Schwaninger และ Goldberg (31)ได้ทำการทดสอบการกัดกร่อนของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน 4 ชนิดคือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชื่อ เพอร์มาโครม (Permachrome$^{(TM)}$) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลชื่อเอลจิลอย ของบริษัทรอกกี เมาเทน ออร์โธดอนติกส์ ลวดบีตา-ติตาเนียมของบริษัทออร์มโก คอร์ปอเรชัน และลวดไนตินอลของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน การทดสอบดังกล่าวทำในสารละลายเกลือแกง 1 เปอร์เซ็นต์ (1% Sodium Chloride) แล้วทำอิเล็กโตรเคมิคัล ไซคลิก โพลาไรเซชัน (Electrochemical cyclic polarization) ที่ความต่างศักย์ -500 ถึง +300 mV จากการทดสอบพบว่าลวดเพอร์มาโครม ลวดเอลจิลอย และลวดบีตา-ติตาเนียมไม่มีการกัดกร่อน ส่วนลวดไนตินอลแสดงการกัดกร่อนที่ความต่างศักย์ +150 mV ซึ่งเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจดู จะพบว่าลวดไนตินอลมีการกัดกร่อนเป็นหลุม (Pitty type corrosion)

Sarkar และ Schwaninger (32) ได้ศึกษาลักษณะการกัดกร่อนของลวดไนตินอลภายหลังจากใช้งานในคลินิกแล้ว 3 อาทิตย์ถึง 5 เดือน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray analysis) พบว่าลวดไนตินอลดังกล่าวมีการกัดกร่อนเป็นหลุมกลม ๆ มากมาย และยังพบผลผลิตของการกัดกร่อน (Corrosion product) บนลวดไนตินอลแต่ละเส้นด้วย ซึ่งเมื่อทำการพิสูจน์แล้วจะพบว่า ผลผลิตของการกัดกร่อนนั้นเต็มไปด้วยติตาเนียม อาจจะเป็นออกไซด์ผสมของติตาเนียมและนิเกิลก็ได้ สำหรับลวดไนตินอลที่หักนั้น จะพบว่าพื้นผิวตรงบริเวณที่หักจะมีลักษณะเป็นหลุมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน (Equiaxed dimple) ซึ่งดูเหมือนว่าเป็นผลมาจากช่องว่างเล็ก ๆ (Microvoid) ที่รวมกันภายในบริเวณขอบเกรน (Grain-boundary Zone)

Clinard, von Fraunhofer และ Kuftinec (33) ได้ศึกษาการกัดกร่อนของลวด 4 ชนิดคือลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ลวดบีตา-ติตาเนียม และลวดไนตินอล โดยวิธีวัดความต้านทานการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarisation resistance) และซีโร รีซิสแตนส์ แอมเมตรีย์ (Zero resistance ammetry) พบว่าลวดบีตา-ติตาเนียม และลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล มีความต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนลวดไนตินอลมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าลวดเหล็กกล้าไร้

สนิมและแสดงแนวโน้มที่จะเกิดหลุมบนผิวลวดได้ง่าย

Schwaninger, Sarkar และ Foster (34) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property) ของลวดไนตินอลทั้งก่อนและหลังการแช่ในสารละลายเกลือแกง 1 เปอร์เซ็นต์นานถึง 11 เดือน พบว่าลวดไนตินอลมีการกัดกร่อนให้เห็น แต่คุณสมบัติทางกายภาพของลวดไม่แตกต่างกัน แสดงว่าการกัดกร่อนไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของลวดไนตินอลและเมื่อตรวจดูพื้นผิวบริเวณที่หักหลังการดัด 90 องศาหลาย ๆ ครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวที่หักมีลักษณะไม่ต่างกัน โดยพื้นผิวที่หักดังกล่าวจะเริ่มเกิดจากบริเวณที่มีความบกพร่อง (Defect) บนพื้นผิวก่อน พวกเขาสันนิษฐานว่าบริเวณที่มีความบกพร่องบนพื้นผิวลวดไนตินอลเกิดจากกรรมวิธีการผลิตไม่ได้เป็นผลมาจากการกัดกร่อน

Edie, Andreasen และ Zaytoun (35) ได้ทำการศึกษาการกัดกร่อนของพื้นผิวลวดไนตินอลและลวดเหล็กกล้าไร้สนิมภายหลังการใช้งานในคลินิกแล้วเป็นเวลา 1-8 เดือน พวกเขาพบว่าโดยทั่วไปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีผิวราบเรียบกว่าลวดไนตินอล ลวดไนตินอลมีพื้นผิวเป็นลูกคลื่น (Undulating appearance) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของลวดไนตินอลทั้งก่อนและหลังการใช้งานในคลินิก ไม่พบความแตกต่างกันเลย เมื่อทำการวัดปริมาณออกซิเจนที่พื้นผิวลวดแล้วก็พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างลวดทั้งสองชนิด แสดงว่าไม่มีเหตุผลใดน่าเชื่อว่าลวดไนตินอลเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อมีการใช้งานในคลินิกจริง ๆ

Mayhew และ Kusy (36) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical property) และลักษณะพื้นผิวของลวดไนตินอลและลวดติตาแนลทั้งก่อนและหลังการทำให้ปราศจากเชื้อ(Sterilization) 3 วิธีซึ่งผ่านการยอมรับจากสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน (American Dental Association) คือความร้อนแห้ง (Dry heat) ไอฟอร์มัลดีไฮด์-แอลกอฮอล์ (Formaldehyde-alcohol vapor) และเครื่องนึ่งอัดไอน้ำ (Steam autoclave) Mayhew และ Kusy พบว่าการทำให้ปราศจากเชื้อไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะพื้นผิวในลวดไนตินอลและลวดติตาแนล เมื่อทำเลเซอร์ สเปกโทรสโกปีเปรียบเทียบกันระหว่างลวดไนตินอลกับลวดติตาแนล พบว่าลวดไนตินอลมีสเปกคูลาร์ รีเฟลกทิวิตีย์ (Specular reflectivity) 1-4.6 μW ส่วนลวดติตาแนลมีสเปกคูลาร์ รีเปลกทิวิตีย์ 7.0-16.6 μW แสดงว่าลวดติตาแนลมีผิวราบเรียบกว่าลวดไนตินอล และถ้าทำการวัดความแข็งแรง (Strength)

ระหว่างลวดไนตินอลและลวดติตาแนลแล้ว ลวดไนตินอลมีความแข็งแรงสูงกว่าประมาณร้อยละ 10

Buckthal และ Kusy (37) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะพื้นผิวของลวดไนตินอลและลวดติตาแนล ทั้งก่อนและหลังการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อ (Disinfectant) 3 ชนิด ซึ่งผ่านการยอมรับจากสมาคมทันตแพทย์อเมริกันแล้วคือ 2 เปอร์เซ็นต์กรดกลูทารัลดีไฮด์ (2% Acid glutaraldehyde) คลอรีน ไดออกไซด์ (Chlorine dioxide) และไอโอโดฟอร์ (Iodophor) Buckthal และ Kusy พบว่าน้ำยาฆ่าเชื้อทั้ง 3 ชนิดไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะพื้นผิวในลวดไนตินอลและลวดติตาแนล เมื่อทำเลเซอร์สเปกโทรสโกปีแล้ว ลวดติตาแนลมีสเปกตูลาร์ รีเฟลกทิวิตีย์มากกว่าลวดไนตินอลประมาณ 5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลระหว่างลวดไนตินอลกับลวดติตาแนล พบว่าลวดไนตินอลมีความแข็งแรงและความแข็งติงสูงกว่าลวดติตาแนล

11. <u>การเคลือบผิวลวด</u>

Greenberg และ Kusy (38) ได้ศึกษาหาสารเคลือบผิว (Coating) ลวดทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อลดความเสียดทานและปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอ (Wear property) โดยใช้เมทัล-โพลีเมอร์ คอมโพสิท โคทติง (Metal-polymer composite coating) เคลือบบนลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และใช้พีทีเอฟอี เบสด์ โคทติง (PTFE based coating) เคลือบบนลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลให้มีความหนาเท่า ๆ กันตลอด จากนั้นนำลวดที่ผ่านการเคลือบผิวแล้วไปทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยเมทัล-โพลีเมอร์ คอมโพสิท โคทติงเท่ากับ 0.073 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลที่เคลือบด้วยพีทีเอฟอี เบสด์ โคทติงเท่ากับ 0.028 เมื่อเทียบกับลวดทั้งสองชนิดที่ไม่ได้เคลือบผิวซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.162 ซึ่ง Greenberg และ Kusy (38) ให้ความเห็นว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมอีก

Kusy, Andrews และ Norling (39) ได้ทำการศึกษาเพื่อดูว่าการฉาบด้วยโลหะ (Sputter Coating) และการฝังไอออน (Ion Implantation) สามารถลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลงได้หรือไม่ โดยให้ลวดเหลี่ยมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว 4 ชนิดคือ

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โคเมียม-นิเกิล ลวดนิเกิล-ติตาเนียม ลวดบีตา-ติตาเนียม เคลื่อนที่ผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 5 ประเภทคือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมธรรมดา แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการฝังไอออนไนโตรเจน ($2x10^{17}$ cm^{-2} N^+ implanted stainless steel flat) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ฉาบด้วย Al_2O_3 +Ti C แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมฉาบด้วย Al_2O_3 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมฉาบด้วย Ti B_2 ตามลำดับ

ผลจากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิล ลวดนิเกิล-ติตาเนียม ลวดบีตา-ติตาเนียมที่เคลื่อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมธรรมดาเท่ากับ 0.16, 0.14, 0.24 และ 0.32 ตามลำดับ ในกรณีลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลื่อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการฝังไอออนไนโตรเจน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ลดลงเหลือ 0.12 กรณีลวดบีตา-ติตาเนียมเคลื่อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ฉาบด้วย Al_2O_3 +Ti C สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ลดลงเหลือ 0.18 แต่ไม่พบว่าการฝังไอออนไนโตรเจนและการฉาบผิวโลหะด้วย Al_2O_3 +Ti C Al_2O_3 หรือ Ti B_2 ช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลและลวดนิเกิล-ติตาเนียมลงได้เลย

Kusy, Andrews และ Norling (39) ให้ความเห็นหลังจากสรุปผลการทดลองว่า วัสดุที่ต้านทานการสึกหรอไม่จำเป็นต้องช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ลง ในการศึกษานี้พบว่าการฝังไอออนไนโตรเจน มีประโยชน์ดี

12. ความเร็วในการเคลื่อนที่

Kusy และ Whitley (40) ศึกษาผลของความเร็วในการไถล (Sliding velocity) ของลวดที่อาจมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยใช้ลวดเหล็ก 4 ชนิด คือ ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว ชื่อการค้าสแตนดาร์ด เรกแทงกูลาร์ (Standard Rectangular(TM)) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลขนาด 0.018x0.025 นิ้ว ชื่อเอลจิลอยสีเหลือง (Yellow Elgiloy(TM)) ของบริษัทรอกกี เมาเทน ออร์โธดอนติกส์ ลวดนิเกิล-ติตาเนียมขนาด 0.018x0.025 นิ้ว ชื่อไนตินอล เอสอี (Nitinol S.E.(TM)) ของบริษัทยูนิเทค คอร์ปอเรชัน และลวด

บีตา-ติตาเนียมขนาด 0.017x0.025 นิ้วชื่อทีเอมเอ (TMA$^{(TM)}$) ของบริษัทออร์มโก คอร์ปอเรชัน ดึงลวดเหลี่ยม 2 ชนิดแรกไถลผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการขัดตามวิธีโลหศาสตร์มาตรฐานด้วยกระดาษซิลิคอน คาร์ไบด์เปียก (Wet silicon carbide) จนมีความเรียบถึงหมายเลข 400 (400 grit) แล้วทำการดึงลวดเหลี่ยม 2 ชนิดหลังผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกันที่ผ่านการขัดตามวิธีโลหะศาสตร์มาตรฐานด้วยกระดาษซิลิคอน คาร์ไบด์เปียก จนมีความเรียบถึงหมายเลข 600 (600 grit) ซึ่งแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการขัดจนมีความเรียบถึงหมายเลข 400 และ 600 นั้นจะมีความเรียบมากกว่าแบรกเก็ตทั่ว ๆ ไป

ดึงลวดเหลี่ยมทั้ง 4 ชนิดผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยความเร็ว 10, 0.1, $5x10^{-2}$, $5x10^{-3}$ และ $5x10^{-4}$ มิลลิเมตรต่อนาทีตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลงนั้น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดนิเกิล-ติตาเนียมจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ของลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและสัมประสิทธิ์ความสียดทานจลน์ของลวดบีตา-ติตาเนียมกลับมีค่าลดลง และเมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์แล้วจะพบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไถลผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุด ในขณะที่ลวดบีตา-ติตาเนียมที่ไถลผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุดและมีความไม่แน่นอนสูงสุดด้วย

<u>การลดความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น</u>

Thurow (26) แนะนำว่า แรงที่มีปริมาณมากกว่าแรงเสียดทานสถิต ทำให้เกิดการไถลตัวของลวดผ่านร่องแบรกเก็ตได้ แต่แรงที่มีปริมาณมาก ๆ ก็ไม่ได้ช่วยให้ฟันเคลื่อนที่มากไปด้วย แรงที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมหลักยึดได้ Thurow (18) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า การเพิ่มแรงในการเคลื่อนฟันไม่ได้ช่วยลดความเสียดทานลงเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นปฏิภาคกับแรงระหว่างผิวสัมผัส การเพิ่มแรงในการเคลื่อนฟันจึงทำให้ความเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย

การหลีกเลี่ยงหรือลดความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นให้น้อยลงนั้น Proffit และ Fields (13) Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) แนะนำให้ดัดสปริง ลูป

(Spring loop) เข้าไปในลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อให้ส่วนของลวดเคลื่อนที่พาฟันไปด้วย แทนที่จะใช้วิธีทำให้ฟันเคลื่อนไถลไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน สปริง ลูปดังกล่าวอาจเป็น รีแทรคชัน สปริง (Retraction spring) หรือโคลสชิง ลูป (Closing loop) ก็ได้ นอกจากนี้ Frank และ Nikolai (2) Proffit และ Fields (13) Thurow (18) เสนอให้ใช้ลวดที่มีขนาดเล็กกว่าร่องแบรกเก็ตในกรณีที่ต้องการลดความเสียดทานลง

Frank และ Nikolai (2) ยังให้ข้อคิดเห็นต่อไปอีกว่า ในกรณีที่ไม่มีการยึดเหนี่ยวออร์เดอร์ที่สอง เราสามารถที่จะทำการเคลื่อนฟันได้ง่ายมากโดยการทำให้มีแรงจากการมัดและให้มีพื้นที่สัมผัสระหว่างแบรกเก็ตกับลวดน้อยที่สุด ซึ่งควรพิจารณาใช้แบรกเก็ตแบบเบกก์และเอดจ์ล็อคร่วมกับลวดกลมขนาดเล็ก ๆ เพราะเกิดความเสียดทานน้อยมาก ส่วนในกรณีที่มีการยึดเหนี่ยวออร์เดอร์ที่สองระหว่างการดึงฟันเขี้ยวไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน เราสามารถลดความเสียดทานให้น้อยลงได้ด้วยการ

- เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างลวดกับร่องแบรกเก็ต
- เพิ่มความแข็งตึงของลวดในการโก่งงอให้มากที่สุด (Maximizing wire bending stiffness)
- ลดความกว้างของแบรกเก็ตลงให้เหลือน้อยที่สุด (Minimizing bracket width)

สำหรับการดึงฟันเขี้ยวด้วยวิธีเอดจ์ไวส์ Frank และ Nikolai (2) แนะนำให้ใช้ลวดเหลี่ยมขนาดใหญ่ร่วมกับแบรกเก็ตแคบ ๆ

Garner, Allai และ Moore (6) แนะนำเอาไว้ว่าระหว่างการดึงฟันเขี้ยว ถ้าต้องการลวดที่มีความแข็งตึงสูง ควรใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมากกว่าลวดไนตินอล หรือลวดบีตา-ติตาเนียม ในกรณีที่มีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมหลักยึด ควรพิจารณาในการใช้ลวดไนตินอลและลวดบีตา-ติตาเนียมให้ดีเนื่องจากมีความต้านทานในการเคลื่อนที่มากกว่า

Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) แนะนำให้ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงแรงเสียดทานที่เกิดในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นบริเวณต่าง ๆ เพื่อป้องกันหรือส่งเสริมการเคลื่อนที่ของหลักยึดไปทางด้านใกล้กลาง ในกรณีที่ต้องการการควบคุมหลักยึดดี ๆ ควรทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตกับลวดที่ฟันเขี้ยวน้อย ๆ และทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตกับลวดที่ฟันหลังมาก ๆ ความเสียดทานที่ฟันหลังจะทำหน้าที่ต้านการเคลื่อนที่ของฟันหลังไปทางด้านใกล้กลาง เช่น อาจใช้ลวดเหลี่ยมไนตินอลขนาด 0.016x0.016

นิ้วร่วมกับแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้วแบบมีเดียม ทวินที่ฟันเขี้ยว และใช้แบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้วแบบไวด์ทวินที่ฟันกรามและฟันกรามน้อย ซึ่งในกรณีนี้ความเสียดทานที่ฟันหลังจะมากกว่าความเสียดทานที่ฟันเขี้ยวประมาณ 2 เท่า สำหรับกรณีที่ต้องการการควบคุมหลักยึดน้อย ๆ ก็ควรทำให้ความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตและลวดที่ฟันเขี้ยวมีมากกว่าฟันหลัง เช่นอาจจะใช้ลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลขนาด 0.019x0.025 นิ้วร่วมกับแบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้วแบบมีเดียม ทวินที่ฟันเขี้ยวและใช้แบรกเก็ตขนาดร่อง 0.022 นิ้วแบบไวด์ ทวินที่ฟันหลัง เป็นต้น

Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) แนะนำว่าควรพิจารณาเลือกใช้แบรกเก็ตชนิดต่าง ๆ ให้ดี การใช้แบรกเก็ตเซรามิกจำเป็นต้องใช้แรงในการเคลื่อนฟันมากขึ้น มิฉะนั้นก็ต้องพยายามลดแรงจากการมัดลวดให้น้อยลง

Tidy (19) แนะนำให้ลดความเสียดทานลงโดยการใช้แบรกเก็ตที่มีขนาดกว้างและเลือกใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแทนที่จะใช้ลวดไนตินอลหรือลวดบีตา-ติตาเนียม Tidy ให้ความเห็นเพิ่มเติมว่าลวดกลมให้ความเสียดทานน้อยกว่าลวดเหลี่ยมในกรณีที่แบรกเก็ตอยู่นอกแนวการเรียงตัวของฟันเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะลวดกลมไม่มีทอร์กซึ่งมีฤทธิ์เหมือนลวดเหลี่ยม ถ้าแบรกเก็ตอยู่นอกแนวการเรียงตัวของฟัน การใช้ลวดเหลี่ยมจะเกิดทอร์กซึ่งมีฤทธิ์ทำให้เกิดความเสียดทานมาก แต่ถ้าแบรกเก็ตมีการเรียงตัวที่ดีแล้ว ลวดกลมหรือลวดเหลี่ยมให้ความเสียดทานต่างกันน้อยมาก ในทางคลินิกจึงไม่จำเป็นต้องใช้ลวดกลมหรือทำให้ลวดเหลี่ยมในส่วนข้างแก้ม (Buccal segment) มีลักษณะกลมมนเพื่อลดความเสียดทาน แต่ควรจะใช้ลวดเหลี่ยมแล้วปล่อยให้ฟันมีการปรับตัวหลาย ๆ เดือนก่อนที่จะเริ่มดึงฟันให้เคลื่อนที่

ในกรณีที่ทำการเคลื่อนฟันไปตามลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันโดยใช้แบรกเก็ตขนาดร่อง 0.018 นิ้วนั้น Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) แนะนำให้ใช้แบรกเก็ตกว้าง (4.2 มิลลิเมตร) หรือแบรกเก็ตขนาดกลาง (3.3 มิลลิเมตร) หลีกเลี่ยงการใช้ลวดที่มีผิวขรุขระเช่น ลวดไนตินอล ลวดบีตา-ติตาเนียม เลือกใช้ลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.022 นิ้ว เนื่องจากลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.022 นิ้วให้แรงเสียดทานเท่า ๆ กับลวดกลมขนาด 0.016 นิ้วแต่ควบคุมการเคลื่อนฟันได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังต้องพยายามเสริมหรือเพิ่มเติมหลักยึดให้เหมาะสมมากขึ้นด้วย

บทสรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น

จากบทความเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นที่ได้รวบรวมมานั้น พอจะสรุปได้ดังนี้

1. ความกว้างของแบรกเก็ต

ความกว้างของแบรกเก็ตที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่นอนได้ Kamiyama และ Sasaki (2) ตลอดจนการศึกษาของ Tidy (5,19) พบว่าแรงเสียดทานเป็นปฏิภาคผกผันกับความกว้างของแบรกเก็ต แต่ Frank และ Nikolai (2) Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) Freeney, Morton และ Burstone (24) กลับพบว่าแรงเสียดทานจะเพิ่มตามขนาดความกว้างของแบรกเก็ต ในขณะที่ Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) พบว่าแบรกเก็ตแคบให้แรงเสียดทานสูงแต่แบรกเก็ตขนาดกลางและแบรกเก็ตกว้างให้แรงเสียดทานน้อยเท่า ๆ กัน ส่วน Peterson, Spencer และ Andreasen (1) Andreasen และ Quevedo (2) Garner, Allai และ Moore (6) นั้นพบว่าความกว้างของแบรกเก็ตไม่มีความเกี่ยวข้องกับความเสียดทานเลย

2. ขนาดของร่องแบรกเก็ตและความอิสระในการเคลื่อนที่ของลวด

มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับขนาดร่องแบรกเก็ตอย่างจริงจังเพียงผู้เดียวคือ Tidy (19) ซึ่งพบว่าขนาดร่องแบรกเก็ตมีผลต่อความเสียดทานน้อยมาก

3. ขนาดของลวด

ขนาดของลวดที่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น ผลของการศึกษาส่วนใหญ่สอดคล้องกัน Frank และ Nikolai (2) Echols (3) Riley, Garrett และ Moon (4) Tidy (5) Baker, Neilberg, Weimer และ Hanna (25) Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) พบเหมือน ๆ กันว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นและลวดเหลี่ยมจะให้แรงเสียดทานสูงกว่าลวดกลม Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ก็พบเช่นกันว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะเกิดความเสียดทานมากขึ้น แต่มีข้อยกเว้นสำหรับลวดกลมขนาด 0.016 นิ้วและลวดเหลี่ยมขนาด 0.016x0.022 นิ้วซึ่งให้แรงเสียดทานน้อยเท่า ๆ กัน

จากการศึกษาใหม่ล่าสุดของ Tidy (19) พบว่าขนาดของลวดไม่มีอิทธิพลต่อความเสียดทานเลยถ้าแบรกเก็ตและลวดอยู่ในแนวที่ดี นอกจากนี้ Peterson, Spencer และ Andreasen (1) พบว่าขนาดของลวดไนตินอลไม่มีความสัมพันธ์กับความเสียดทานในลวดไนตินอลเลย ลวดไนตินอลขนาดใหญ่อาจมีแรงเสียดทานน้อยกว่าลวดไนตินอลขนาดเล็กก็ได้

4. แรงจากการมัดลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟันเข้ากับร่องแบรกเก็ต

Riley, Garrett และ Moon (4) ได้เคยทำการศึกษาไว้แล้วพบว่าลวดมัดแบรกเก็ตให้ความเสียดทานสูงกว่ายางมัดแบรกเก็ต

5. วัสดุที่ใช้ทำลวด

อิทธิพลของวัสดุที่ใช้ทำลวดต่อความเสียดทานในเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่นนั้น ผลการทดลองสอดคล้องกันแทบทุกคน กล่าวคือ Garner, Allai และ Moore (6) Kapilla, Angolkar, Duncanson Jr. และ Nanda (20) Pratten, Popli,Germane และ Gunsolley (27) พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมให้แรงเสียดทานน้อยกว่าลวดนิเกิล-ติตาเนียม และลวดบีตา-ติตาเนียม ตามลำดับ Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) ก็พบคล้าย ๆ กันว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมให้แรงเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยลวดเอลจิลอย ลวดไนตินอลและลวดบีตา-ติตาเนียม แต่ Peterson, Spencer และ Andreasen (1) กลับพบว่าลวดไนตินอลให้แรงเสียดทานน้อยกว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

6. วัสดุที่ใช้ทำแบรกเก็ต

Riley, Garrett และ Moon (4) พบว่าแบรกเก็ตพลาสติกให้ความเสียดทานสูงกว่าแบรกเก็ตเหล็กกล้าไร้สนิม Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) พบว่าแบรกเก็ตเซรามิกมีความเสียดทานสูงกว่าแบรกเก้ตเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ยังไม่เคยมีผู้ศึกษาเปรียบเทียบความเสียดทานระหว่างแบรกเก็ตพลาสติกและแบรกเก็ตเซรามิกเลย อาจเป็นเพราะว่าแบรกเก็ตพลาสติกไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อเสียบางประการเลยไม่มีผู้ศึกษาในเรื่องนี้

7. การทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดโค้งทางทันตกรรมจัดฟัน

Peterson, Spencer และ Andreasen (1) ตลอดจน Frank และ Nikolai (2) ได้ทำการศึกษาเอาไว้พบว่า เมื่อการทำมุมระหว่างแบรกเก็ตกับลวดมีมากขึ้นจะทำให้เกิดความเสียดทานมากขึ้น

8. ภาวะเปียกและแห้ง

Baker, Neilberg, Weimer และ Hanna (25) พบว่าน้ำลายเทียมเป็นสารหล่อลื่นที่ดีสามารถลดความเสียดทานลงได้ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 19 แต่กลีเซอรีนไม่มีประสิทธิภาพในการลดความเสียทานเลย ส่วน Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) ตลอดจน Stannard, Gau และ Hanna (28) กลับพบว่าน้ำลายเทียมเป็นตัวเพิ่มความเสียดทานเมื่อเทียบกับอากาศ

9. ความขรุขระของพื้นผิวลวด

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Garner, Allai และ Moore (6) Pratten, Popli, Germane และ Gunsolley (27) Drescher, Bourauel และ Schumacher (21) พบคล้าย ๆ กันว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีผิวขรุขระน้อยกว่าลวดไนตินอลและลวดบีตา-ติตาเนียมตามลำดับ

Kusy, Whitley, Mayhew และ Buckthal (7) ได้ใช้เลเซอร์สเปกโทรสโกปีแบบสเปกตูลาร์ รีเฟลกแทนซ์ตรวจดูลักษณะพื้นผิวของลวด พบว่าลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมีผิวราบเรียบที่สุด ตามด้วยลวดเอลจิลอยสีฟ้า ลวดเอลจิลอยสีเหลือง ลวดบีตา-ติตาเนียม ลวดติตาแนลและลวดไนตินอลตามลำดับ นอกจากนี้ Kusy และ Whitley (30) ยังพบอีกว่าการขัดผิวของลวดให้มีความขรุขระน้อยลงไม่ได้ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ต่ำลงไปด้วยเลย

10. การกัดกร่อนของลวดทางทันตกรรมจัดฟัน

Sarkar, Redmond, Schwaninger และ Goldberg (31) Clinard, von Fraunhofer และ Kuftinec (33) ได้ศึกษาการกัดกร่อนของลวดทางทันตกรรมจัดฟันโดยวิธีโพลาไรเซชัน พบว่าลวดไนตินอลมีการกัดกร่อนเป็นหลุม ๆ แต่ลวดชนิดอื่นไม่พบการกัดกร่อน

Sarkar และ Schwaninger (32) ศึกษาการกัดกร่อนของลวดไนตินอลภายหลังการใช้งานในคลินิกแล้ว 3-5 เดือน ตลอดจนการศึกษาของ Schwaninger, Sarkar และ Foster (34) ซึ่งทำการแช่ลวดไนตินอลไว้ในสารละลายเกลือแกง 1 เปอร์เซ็นต์นาน 11 เดือน พวกเขาพบว่าลวดไนตินอลแสดงการกัดกร่อนให้เห็น แต่ Edie, Andreasen และ Zaytoun (35) ได้ทำการวัดปริมาณออกซิเจนที่พื้นผิวของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดไนตินอลภายหลังการใช้งานในคลินิกแล้ว 1-8 เดือน พบว่าลวดไนตินอลไม่ได้เกิดการกัดกร่อนง่ายกว่าลวดเหล็กกล้า

ไร้สนิม นอกจากนี้ Mayhew และ Kusy (36) Buckthal และ Kusy (37) ได้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของลวดไนตินอลและลวดติตาแนลหลังจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธีการทำให้ปราศจากเชื้อและการใช้น้ำยาเชื้อ ซึ่งก็พบว่าการฆ่าเชื้อโรคทั้ง 2 วิธีไม่ได้ทำให้พื้นผิวของลวดไนตินอลและลวดติตาแนลเปลี่ยนไป

11. การเคลือบผิวลวด

Greenberg และ Kusy (38) พบว่าเมทัล-โพลีเมอร์ คอมโพสิท โคทติง และ พีทีเอฟอี เบสด์ โคทติง ที่เคลือบบนลวดสามารถช่วยลดความเสียดทานลงได้ Kusy, Andrews และ Norling (39) พบว่าการฉาบด้วยโลหะ Al_2O_3 และการฝังไอออนไนโตรเจน ช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ลงได้

12. ความเร็วในการเคลื่อนที่

Kusy และ Whitley (40) ได้ศึกษาผลของความเร็วในการไถลของลวดที่อาจมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน พวกเขาพบว่าความเร็วที่ลดลงนั้นไม่มีผลต่อลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและลวดนิเกิล-ติตาเนียม แต่จะทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลวดโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิเกิลมีค่าเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลวดบีตา-ติตาเนียมมีค่าลดลง