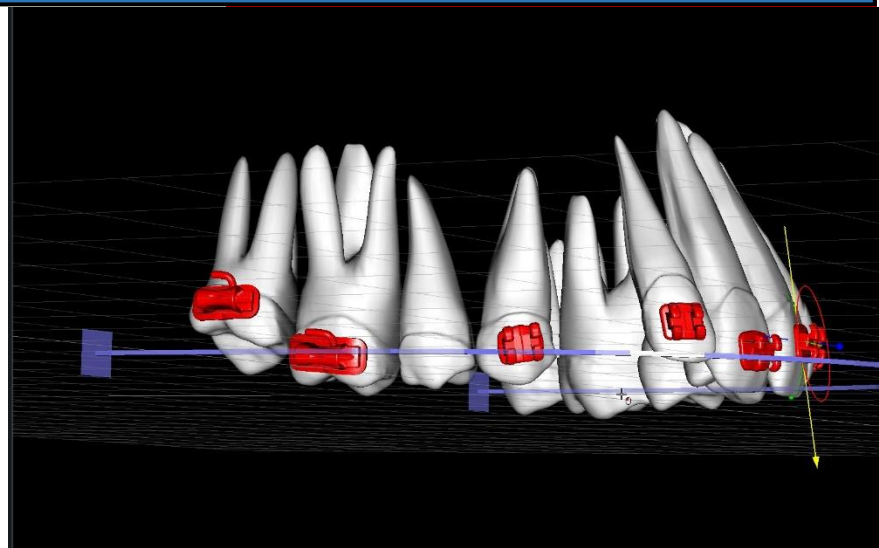


ФИЗИКА В ОРТОДОНТИИ



Доктор Жан-Марк Ретруви
Доктор Кэтрин Коузи



IFDE
INTERNATIONAL
FOUNDATION FOR DENTAL EDUCATION

Основы механики. Применение в ортодонтии

Д-р Жан-Марк Ретруви

Д-р Кэтрин Коузи

1. СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| 2 Введение | 2 |
| 3 Основы механики | 4 |
| 3.1 Три закона Ньютона Первый закон | 4 |
| 3.2 Второй закон | 4 |
| 3.3 Третий закон | 5 |
| 4 Понятие силы | 7 |
| 4.1 Простая сила | 7 |
| 4.1.1 Определение | 7 |
| 4.1.2 Точка приложения | 7 |
| 4.1.3 Линия действия с направлением и величиной | 8 |
| 4.1.4 Закон о допустимости применения силы | 8 |
| 4.1.5 Точка приложения силы | 9 |
| 4.1.6 Центр масс | 10 |
| 5 Центр сопротивления (CR) | 10 |
| 5.1 Изменчивость центра сопротивления по отношению к периодонтальной опоре | 12 |
| 5.1.1 Центр сопротивления для одного зуба | 13 |
| 5.1.2 Центр сопротивления для группы зубов | 15 |
| 5.1.3 Сочетание сил. Равнодействующая силы или чистая сила | 16 |
| 6 Центр вращения | 18 |
| 6.1.1 Диаграммы Свободного тела | 19 |
| 7 Перемещения Зубов | 22 |
| 7.1 Равномерное перемещения | 22 |
| 7.2 Вращение (чистое) | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 7.3 Опрокидывание | 23 |
| 7.3.1 Неконтролируемое опрокидывание: Когда на коронку прикладывается усилие, коронка движется в одном направлении, а корень - в другом. В этом случае центр вращения находится близко или апикально к центру сопротивления, поэтому кончики зубов находятся примерно на уровне Cges | 23 |
| 7.3.2 Контролируемое Опрокидывание: Центр вращения находится на вершине зуба. Это включает в себя момент и силу, а также кончики зубов вокруг CR | 24 |
| 7.3.3 Перемещение корня | 24 |
| 7.3.4 Интрузия / Экструзия | 25 |
| 8 Системы Сил | 26 |
| 8.1 Момент $M = F \times d$ | 27 |
| 8.2 Силовая пара | 27 |
| 8.3 Отношение момента к силе | 28 |
| 8.4 Движения при изменении Сил и систем | 30 |
| 8.5 Эквивалентные системы сил | 34 |
| 9 Опора | 37 |
| 9.1 Практическое применение | 39 |
| 9.1.1 Ретракция клыков | 39 |
| 9.1.2 Экструзия для увеличения высоты клинической коронки и постановки имплантатов | 40 |
| 10 Рекомендуемые источники литературы | 40 |

2. ВВЕДЕНИЕ

Ортодонтия построена на основных принципах физики, касающихся движущихся в пространстве тел. Несомненно, движения в ортодонтии усложняются, поскольку эти движущиеся тела находятся в полости рта и подвержены более сложным системам сил, чем может предсказать простая механика. Биомеханика является важной частью ортодонтии и изучает статическое равновесие и влияние сил на биологические системы. В этой работе будет предпринята попытка упростить биомеханику в ортодонтии и определить границы её клинического применения.

3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Существуют несколько основных физических концепций, которые заслуживают анализа, прежде чем углубляться в изучение биомеханики и особенностям её применения в практике врача-ортодонта.

В ортодонтии мы используем три закона Ньютона для объяснения воздействия сил на объекты.

3.1 ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА

Законы Ньютона описывают движение объекта под действием сил. Второй и Третий законы Ньютона являются наиболее важными в ортодонтии.

Первый закон

«При отсутствии трения тело остается в состоянии покоя или продолжает равномерное прямолинейное движение. Если только эти состояния не изменят внешние силы, действующие на тело». Первый закон Ньютона по существу описывает концепцию инерции, то есть противодействие (или сопротивление) тела движению, когда на него действует сила. (Рис. 1).

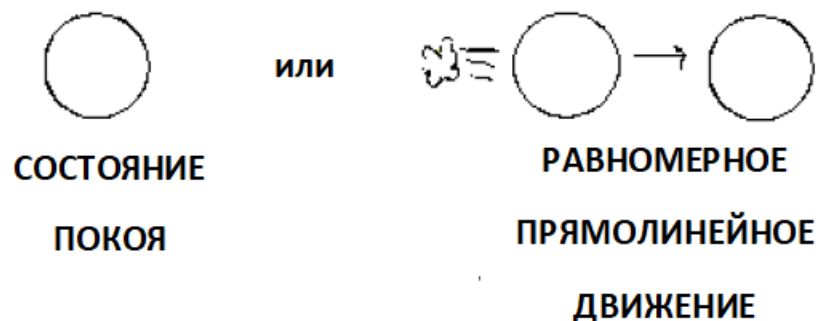


Рисунок 1. Первый закон Ньютона

3.2 ВТОРОЙ ЗАКОН

«Ускорение тела направлено туда же, куда и сила, которая его вызывает». Ускорение зависит от величины силы и массы объекта.

$$F_{\text{net}} = m \times a$$

(Сила = масса x ускорение)

3.3 ТРЕТИЙ ЗАКОН

Третий закон Ньютона гласит, что *«при каждом действии или силе существует равная сила противодействия (в противоположном направлении)»*. Согласно этому закону, всякий раз, когда два объекта взаимодействуют, они оказывают друг на друга и действие и противодействие. При любом взаимодействии существует пара сил. Силы в этой паре (действие и противодействие) являются векторами в том смысле, что они имеют некоторую величину и направление. Величина силы, действующей на первый объект, равна величине силы, действующей на второй объект, а направление силы, действующей на первый объект, противоположно направлению силы, действующей на второй объект.

Для примера рассмотрим взаимодействие между колесами автомобиля и дорогой. Когда колеса поворачиваются, они оказывают силу на дорогу. В свою очередь, дорога оказывает на колеса силу, равную по величине и противоположную по направлению силе, которую дорога получает от колес. В некотором смысле колеса толкают дорогу назад, а дорога толкает колеса вперед (равные и противоположные силы), позволяя автомобилю двигаться вперед.

В полости рта мы можем видеть примеры системы «действия – противодействия» в установке для ретракции клыков. Пружина тянет клык назад с огромной силой. Поскольку аппарат использует моляры в качестве опоры, то существует сила равной величины и противоположного направления, «вытягивающая» их вперед (Рис.2), что может являться нежелательным побочным эффектом. При планировании лечения

нежелательные побочные эффекты должны быть учтены и устранены или, по крайней мере, сведены к минимуму.

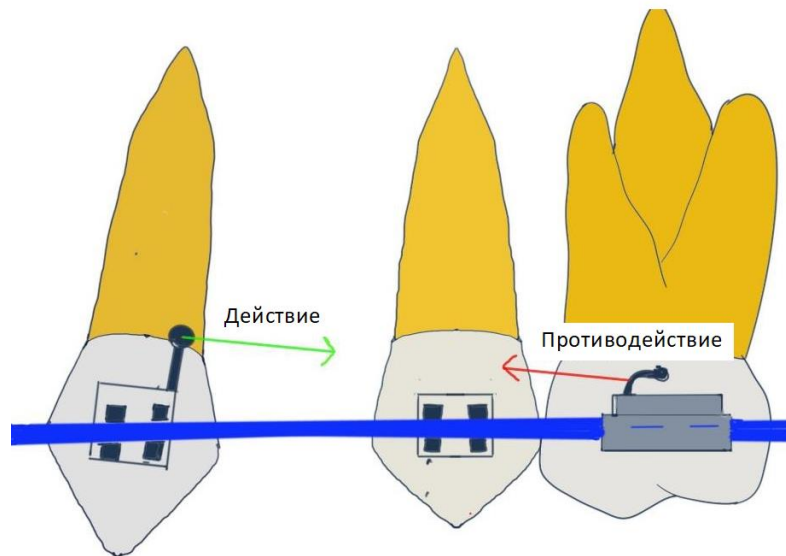


Рис. 2. Силы действия и противодействия приводят систему в равновесие.

Это упрощенный рисунок

4 ПОНЯТИЕ СИЛЫ

4.1 ПРОСТАЯ СИЛА

4.1.1 Определение

Сила - это любое действие, которое приводит к изменению положения объекта и его движению. Силы измеряются в граммах или ньютонах (примерно 100 грамм на 1 Ньютон на планете Земля, поскольку ускорение, вызванное гравитацией, считается постоянным и равным $9,807\text{м/с}^2$). В ортодонтии единицей силы обычно является грамм (2).

Направление и величина силы

Поскольку сила является вектором, направление силы представлено стрелкой, указывающая в том же направлении, что и движение зуба.

Величина представлена длиной стрелки (рис. 2).



Рис. 2. Простая сила в виде стрелки (с направлением и величиной)

4.1.2 Точка приложения силы

Точка приложения силы - это место, где сила приложена к объекту, и по соглашению является началом стрелки. Местоположение точки приложения силы функционально связано с центром масс, поскольку это точное местоположение будет определять стремление объекта либо к равномерному перемещению, либо к вращению при воздействии этой силы.

На Рис. 3 зеленая и красная силы находятся на разных направлениях, но имеют одну и ту же точку приложения.

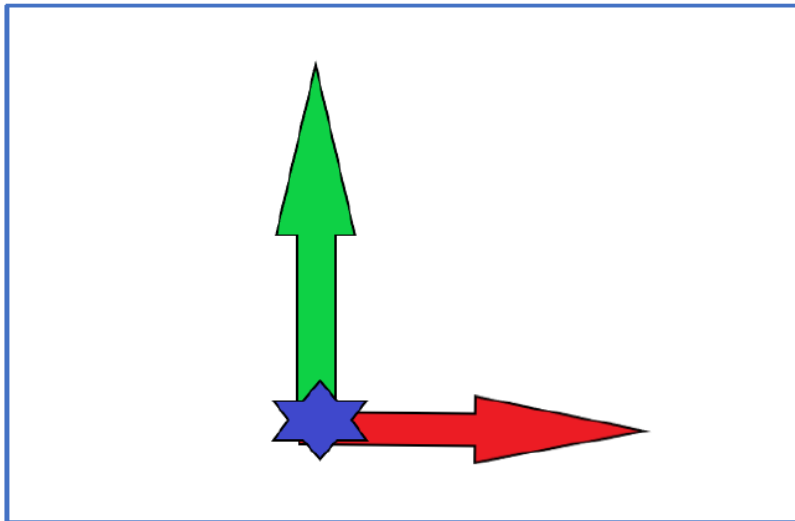


Рис. 3. Точка приложения сил

4.1.3. Линия действия с направлением и величиной.

Линия действия - это геометрическое представление способа приложения силы (Википедия). Линия действия - это ось смещения при приложении силы. Направление силы указано стрелкой. Величина - это длина стрелки по соглашению.

Две силы равной амплитуды, действующие в одном направлении и приложенные к одной и той же линии действия, будут иметь одинаковое воздействие на твердое тело. На рис. 5 F_1 и F_2 будут иметь такой же эффект на синее тело. Неважно, толкает ли одна сила, а другая - тянет. Чистый эффект будет идентичным.

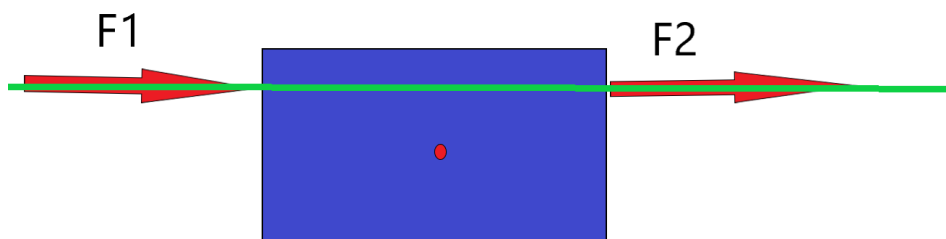


Рис. 5. Линия действия силы

4.1.4 Закон о допустимости переноса силы

Действие силы на тело одинаково, когда она приложена в любом месте вдоль ее линии действия (рис. 6). Например, если линия действия является длинной осью зуба, то не имеет значения, приложена ли сила к режущему краю резца, брекету или шейчному пояску (cingulum cervicale) цингулуму, до тех пор, пока сила остается в одном и том же направлении и величине, эффект остается прежним.

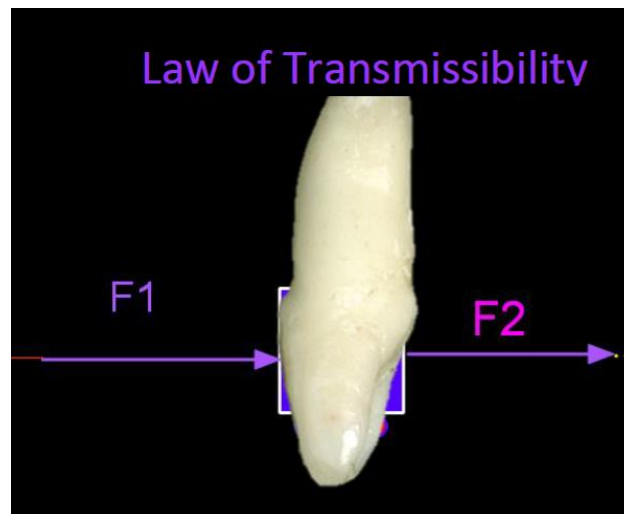


Рис. 6. Закон допустимости переноса силы: Силы F_1 и F_2 будут иметь одинаковый эффект

4.1.5 Точка приложения силы

Закон допустимости переноса говорит нам, что силы одинаковой величины и направления оказывают одинаковое действие независимо от того, где точка приложения расположена вдоль одной и той же силовой линии.

Напомним, **скаляры** используются для описания сил; скаляры имеют величину, но не направление. Векторы имеют и величину, и направление (векторы используются на диаграмме свободного тела).

Твердые тела не изменяют форму под действием сил (таких как силы сжатия и растяжения). Зубы - это твердые тела; **НО** то же самое нельзя сказать о мягких тканях!

Центр масс

Центр масс представляет собой точку равновесия системы. В простых объектах, таких как зуб, центр масс - это точка, в которой положение распределенной массы равно нулю. Если на тело массы не действует никакая сила(силы), оно будет действовать так, как если бы вся его масса была сосредоточена в этой единственной точке (центре масс).

4.1.6 Центр масс: точка равновесия системы

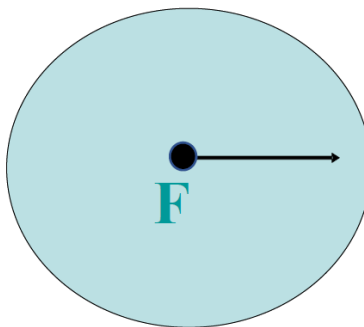


Рис. 8. Центр масс

Если сила проходит через центр масс, объект будет двигаться в направлении силы без какого-либо вращения (чистое перемещение).

Это будет то же самое, что коробка или любой другой объект на Луне (или в среде, где нет сил, действующих на зуб) (рис.9). Очевидно, что это не реалистичная ситуация, а скорее теоретическая концепция!

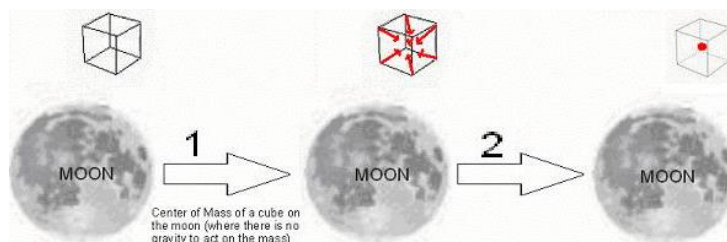


Рис. 9. Центр масс на Луне

Если линия действия свободного тела расположена вдали от центра сопротивления, следует ожидать комбинации вращения и перемещения (рис. 10).

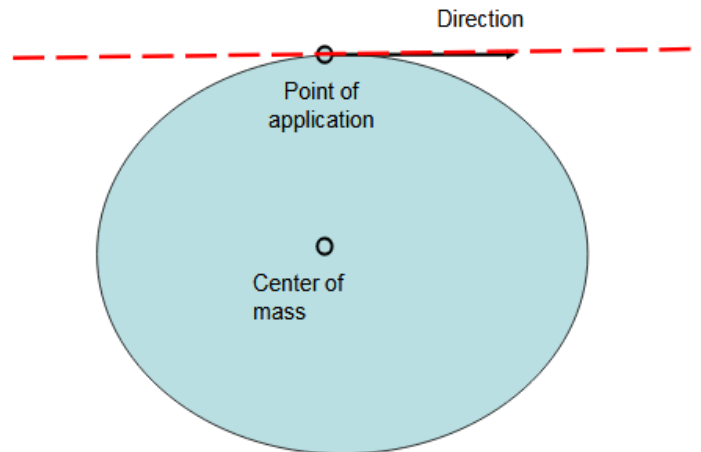
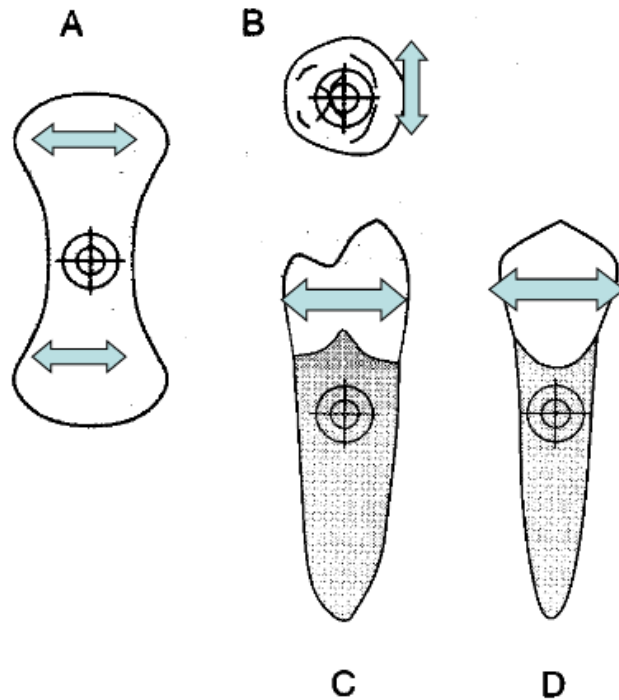


Рис. 10. Линия действия силы, расположенной на некотором расстоянии от центра масс

5 ЦЕНТР СОПРОТИВЛЕНИЯ (CR)

Центр сопротивления является важной концепцией в ортодонтии, поскольку зубы не являются свободными телами, а корни прикреплены к альвеолярной кости периодонтальной связкой. Центр масс и центр сопротивления не находятся в одном и том же месте. CR расположен более апикально (ближе к вершине), чем центр масс. Это математическая точка, в которой, можно считать, сконцентрировано все сопротивление перемещению. Расчеты силовых систем в зависимости от их способности к перемещению или вращению выполняются по отношению к центру сопротивления.



**Рис. 11. Локализация центра сопротивления в нескольких проекциях:
 А. Радикулярно, В: Оклюзионно. С: Вестибуло-орально, D.: Мезио-дистально**

Центр сопротивления изменяется в зависимости от вида и величины зуба и в зависимости от качества периодонтальной опоры. Он расположен на уровне корня примерно на $\frac{1}{2}$ его величины (Рис. 11).

Центр сопротивления рассматривает все силы, действующие на тело. Для зуба он включает в себя силы периодонтальной связки (PDL), кровеносных сосудов, костей и соединительной ткани (Рис.12). Центр сопротивления можно рассматривать для одного зуба или для группы зубов, если они были закреплены вместе (поэтому они действуют вместе как одна большая масса).

Важность центра сопротивления: Когда силы прилагаются к зубам, необходимо оценить их трехмерные эффекты и результирующие движения, которые произойдут, как только зуб будет подвергнут этой системе сил.

5.1 Изменчивость ЦЕНТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ в зависимости от качества периодонтальной опоры

Поддержка альвеолярной кости

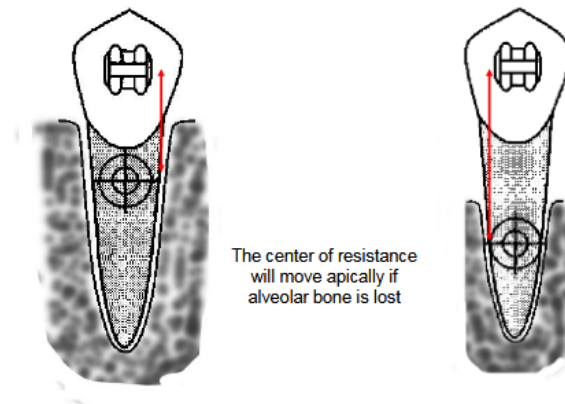


Рис. 12. Центр сопротивления перемещается апикально, когда происходит горизонтальная резорбция кости

Когда у пациента наблюдается снижение периодонтальной поддержки, гребень альвеолярной кости более апикальный. Центр сопротивления зуба резко переместился более апикально, и расстояние от брекета (или другого кронштейна) до центра сопротивления увеличивается почти в два раза (Рис. 12). Если к брекету на этих двух зубах приложить одинаковую силу, это приведет к совершенно неодинаковому ортодонтическому движению. Зуб справа будет иметь большую тенденцию вращаться в соответствии с увеличенным расстоянием силовой линии в центре сопротивления зуба.

5.1.1 Центр сопротивления для одного зуба:

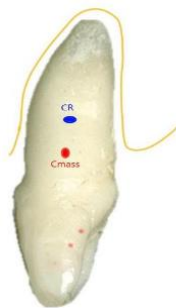


Рис. 13. Центр сопротивления (CR) по сравнению с центром масс (CMass) однокорневого зуба

Центр массы всегда расположен более окклюзионно, чем центр сопротивления из-за “сопротивления “периодонтальной связки и зубочелюстной кости. Поскольку это сопротивление невозможно количественно оценить для каждого зуба и для каждого пациента, центр сопротивления является теоретической концепцией, но может быть использован в качестве среднего значения для создания оптимизированных силовых систем.

В тех случаях, когда периодонтальная опора постоянна, центр сопротивления разных зубов будет находиться на разных уровнях.

Верхние клыки будут иметь более высокий центр сопротивления, в то время как премоляры и боковые резцы будут ниже.

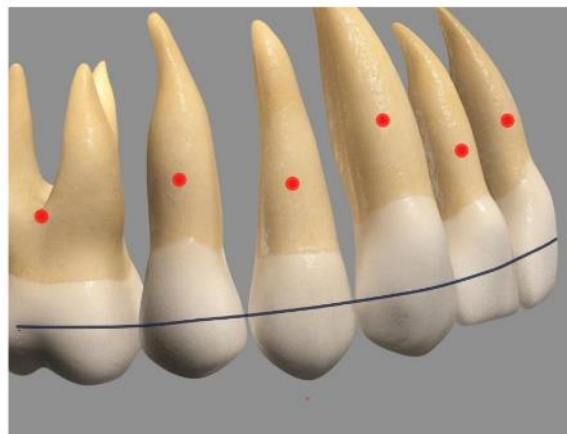


Рис. 14. Различные уровни расположения центров сопротивления (при условии, что периодонтальная поддержка в норме)

Поэтому очевидно, что центр сопротивления отличается среди разных зубов с иной длиной корня и анатомией, например, между резцами и молярами или премолярами и клыками. Его положение также изменяется в зависимости от высоты альвеолярной кости, так что оно будет отличаться у

ребенка по сравнению со взрослым с заболеваниями пародонта (центр сопротивления перемещается более апикально у взрослых с потерей костной массы) (Рис.14).

Еще одна причина иметь в виду центр сопротивления заключается в том, что именно эта точка на теле зуба уникальна: одна сила (в этой точке) приводит к простому равномерному перемещению зуба (Рис. 15):

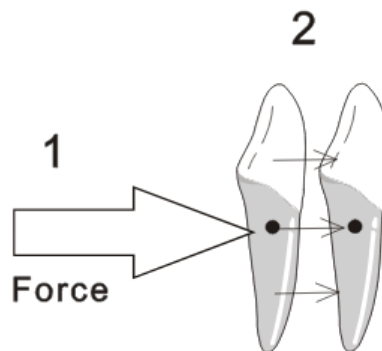


Рисунок 15: Силы, действующие на центр сопротивления, приводят к простому равномерному перемещению зуба

5.1.2. Центр сопротивления для группы зубов

Когда зубы включены в единую брекет-систему, создается новый центр сопротивления, и группа зубов теперь рассматривается как единый объект.

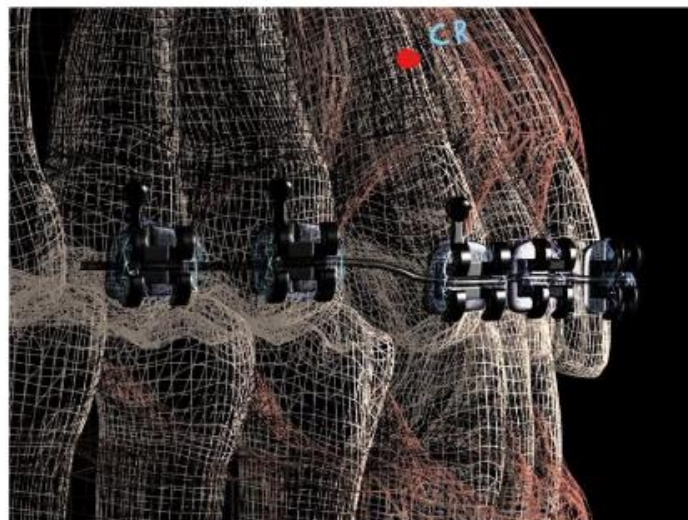


Рис. 16. Центр сопротивления для группы зубов

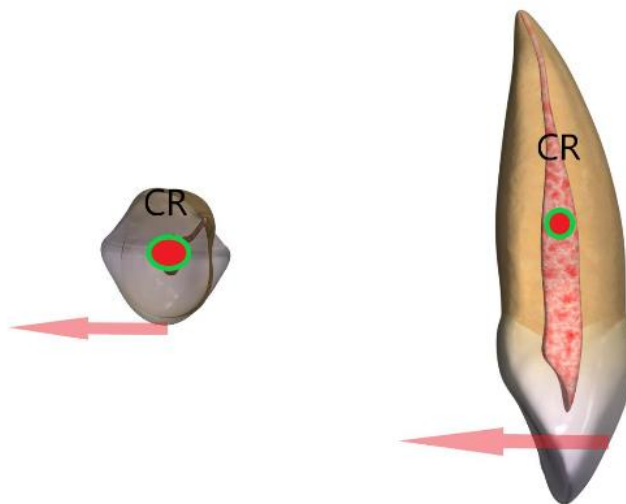


Рис. 17: Когда к брекету прикладывается сила, силовая линия всегда находится на расстоянии от центра сопротивления

5.1.3. Сочетание сил. Равнодействующая сила или чистая сила

В ортодонтии часто используется комбинация сил в трех плоскостях пространства, при этом полезно рассчитать чистую (или результирующую) силу. Для вычисления суммы векторов используется правило параллелограмма.

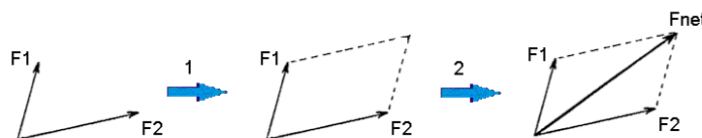


Рис. 18. Правило параллелограмма

Важно помнить, что сила (F_{net}) - это чистая (результирующая) сила, которая является векторной суммой всех сил (F_1 и F_2). Правило параллелограмма позволяет нам найти эту чистую силу: Силы F_1 и F_2 являются векторами и имеют свою величину и направление. Когда F_1 и F_2 находятся под углом друг к другу, параллелограмм создается путем построения смежных сторон для F_1 и F_2 . Диагональ, проходящая через

получившийся параллелограмм, является результирующей силой F_{net} (рис. 18).

Вычисления суммы 2 векторов (пожалуйста, обратитесь к этому веб-сайту для получения подробных объяснений:

<https://www.mathstopia.net/vectors/parallelogram-law-vector-addition>)

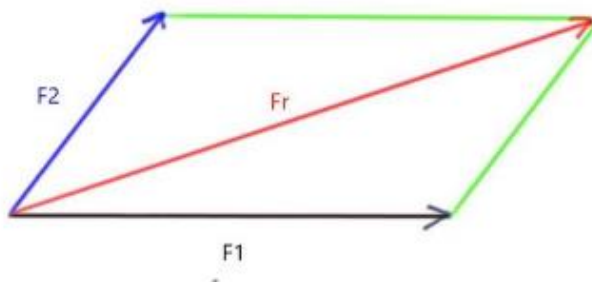


Рис. 19. Вычисление суммы двух векторов.

Для того чтобы вычислить величину результирующей силы F_r , мы используем формулу $F_r = F_1 + F_2$.

Нам нужно расширить линию действия F_1 , чтобы создать прямоугольный треугольник OXR и добавить углы α и β .

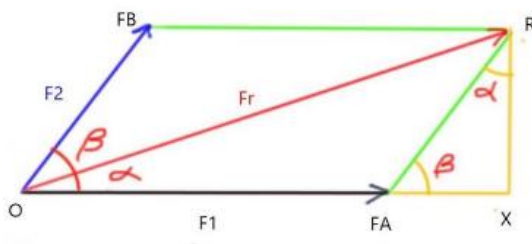


Рис. 20. Расширение параллелограмма.

Расчет амплитуды (величины):

$$F_r^2 = OX^2 + RX^2$$

$$OX = OFA + FAX \quad \text{или}$$

$$Fr^2 = (OFA + FAX)^2 + Rx^2$$

После полного расширения мы получаем.

Мы знаем, что $\cos \beta = \text{смежная сторона угла } \beta / \text{гипотенуза}$

$$FaX / F2 \text{ или } FaX = F2 \cos \beta$$

$$\text{и } \sin \beta = Rx / F2 \text{ или } RX = F2 \sin \beta$$

После подстановки значений: $Fr = \sqrt{F1^2 + 2F1F2 \cos \beta + F2^2}$

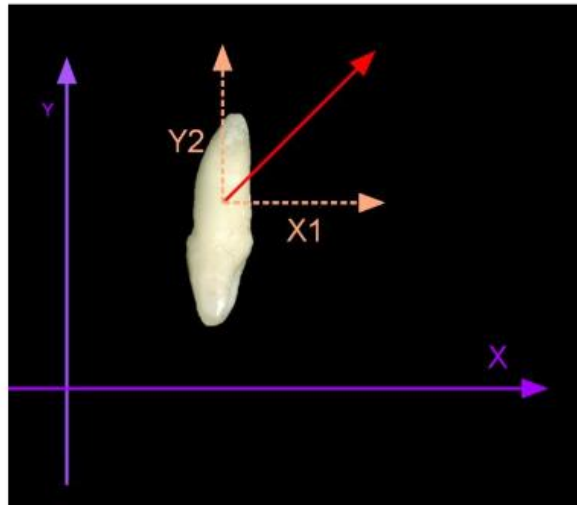


Рис. 21. Результирующая (чистая) сила при действии сил под углом 90 градусов

В случае, когда мы помещаем силы под углом 90 градусов, выражение упрощается:

$$Fr = \sqrt{X1^2 + Y2^2}$$

6. ЦЕНТР ВРАЩЕНИЯ

Центр вращения - это точка, вокруг которой вращается объект. Это зависит от расположения центра сопротивления и силы, приложенной к объекту. Чистое вращение происходит, когда центр вращения находится в центре сопротивления. Чистое перемещение (поступательное перемещение -

translational motion – *Прим. переводчика*) происходит, когда центр вращения находится на бесконечном расстоянии от центра сопротивления.

Чтобы определить центр вращения, вокруг которого происходит вращательное движение зуба (рис.22), выберите любые две точки на зубе (или объекте) и проведите линии между позициями каждой точки до и после перемещения. Точка пересечения перпендикулярных линий (*серединных перпендикуляров – Прим. переводчика*) является центром вращения.

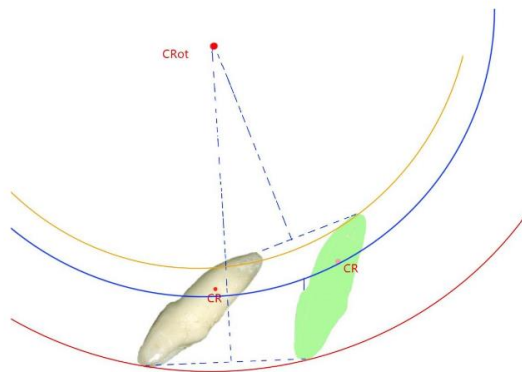


Рис. 22. Метод определения центра вращения

6.1.1. Диаграммы свободного тела

Диаграммы свободного тела помогают предсказать влияние различных сил, действующих на тело одновременно (равнодействующая, результирующая сила), или разложить силу на ее составляющие.

Пример диаграммы свободного тела с F_1 , F_2 и F_{net} (вспомните правило параллелограмма) (Рис. 23).

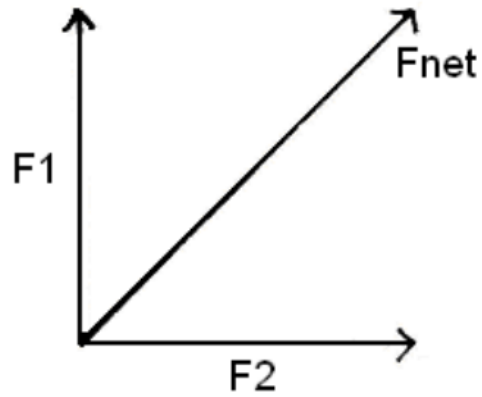


Рисунок 23: Схема свободного тела

Клинический пример использования схемы свободного тела с дугой вторжения (интрузии) и эластичными тягами (межчелюстными тягами).

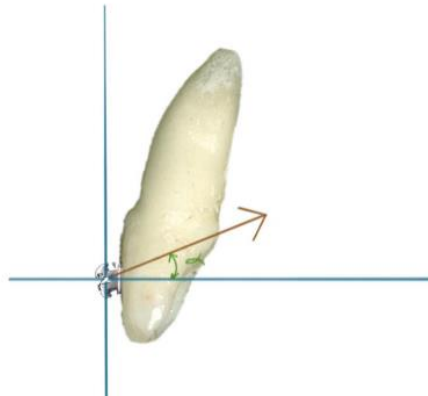


Рис. 24. Простое усилие для интрузии и ретракции резца верхней челюсти

Прилагается сила F . Она имеет интрузивную и ретрузивную (смещенную кзади) составляющие. Если мы знаем величину приложенной силы и ее угол наклона, мы можем определить величину интрузивных и ретрузивных сил с помощью простой тригонометрии (Рис. 24-25)

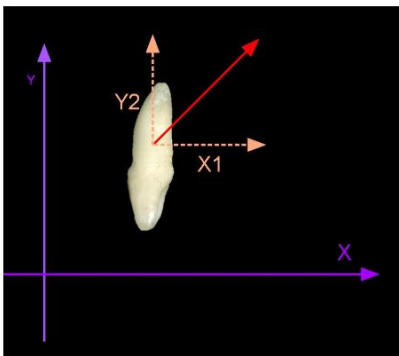


Рис. 25. Схема свободного тела и силы, приложенные к зубу

Если мы знаем, что $F_{net} = 500g$, мы можем решить для I (Интрузивная сила) и R (Ретрузивная сила), используя правило прямоугольного треугольника (рис. 26).

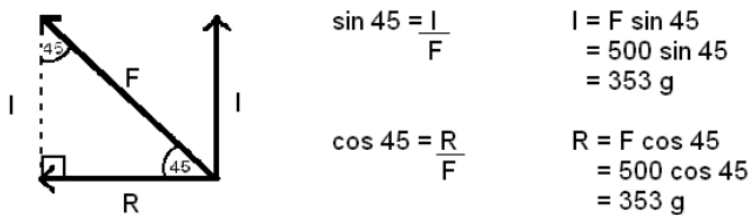


Рис. 26. Нахождение результирующих интрузивных и ретрузивных сил с использованием правила прямоугольного треугольника

Таким образом, сила $500g$ в направлении F_{net} равна силе $353g$ в направлении I и силе $353g$ в направлении R , приложенной к объекту одновременно.

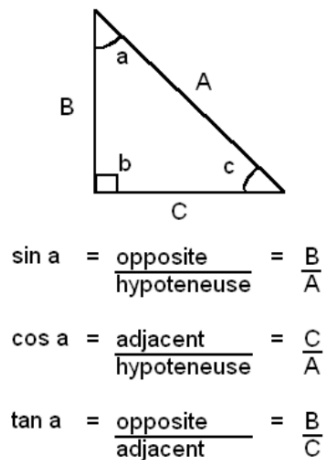


Рис. 26. Тригонометрические вычисления

7. ДВИЖЕНИЯ ЗУБА

Зубы движутся в трехмерном пространстве. Важно знать о различных возможных типах движений при планировании лечения, чтобы учесть желательные и нежелательные движения зубов.

7.1 Поступательное перемещение

Во время поступательного движения все точки тела движутся в одном направлении и на одинаковое расстояние (Рис. 28). Центр вращения фактически находится на бесконечном расстоянии от зуба, и поэтому вращения нет.

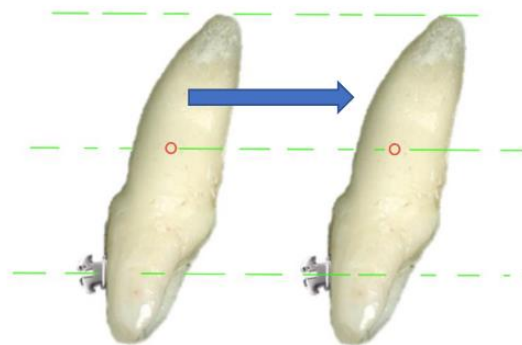


Рис.28. Поступательное перемещение центрального резца

7.2 Вращение (простое вращение)

Простое вращение происходит тогда, когда тело вращается вокруг центра сопротивления (Cres) (т. е. когда центр вращения (центр ротации) находится в центре сопротивления (Рис. 29).

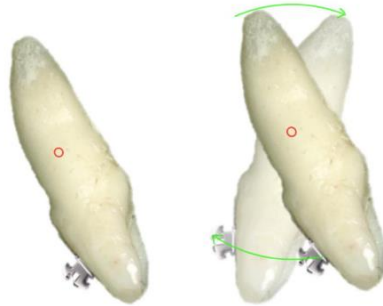


Рис. 29. Чистое (простое) вращение

7.3 Опрокидывание

При опрокидывании результат зависит от того, где приложена сила.

7.3.1 Неконтролируемое опрокидывание: Когда на коронку прикладывается усилие, коронка движется в одном направлении, а корень в другом. В этом случае центр вращения находится близко или апикально к центру сопротивления, поэтому кончики зубьев находятся примерно на уровне Cres (Рис. 30).

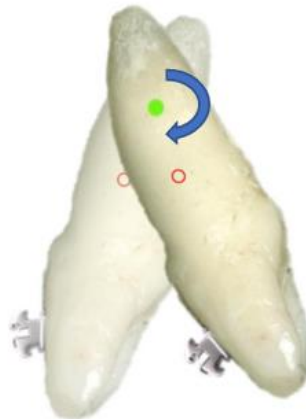


Рис. 30. Неконтролируемое опрокидывание

7.3.2 Контролируемое опрокидывание: Центр вращения находится на вершине зуба. Это включает в себя момент и силу, а также кончики зубов вокруг Центра ротации - C_{rot} (Рис. 31).

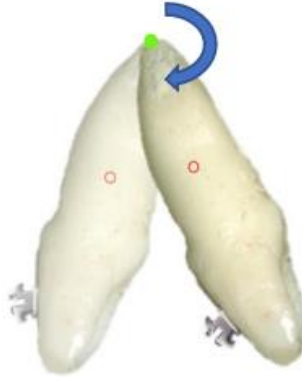


Рис.31. Контролируемое опрокидывание

Например, при коррекции аномалии окклюзии Класса II подкласса I с передней проклинацией верхней челюсти. Использование неконтролируемого опрокидывания может привести к перфорации щечной костной пластины, в то время как контролируемое опрокидывание приведет к перемещению только коронки, поэтому корень не будет перфорировать щечную костную пластину.

7.3.3 Перемещение корней

Движение корня происходит, когда центр вращения находится на краю резца или вблизи него, и вращение происходит примерно вокруг этой точки (Рис.32). Поэтому коронка смещена меньше, чем корень.

Движения корня занимают больше времени из-за резорбции (рассасывания) кости, необходимой для того, чтобы движение произошло.

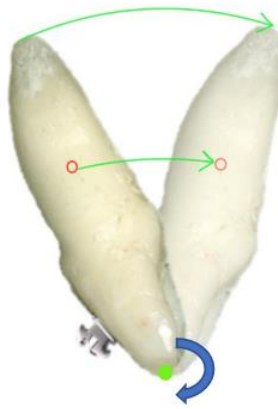


Рис. 32. Движение корня

7.3.4 Интрузия (внедрение) / Экструзия (давливание)

Интрузия и экструзия предполагают перемещение вдоль вертикальной оси зуба (Рис. 33 и 34).

Вспомним особенности поступательного перемещения (Рис.28), а именно, то что центр вращения в этом типе движения находится на бесконечности (потому что вращения нет). Другими словами, зуб вращается вокруг точки, которая находится на бесконечном расстоянии, так что мы не видим никакого вращения, только поступательное перемещение или движение – внедрения (интрузии)/выдавливания (экструзии).

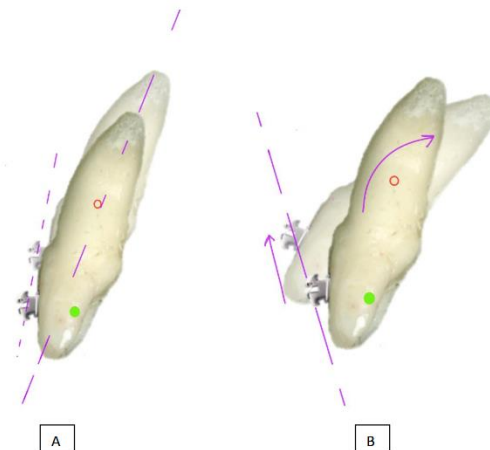


Рис. 33. А. Интрузия экструдированного резца. В. Относительная интрузия

Инtruзия: На рис. 33А (в этом примере не рассматриваются нежелательные эффекты внедрения: в то время как один зуб внедряется, соседние зубы выдавливаются, если они не закреплены. (См. обсуждение вопроса об опоре). Относительное вторжение является результатом проклинации и инtruзии (Рис. 33В)

Экструзия: (в следующем примере (Рис.34) нежелательные эффекты экструзии не учитываются: в то время как один зуб экструдируется, соседние зубы слегка внедряются, если они не закреплены (См. обсуждение вопроса об анкоридже).

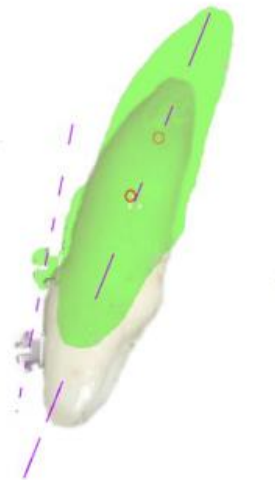


Рис. 34. Экструзия внедренного резца

8. СИСТЕМЫ СИЛ

Чтобы понять, как планировать и создавать перемещения зуба, следует рассмотреть системы сил.

Системы сил состоят из момента и силы, соотношение которых определяет тип производимого движения. В этом разделе будут рассмотрены момент сил, пара сил, отношение момента к силе и движения при изменении сил и систем.

8.1 Момент

Момент – это стремление силы, действующей на тело, вызывать его вращение. Чтобы вычислить момент силы, надо умножить величину силы на перпендикулярное расстояние от центра сопротивления, вокруг которого возникает момент (рис.35).

$$M = F \times d$$

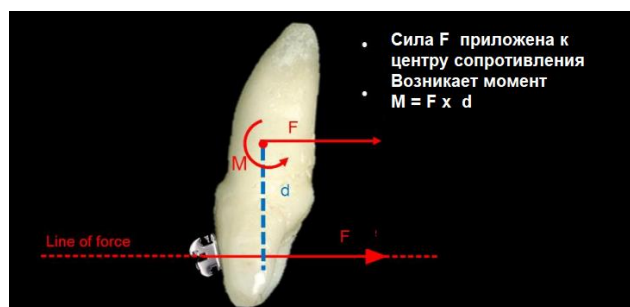


Рис. 35: Момент, создаваемый силой, приложенной на расстоянии от центра сопротивления

8.2 Пара сил

Пара является чистым моментом и возникает, когда две силы (F_1 , F_2 , равные и противоположные) разделены перпендикулярным расстоянием.

Чтобы рассчитать момент силовой пары, рассмотрим силы отдельно.

Пример: F_1 и F_2 не производят поступательных эффектов, потому что они имеют равные и противоположные направления и, следовательно, отменяют друг друга. Моменты сил не отменяют друг друга, потому что они производят вращение в одном и том же направлении (представьте себе вращение вокруг центра сопротивления, когда силы прилагаются от F_1 и F_2). Чтобы найти общий момент в системе, добавьте моменты; это пара сил. Пара сил действует независимо от того, где силы приложены к телу (или зубу).

Рассмотрим следующий пример пары сил (рис. 36)

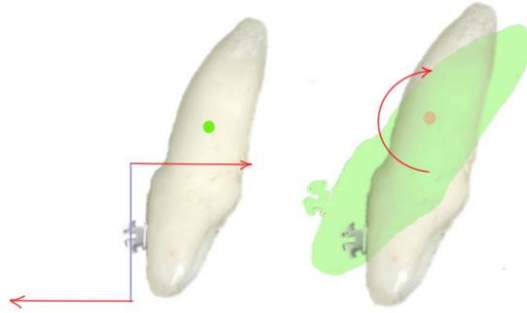


Рис. 36: Пара сил: пример 1

Поскольку пара сил действуют независимо от того, где силы приложены к телу, тот же результат, что и в приведенном выше примере, может быть достигнут путем размещения сил F_1 и F_2 в новом месте (новые места в этом примере более биологически и клинически обоснованы).

Следовательно, не имеет значения, где пара воздействует на зуб, чистый момент в этой системе будет равен одной силе, умноженной на расстояние между силами.

8.3 Отношение момента к силе

Отношение момента к силе совмещает в себе поступательные и вращательные движения.

Это отношение определяется амплитудой силы, умноженной на перпендикулярное расстояние до центра сопротивления зуба или группы зубов (Рис. 37).

Следующие примеры демонстрируют контролируемое опрокидывание зуба с использованием скомбинированных поступательных и вращательных движений (простая сила и момент) (Рис. 38 и 39).



Рис. 37. Отношение момента к силе для поступательного движения



Рис. 38. Планируемое движение зуба



Рис. 39. Комбинация перемещения и вращения для достижения контролируемого опрокидывания

Изменяя соотношение M/F , можно создавать различные центры вращения. На рис. 40 показано влияние изменения соотношения M/F на контролируемое опрокидывание. Если отношение M/F уменьшается (M является постоянным или уменьшенным, а F увеличивается), то вы получаете

большее поступательное движение, потому что центр вращения идет к вершине зуба (другими словами, от центра сопротивления, к бесконечности). Если отношение M/F будет увеличено путем увеличения их или уменьшения силы, будет больше вращения, так как центр вращения будет двигаться к центру сопротивления (другими словами, он перемещает больше резцов из своего предыдущего положения).

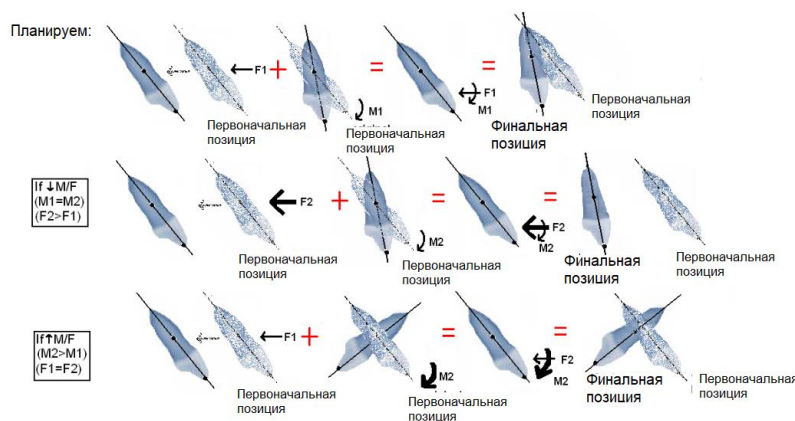


Рисунок 40: Влияние изменения отношения момента к силе (M/F)

8.4 Движения, при разнообразных силах и системах

Мы можем применить знания, полученные из раздела эквивалентных силовых систем, к реальному примеру, такому как вытягивание резца. Используя моляр в качестве крепления, мы не можем просто поместить прямую проволоку между резцом и моляром и использовать петлю в проволоке с эластиком для вытягивания, так как эта ситуация приведет к неконтролируемому опрокидыванию обоих зубов (центр вращения будет находиться в Центре Сопротивления). (Рис. 41)

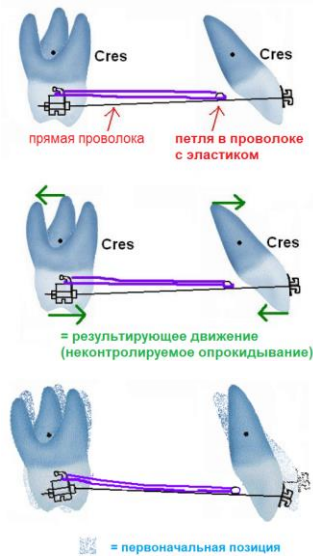


Рис. 41: Втягивание резца с помощью эластичной петли на проволоке: Результат - неконтролируемое опрокидывание.

Чтобы контролировать движение, нам нужно добавить момент в коронке, чтобы противостоять моменту, создаваемому силой, чтобы произвести как можно более чистое поступательное движение (снова вспомните эквивалентные силовые системы). Мы можем создать момент на коронке зуба, согнув проволоку в таком месте, чтобы зуб имел тенденцию наклоняться (контролируемым образом), когда проволока находится на месте. Следующий пример иллюстрирует эту концепцию (Рис. 42).

Для того, чтобы получить необходимый момент, а также силу, необходимо изогнуть проволоку

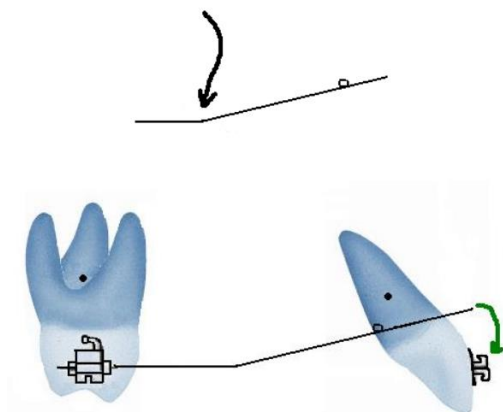


Рис. 42: Создание момента с изгибом проволоки, а также силы с петлей в проволоке

Чтобы дуга поместилась в паз брекета на резце, её необходимо слегка прижать к месту. Как только он находится на месте с эластиком, он оказывает следующие силы на два рассматриваемых зуба (F_m , M_m -сила и момент на моляре; F_i , M_i -сила и момент на резце).

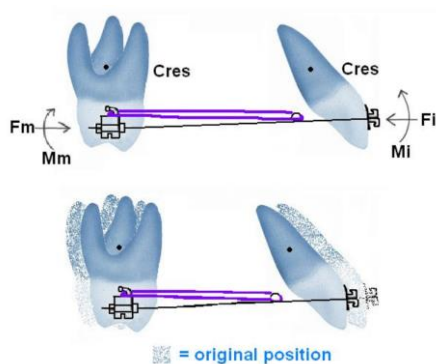


Рис. 43: Результирующее движение с изгибом и петлей в проволоке - это втягивание резца (опрокидывание контролируется и сводится к минимуму)

Этот пример демонстрирует, что, регулируя соотношение M/F , мы можем добиться желаемого эффекта перемещения зуба (Рис. 43). Это соотношение M/F может быть скорректировано в зависимости от поставленной цели (может потребоваться некоторое опрокидывание). Соотношение M/F можно соответствующим образом регулировать, и если есть контроль над движениями, цель будет достигнута.

На соотношение M/F влияет не только размещение резинки и изгиб проволоки. Тип упругости будет влиять на величину силы, приложенной к системе. Кроме того, тип проволоки (круглая или квадратная), а также ее диаметр будут влиять на соотношение M/F .

Если вместо квадратной проволоки используется круглая проволока, произойдет неконтролируемое опрокидывание, так как зуб может вращаться

вокруг проволоки (скоба имеет квадратную прорезь, в то время как проволока круглая) (рис. 44).

С другой стороны, если используется квадратная проволока, она заполнит прорезь кронштейна (квадрат в квадрат) (рис. 45). В результате при втягивании зуба возникает момент, который будет противодействовать моменту, который вызвал бы неконтролируемое опрокидывание. Кроме того, размер провода также повлияет на результат. Меньшая проволока будет отклоняться больше, чем большая проволока, поэтому телесные движения зубов лучше всего выполнять с более крупными проволоками, так как они будут отклоняться меньше и сохранять свою форму, таким образом направляя движение.

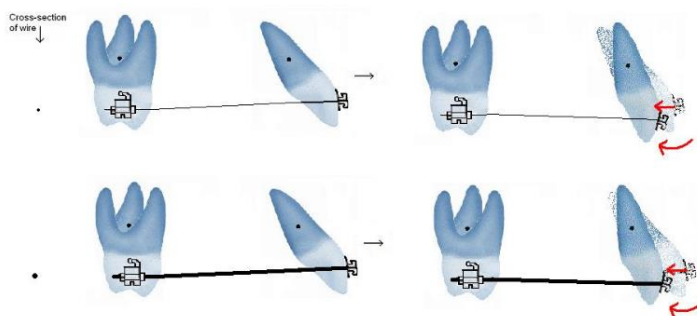


Рис. 44: Механика скольжения (при втягивании клыков) с помощью круглой проволоки двух разных диаметров

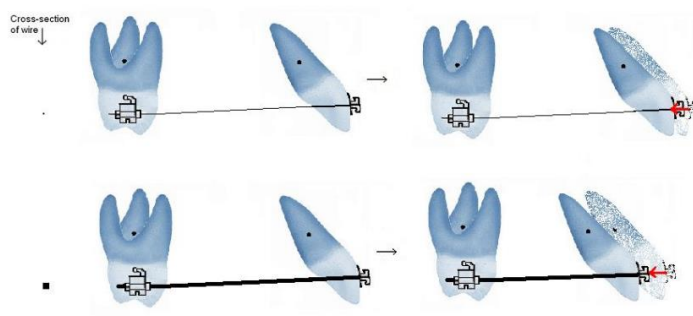


Рис. 45: Механика скольжения (при втягивании клыков) с квадратной проволокой двух разных диаметров

8.5 ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СИЛОВЫЕ СИСТЕМЫ

Проблема с системами сил, описанными выше, заключается в том, что описанные силы часто помещаются в центр сопротивления. Невозможно разместить скобу в центре сопротивления, так как оно находится на поверхности корня. Решение этой проблемы заключается в рассмотрении эквивалентных силовых систем. Эквивалентные силовые системы - это когда две силовые системы равны во всех трех измерениях (x, y, z), имеют равные моменты и оказывают одинаковое воздействие на объект (или зуб).

В ортодонтии эквивалентные силовые системы производят одинаковый эффект независимо от того, расположена ли силовая система в центре сопротивления или на уровне коронки (брекета/трубки).



Рис. 46. Пример эквивалентных силовых систем

Какая силовая система произведет в В тот же эффект (перемещение), что и в А, где силовая система В приложена к коронке зуба, а не к центру сопротивления, как в А (рис. 46)? Используя рассмотренные выше концепции, а также соотношения момента и силы, мы можем решить эту проблему.

(A)

$$F1 = -300g$$

$$\Sigma M = 0$$

(B)

$$F2 = -300g$$

$$d = 10mm$$

$$M = F2 \times d = -3000g \text{ mm}$$

(this is the moment produced by the force F2 on the crown of the tooth)

Только F2 приведет к неконтролируемому опрокидыванию зуба, так как на зубе есть момент, и зуб вращается вокруг центра сопротивления ($C_{rot} = C_{res}$). Поэтому для создания поступательного движения в системе В, эквивалентного системе А, требуется момент на коронке, который находится в направлении, противоположном моменту только от F2, так что чистый момент в системе В равен нулю (как в системе А). Следовательно, момент равен $M = +3000g \text{ мм}$.

Пример: Рассмотрим эквивалентную систему сил, необходимую для перемещения корня (Рис. 47).

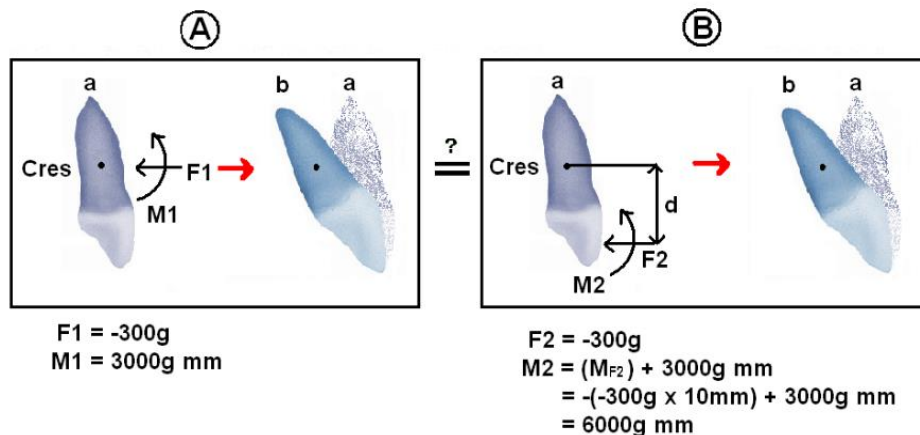


Рисунок 47: Расчеты, связанные с определением эквивалентных силовых систем для перемещения корня

В этом примере система А имеет силу и момент, действующие в центре сопротивления, чтобы произвести желаемое движение корня. В системе В существует Момент, связанный с силой F2 (поскольку F2 приложен к коронке, а не к центру сопротивления), которому необходимо противодействовать, чтобы контролировать центр вращения. Для получения дополнительного контролируемого опрокидывания зуба на зуб накладывается дополнительный момент, так что в системе В, как и в системе А, получается эквивалентный результат.

Некоторые подсказки для управления движением,

*** Лучше изменить момент, а не силу.**

а) Для контролируемого опрокидывания уменьшите момент (уменьшите M/F)

б) Для перемещения отрегулируйте момент так, чтобы у вас была эквивалентная система силы

в) Закрепите коронку для перемещения корня (т. е. увеличьте момент)

г) Перемещение не будет происходить только за счет увеличения силы на объект.

M/F в центре сопротивления определяет влияние на PDL. В области напряженного PDL (в сторону от направления движения зуба) откладывается кость, а кость под сжатым PDL (в сторону направления движения зуба) рассасывается.

Не забывайте, что величина M/F будет зависеть от длины корня/рельефа кости (потому что расстояние от кронштейна до центра сопротивления может изменяться). Например, более короткие зубы требуют более низкого M/F для перевода по сравнению с более длинными зубами.

9 АНКораДЖ (ОПОРА)

Анкорадж (опора) в ортодонтии является важным фактором, поскольку она обеспечивает устойчивость к нежелательным движениям зубов. Третий закон Ньютона жизненно важен для обсуждения анкеровки. Вспомним, что каждое действие имеет равное и противоположное противодействие. Таким образом, силовая система, используемая для смещения зубов, будет иметь равную и противоположную реакцию от систему крепления.

Опора может быть внутриарковой, межарковой или экстраоральной, каждая из которых обеспечивает различную величину устойчивости или сопротивления нежелательным движениям. Например, в качестве опоры (анкера) могут служить: зубы, небо, нервно-мышечная система, имплантаты и экстраоральные структуры.

Необходимое количество крепления зависит от плана лечения. Например, чтобы закрыть пространство для удаления, есть в основном три варианта: втянуть только передний сегмент (задние зубы закреплены на месте), втянуть передние зубы и выдвинуть задние или выдвинуть только задние зубы.

Максимальная фиксация может быть достигнута с использованием имплантатов (микро -, мини -, небных) и экстраоральных приспособлений (головных упоров). Максимальное закрепление происходит, когда анкерный блок не перемещается во время передвижения зубов или группы зубов. Этого трудно достичь только с помощью внутриротовых устройств (без имплантатов), поскольку всегда существует зубочелюстная реакция, влияющая на анкерные узлы. Примером внутриротового устройства, которое обеспечивает большую фиксацию (хотя и не так сильно, как другие максимальные установки фиксации), является устройство Аппарат Гербста.

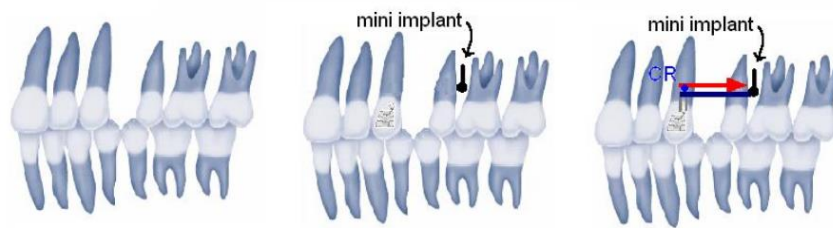


Рис.48. Использование мини-имплантатов при ретракции клыков

Использование микроимплантатов становится все более популярным в ортодонтии. В следующем примере показано, как можно дистализировать (Дистализация - это движение зубов назад, в сторону зубов мудрости)

клык с помощью микроимплантата (Рис. 48). В этом случае дистальное движение тела происходит потому, что сила находится ближе к центру сопротивления. Обратите внимание, что при использовании имплантатов (особенно на щечной поверхности альвеолярной кости) наблюдается нежелательное движение в другую плоскость (в сторону щечной кости). Это может быть сведено к минимуму типом проволоки, используемого в системе (см. Обсуждение).

Умеренное закрепление происходит, когда узел крепления может быть смещен, но меньше, чем перемещаемые зубы. Умеренная фиксация обычно достигается с помощью внутриротового устройства или группы зубов.

Также можно использовать комбинации максимальной и умеренной креплений. Например, в случае извлечения второго премоляра, когда мы пытаемся дистализировать первый премоляр, но хотим избежать мезиализации первого моляра, мы можем прикрепить первый моляр ко второму моляру.

Если бы мы пытались втянуть весь передний сегмент, потребовалось бы дополнительное крепление, и можно было бы добавить головной упор. Крепление системы может быть увеличено либо за счет увеличения

количества зубов, связанных вместе, либо за счет добавления экстраорального крепления, в зависимости от желаемых результатов лечения.

Ситуация, в которой нет опоры – это возвратно-поступательное движение, такое как при закрытии диастемы (Рис. 49).

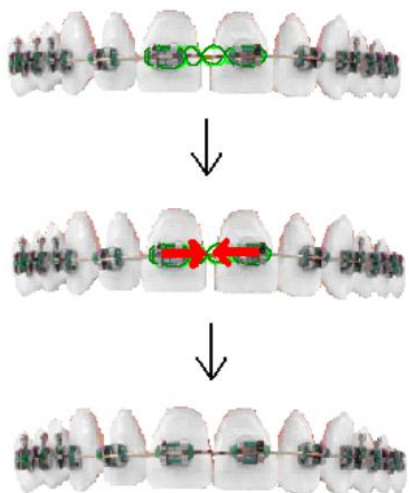


Рис. 49. Возвратно-поступательное движение при закрытии диастемы

9.1 Практическое применение

9.1.1. Ретракция клыков

Чтобы закрыть пространство, оставшееся после удаления премоляра, сначала можно втянуть клык, а затем резцы, или, в качестве альтернативы, шесть передних зубов могут быть втянуты группой. Чтобы продемонстрировать биомеханику ретракции, в этом примере будет использоваться ретракция клыка. Зуб подвергается дистальной движущей силе вдоль направляющей дуги. Поскольку сила применена окклюзионно к центру сопротивления, происходит опрокидывание зуба. Этому опрокидывающему движению противостоит пара сил, создаваемая скобой и проволокой дуги, что приводит к незначительному изменению угла наклона

длинной оси зуба. Эта встречная пара, конечно, зависит от размера и формы поперечного сечения дуги.

Дуга должна заполнить паз брекета, чтобы возникла встречная пара.

Результатом этого действия является втянутый вертикально клык, корень которого параллелен корням соседних зубов.

9.1.2. Экструзия для удлинения клинической коронки и постановки имплантатов

Клиническое применение движений зубов является частью ортодонтии, но также является частью других специальностей. Например, если мы хотим увеличить клиническую высоту коронки зуба в ситуации, когда мы не можем выполнить периодонтальную процедуру для достижения нашей цели (например, в эстетически чувствительной фронтальной области), ортодонтическая экструзия может быть вариантом. Ортодонтическая экструзия может быть быстрой или медленной, в зависимости от целей лечения и в зависимости от механики (сил) используемого ортодонтического аппарата. Например, ортодонтическая экструзия может быть использована для подготовки места для имплантата.

10 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Andrews, L. F. (1979). "The straight-wire appliance." *British Journal of Orthodontics* 6(3): 125-143.

Antoszewska, J. and N. Küçükkeles (2011). *Biomechanics of Tooth-Movement: Current Look at Orthodontic Fundamental*, INTECH Open Access Publisher.

Barlow, M. and K. Kula (2008). "Factors influencing efficiency of sliding mechanics to close extraction space: a systematic review." *Orthodontics & craniofacial research* 11(2): 65-73.

Beertsen, W., C.A. McCulloch and J. Sodek (1997). "The periodontal ligament: a unique, multifunctional connective tissue." *Periodontology* 2000 13(1): 20-40.

Begg, P.R. (1954). "Stone Age man's dentition: with reference to anatomically correct occlusion, the etiology of malocclusion, and a technique for its treatment." *American Journal of Orthodontics* 40(4): 298-312.

Bridges, T., G. King and A. Mohammed (1988). "The effect of age on tooth movement and mineral density in the alveolar tissues of the rat." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 93(3): 245-250.

Brudvik, P. and P. Rygh (1993). "The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament." *The European Journal of Orthodontics* 15(4): 249-263.

Burstone, C. J. (1962). "Rationale of the segmented arch." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 48(11): 805-822.

Burstone, C. J. (2011). "Application of bioengineering to clinical orthodontics." *Orthodontics-E-Book: Current Principles and Techniques*: 345.

Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1974). "Force systems from an ideal arch." *American journal of orthodontics* 65(3): 270-289.

Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1988). "Creative wire bending – the force system from step and V bends." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 93(1): 59-67.

Burstone, C. J. and R. J. Pryputniewicz (1980). "Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces." *American journal of orthodontics* 77(4): 396-409.

Cahill, D. R. and S. C. Marks (1980). "Tooth eruption: evidence for the central role of the dental follicle." *Journal of Oral Pathology & Medicine* 9(4): 189-200.

Cai, Y., X. Yang, B. He and J. Yao (2015). "Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment." *BMC oral health* 15(1): 106.

Caputo, M., C. Di Luzio, A. Bellisario, F. Squillace and M. L. Favale (2017). "Evaluation Of The Effectiveness Of Clear Aligners Therapy In Orthodontic Tooth Movement."

Castroflorio, T., F. Garino, A. Lazzaro and C. Debernardi (2013). "Upper-incisor root control with Invisalign appliances." *J Clin Orthod* 47(6): 346-351.

Chen, G., F. Teng and T.-M. Xu (2016). "Distalization of the maxillary and mandibular dentitions with miniscrew anchorage in a patient with moderate Class I bimaxillary dentoalveolar protrusion." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 149(3): 401-410.

Choy, K., E.-K. Pae, K.-H. Kim, Y. C. Park and C. J. Burstone (2002). "Controlled space closure with a statically determinate retraction system." *The Angle Orthodontist* 72(3): 191-198.

Cobo, J., A. Sicilia, J. Argüelles, D. Suárez and M. Vijande (1993). "Initial stress induced in periodontal tissue with diverse degrees of bone loss by an orthodontic force: tridimensional analysis by means of the finite element method." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 104 (5): 448-454.

Cope, J. (2011). "An interview with Jason Cope." *Dental Press Journal of Orthodontics* 16(2): 36-46.

Epstein, M. B. (2002). Benefits and rationale of differential bracket slot sizes: the use of 0.018-inch and 0.022-inch slot sizes within a single bracket system.

Fiorelli, G., B. Melsen and C. Modica (2001). "Differentiated orthodontic mechanics for dental midline correction." *Journal of clinical orthodontics: JCO*35(4): 239.

Garino, F., T. Castroflorio, S. Daher, S. Ravera, G. Rossini, G. Cugliari and A. Deregibus (2016). "Effectiveness of composite attachments in controlling upper-molar movement with aligners." *J Clin Orthod* 50(6): 341-347.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis – concepts and values. Part I." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 107(4): 434-443.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values: part II." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 107(5): 541-547.

Geramy, A., K. Tanne, M. Moradi, H. Golshahi and Y. Farajzadeh Jalali (2016). "Finite element analysis of the convergence of the centers of resistance and rotation in extreme moment – to - force ratios." *Int Orthod* 14(2): 161-170.

Geron, S., R. Romano and T. Brosh (2004). "Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors – a theoretical approach." *The Angle Orthodontist* 74(2): 195-201.

Giancotti, A. and A. A. Gianelly (2001). "Three -Dimensional Control in Extraction Cases Using a Bidimensional Approach." *World Journal of Orthodontics* 2(2).

Giancotti, A., P. Mozzicato and M. Greco (2012). "En masse retraction of the anterior teeth using a modified bidimensional technique." *Journal of Clinical Orthodontics* 46(5): 267.

Jacobs, R. and D. v. Steenberghe (1994). "Role of periodontal ligament receptors in the tactile function of teeth: a review." *Journal of periodontal research* 29(3): 153-167.

Kim, S.-J., J.-W. Kim, T.-H. Choi and K.-J. Lee (2014). "Combined use of miniscrews and continuous arch for intrusive root movement of incisors in Class II division 2 with gummy smile." *The Angle Orthodontist* 84(5): 910-918.

Koenig, H. A. and C. J. Burstone (1989). "Force systems from an ideal arch—large deflection considerations." *The Angle rthodontist* 59(1): 11-16.

Kojima, Y. and H. Fukui (2014). "A finite element simulation of initial movement, orthodontic movement, and the centre of resistance of the maxillary teeth connected with an archwire." *European Journal of Orthodontics* 36 (3): 255-261.

Krishnan, V. and Z. e. Davidovitch (2006). "Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 129(4): 469. e461-469. e432.

Kurol, J. and P. Owman-Moll (1998). "Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents." *The Angle orthodontist* 68(2): 161-166.

Kusy, R. P. and J. C. Tulloch (1986). "Analysis of moment/force ratios in the mechanics of tooth movement." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 90 (2): 127-131.

Lavigne, G., J. Kim, C. Valiquette and J. Lund (1987). "Evidence that periodontal pressoreceptors provide positive feedback to jaw closing muscles during mastication." *Journal of Neurophysiology* 58(2): 342-358.

Lekic, P. and C. McCulloch (1996). "Periodontal ligament cell populations: the central role of fibroblasts in creating a unique tissue." *The Anatomical Record* 245(2): 327-341.

Lindauer, S. J. (2001). *The basics of orthodontic mechanics*. Seminars in Orthodontics, Elsevier.

McCulloch, C. A. and S. Bordin (1991). "Role of fibroblast subpopulations in periodontal physiology and pathology." *Journal of periodontal research* 26(3): 144-154.

Mcculloch, C. A., P. Lekic and M. D. Mckee (2000). "Role of physical forces in regulating the form and function of the periodontal ligament." *Periodontology 2000* 24(1): 56-72.

Meling, T. R., J. Ødegaard and E. Ø. Meling (1997). "On mechanical properties of square and rectangular stainless steel wires tested in torsion." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 111(3): 310-320.

Melsen, B. (1999). "Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement." *The Angle orthodontist* 69(2): 151-158.