

Spiros Zinelis*, Iosif Sifakakis**, Christos Katsaros***, Theodore Eliades****

Кафедры *биоматериалов и **Ортодонтии, школа стоматологии, Афинский университет, Греция. ***Кафедра ортодонтии и челюстно-лицевой ортопедии, школа стоматологии, Университет Берна. ****Кафедра ортодонтии и детской стоматологии, Центр стоматологии, университет Цюриха, Швейцария

МИКРОСТРУКТУРНАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННЫХ ЛИНГВАЛЬНЫХ БРЕКЕТОВ

Статья печатается по разрешению журнала «European Journal of Orthodontics»
European Journal of Orthodontics 36 (2014) 389–393

Введение

В настоящее время лингвальные брекет-системы доступны в разнообразных вариантах лечения: обычные или самолигирующиеся системы, изготовленные из нержавеющей стали, безникелевые Co-Cr или Au сплавов, изготовленные заводским способом или полностью настроенные, с горизонтальными или вертикальными пазами. Большинство из них имеют паз 0,018 дюйма, так как повышенная неподвижность жестких дуг нежелательна в передней области лингвальной аппаратуры, где уменьшается межбрекетное расстояние.

Химический состав этих сплавов влияет на их биосовместимость, коррозионную стойкость и ионный релиз (Knoernschild др., 1999; Staffolani др., 1999; Locci и др., 2000; Karov & Hinberg, 2001; Huang и др., 2004), а также их биомеханические характеристики. Сплавы Co-Cr увеличивают коэффициент трения, по сравнению с нержавеющей сталью (Kusu и др., 1991). В отличие от этого, анализ поверхности и трения эстетических брекетов (Kusu и Whitley, 2001) или паза (Doshi и Bhad-Patil, 2011 г.) оказывать хорошую альтернативу нержавеющей стали при закрытии промежутков с механикой скольжения. Кроме того, увеличение твердости паза имеет важное значение, чтобы избежать привязывания дуги к стенкам паза брекета, что может увеличить трение, и, как результат, более высокие величины силы необходимы для того, чтобы выполнить перемещение зуба (Eliades, 2011).

Нет информации о структурных и механических характеристиках лингвальных брекетов, и, к сожалению, их клинический эффект не может быть выведен из существующих литературных данных о губной аппаратуре, из-за различий в биомеханике (Geron др., 2004), структуре (Wiechmann, 2002), или присущей технике (Demling др., 2009). Поэтому целью данного исследования было изучение состава, микроструктуры и механических свойств трех различных видов лингвальных брекетов.

Материалы и методы

Оценивались следующие три вида брекетов: лингвальные брекеты Incognito™ (3M Unitek, Монровия, Калифорния, США, Lot 106332), лингвальные брекеты In-Ovation L (DENTSPLY GAC, Богемия, Нью-Йорк, США, Lot S000512000) и лингвальные бре-

кеты STb™ (Light Lingual System, ORMCO, Orange, Калифорния, США, Lot HS Code 9021.10.0090). Эти брекеты ранее оценивались in vitro относительно передачи торка, с процедурой, которая включала перевязку 10 прямоугольных дуг (Sifakakis и др., 2013).

В эпоксидную смолу (Epofix, Струэрс Копенгаген Дания) было встроено пять брекетов на верхние премоляры из каждой группы брекетов (15 брекетов в общей сумме) площадку с бумагой с охлаждением воды SiC от 220 до 2000 grit, и полированную до 1 мкм суспензии глинозема (Buehler, Lake Bluff, Ill) в машине шлифовки/полировки (Ecomet III, Buehler). Затем образцы были очищены с помощью ультразвука в течение 5 минут и вакуума, покрытого тонким слоем проводящего углерода. Поверхность сечений была изучена под сканирующим электронным микроскопом с использованием обратного рассеяния электронов изображений (BEI), и их элементный состав был проанализирован энергодисперсионным рентгеновским микроанализом, используя Si (Li) энерго-дисперсионный спектроскопический (EDS) детектор (Sapphire, EDAX, Mahwah, Нью-Джерси, США) с супер ультратонким окном (Be). Рентгеновский луч EDS спектра (EDX) получали с крыла и основания поперечного сечения под 30 кВ ускоряющего напряжения и пучка тока 98 мкА с помощью режима анализа зоны при 1000-кратном увеличении, окно выборки 130 × 130 мкм. Количественный анализ проводили с помощью программного обеспечения (версия 5.1, EDAX) под нестандартным анализом, используя ZAF (атомный номер — поглощение — флуоресценция) методы коррекции.

Те же образцы переполнивали и их поверхности использовали для оценки твердости по Виккерсу (HV0.5), используя универсальную машину для определения твердости ZHU0.2 / Z2.5 (Zwick Roell, Ulm, Германия) прилагая нагрузку 5 N и 12 секунд времени контакта. Из каждого образца было взято одно считывание. Кроме того, модуль отступа (EIT) измеряли в соответствии со стандартным методом испытаний (ISO 14577–1, 2002). Этот метод требует одновременного мониторинга нагрузки и глубины вдавливания в течение цикла нагрузки-разгрузки, и EIT оценка основывается на начальном наклоне от выгрузки данных. Определение основано в соот-

ветствии с математическими формулами, предусмотренными ISO 14577–1, используя следующую формулу:

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}}$$

где v_s (0.3) и v_i (0.07) коэффициент Пуассона из образца и индентора; E_i модуль индентора (1140 ГПа); E_r приведенный модуль, определяемый по формуле:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C\sqrt{A_p}}$$

где C обозначает соответствие контакта и определяется по наклону dh/dF при максимальной испытательной силе; и A_p прогнозируемая площадь контакта, которая определяется в соответствии с ISO 14577–2. (ISO 14577–2, 2002).

Результаты твердости и модуля испытаний были статистически проанализированы двухсторонним анализом дисперсии с использованием вида брекета и расположение (базиса и крыла), как дискриминационные переменные. Существенные различия между группами были определены после специального сравнительного анализа Student-Newman-Keuls при 95%-ном уровне значимости.

На рис. 1 показан представитель BEI от области крыла брекетов, включенных в исследование. Рис. 1а демонстрирует структуру Incognito с промежуточным средним атомным номером контрастности матрицы (M) и легко рассредоточенной почти круговой фазы (G). Тяжелая фаза была идентифицирована в непосредственной близости или внутри объема этой дисперсной фазы (W). Три различных фазы также были определены для области базиса In-Ovation L на основе среднего атомного числа отличий на рис. 1 б. Диффузное распределение более легкой фазы (G) в матрице (M). Почти круговые крошечные фазы (W) были определены на границе между (M) и (G), как показано на рис. 1б. С другой стороны, брекеты STb не показали среднюю атомную область отличий и, таким образом, это определено в виде одной фазы. Последнее является правдой для основания крыла брекетов STb и In-Ovation L. Incognito это цельный брекет с такой же структурой крыла и основания.

Элементный контент для всех брекетов, протестированных после анализа EDX, по-

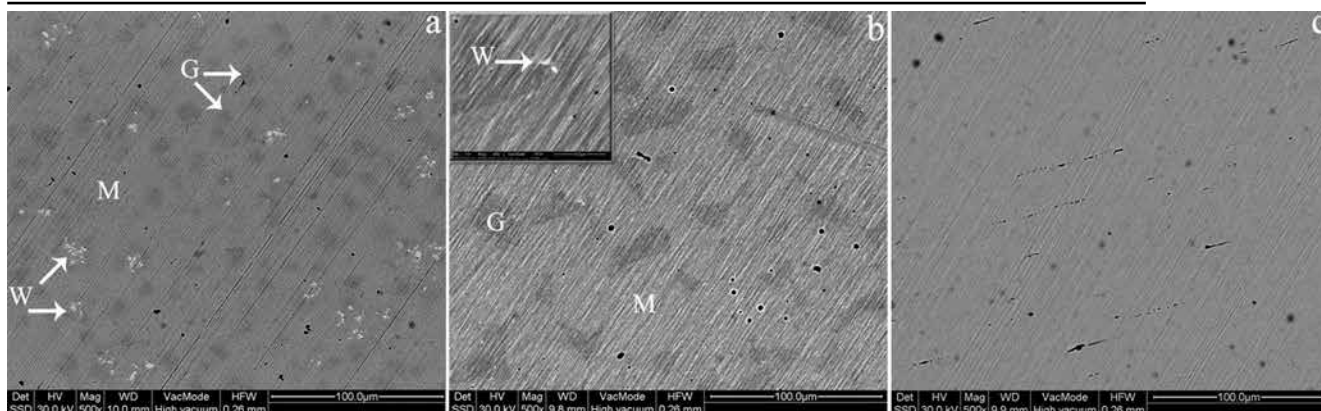


Рис. 1. Отраженные электронные изображения с поперечным сечением тестированных брекетов. (а) Incognito: диффузное распределение в матрице (М) почти круглой нижней фазы среднего атомного числа (G), в том числе с высшей фазой среднего атомного числа (W). (б) In-Ovation L с диффузным распределением почти полигональной области с более низкой фазой среднего атомного числа. Вложенный рисунок демонстрирует в большем увеличении развитие тяжелой фазы (W) на границе между матрицей (М) и диффузной фазой (с) STb: однофазный без средних атомных различий. Серое круглое пятно относится к загрязнению поверхности, как показано на соответствующем вторичном электронном изображении (не показано здесь) [Подлинное увеличение $\times 500 \times$ (вставка $4000 \times$). Вар $100 \mu\text{м}$ (вставка $10 \mu\text{м}$)

казано в табл. 1. Для ясности, представлены только средние значения каждого элемента. Брекеты Incognito состоят в основном из благородных металлов, в то время как у брекетов In-Ovation L и STb наблюдаются аналогичные формулировки черных сплавов в крыле и основании.

Рис. 2 демонстрирует представительные твердость углубления в области крыла и базиса с более мягкими сплавы, имеющими больший знак отступа также показано в этом рисунке. Представитель силы глубины отступа кривой для всех протестированных материалов представлен на рис. 3 с пунктирной линией, указывающей касательную к кривой разгрузки при максимальном усилии, а на рис. 4 представлены результаты твердости и ЕIT для всех протестированных брекетов. Так как это Incognito это цельный брекеты, то те же значения твердости и ЕIT было приложено к области базиса и крыла. Никаких существенных различий не было найдено между металлическими брекетами в твердости и модуле значений, однако существуют значительные различия между областью крыла и базиса. Брекеты Incognito демонстрируют промежуточные значения с существенными отличиями от значения базиса и крыла металлических брекетов.

Обсуждение

Два металлических брекета (In-Ovation L и STb) показывают только микроструктурные различия между друг с другом с Incognito, отмечая существенные различия с железными брекетами в микроструктуре, химическом составе и механических свойствах. Как структуры двух

частей, брекеты In-Ovation L и STb состоят из различных сплавов в области крыла и базиса. Для обоих брекетов элементный состав сплавов, используемых для основы, соответствует номинальному составу (% мас: Fe: баланс, Mn: 2,0, Cr: 16–18, Ni: 10–14, Mo: 2–3, и записи P, S, В и С) из аустенитной нержавеющей стали AISI 316 сплава (Darabara др, 2007), а сплав на крыле подходит в пределах мартенситного упрочнения сплава нержавеющей стали с номинальным составом: % мас. Fe: Баланс, Cr: 15–17,5Cr, Ni: 3–5, Cu: 3–5, Si: 1, Mn:1 и записи 2 P, S, В и С (Siargos др, 2007). Сплавы, используемые для изготовления основания не показывают средний атомный контраст и, таким образом, характеризуются как однофазные сплавы. С другой стороны, несмотря на сходство их элементного состава, сплавы крыла демонстрируют совершенно разные микроструктуры-открытие, которое, вероятно, ведет к изменениям в термической обработке для достижения дисперсионного затверждения. Тем не менее, термомеханическая история сплавов не доступна, так как она остается собственностью и, следовательно, дальнейшие гипотезы или предложение механизмов не могут быть предоставлены. Кроме того, полная характеристика различных фаз требует дальнейшего анализа с TEM/EDX, XRD и других передовых экспериментальных тестирований.

Различия, которые были очевидны между основанием и крылом для брекетов In-Ovation L и STb, являются фактом, что это соответствует предыдущим исследованиям для двух частей брекетов (Eliades др., 2003, Zinelis и др., 2003, Gioka и др., 2004).

В принципе концепция, что поверхность в контакте с дугой должна быть достаточно плотной, чтобы минимизировать упругую деформацию и, одновременно, достаточно жесткой, чтобы противостоять износу от нагрузок, генерируемых активированной дугой. С другой стороны, часть в контакте с эмалью должна быть легко деформируема, чтобы облегчить удаление брекета после окончания ортодонтического лечения (Eliades и др., 2008). Два стальных брекета следуют этой концепции как для твердости, так и для модуля упругости. Результаты твердости очень близки к ранее упомянутым значениям твердости, с того же сплава, используемого для изготовления деталей крыла (Darabara и др., 2007). Тем не менее, предыдущие данные для модуля упругости не доступны в литературе.

Incognito — это цельный брекеты с той же структурой в области крыла и базиса, который производится путем литья (Wiechmann, 2002). Анализ микроструктуры показал, что Incognito состоит из трех различных фаз и, следовательно, увеличивается опасение для возможного гальванического действия, которое может также применяться в качестве основания для In-Ovation L. Предыдущие исследования показали, что большое несоответствие в Ecorr (потенциал коррозии) может вызвать гальваническое действие, по крайней мере, в экспериментальных условиях (Siargos и др., 2007). Таким образом, важно охарактеризовать трехфазовую структуру этих двух брекетов, которые могут быть прилаживаемыми к микросегрегации явления или перитектических преобразований в процессе затвердевания. Аспект корро-

Таблица 1.

Количественные результаты после рентгеновского энергодисперсионного спектроскопического анализа. Среднее значение трех измерений. Стандартные отклонения (SD) меньше, чем 0,4 для всех элементов тестирования. Стандартные отклонения не показаны. W, крыло; B, основание

Brackets	Location	Fe	Cr	Ni	Cu	Mo	Mn	Si	Al	Au	Ag	Pt	Zn
Incognito	W/B				21.3			0.5		57.9	13.1	6.5	0.5
In-Ovation L	W	72.1	17.7	4.1	4.1		0.8	1.0	0.2				
	B	65.4	18.4	11.2	0.3	2.3	0.9	0.6	0.2				
STb	W	74.3	16.4	4.1	3.9		1.0	0.4					
	B	66.3	17.8	10.9	0.3	2.2	1.5	0.7	0.2				

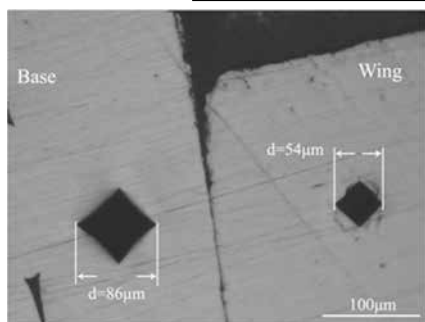


Рис. 2. Поперечное сечение изображения, иллюстрирующее отклик отступа на мягком основании и твердых сплавах крыла. Интерфейс между двумя частями также легко показан, в среднем 100 мкм (Bar)

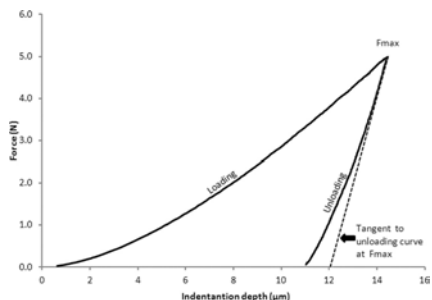


Рис. 3. Кривая глубины форс-отступа протестированных брекетов погрузочно-разгрузочного цикла. Касательная к кривой разгрузки при максимальном усилии (F_{max}) также показана пунктирной линией

зионной стойкости в гальваническом действии между сплавом на основе Au и Ni-Ti, безусловно, является интересным предложением для дальнейших исследований.

Это первый раз, когда тест инструментального отступа (ИТ) применяется для ортодонтических сплавов. Эта методика является развитием традиционной твердости, где только одно измерение может быть извлечено. С другой стороны, в ИТ, сила и глубина проникновения контролирует-

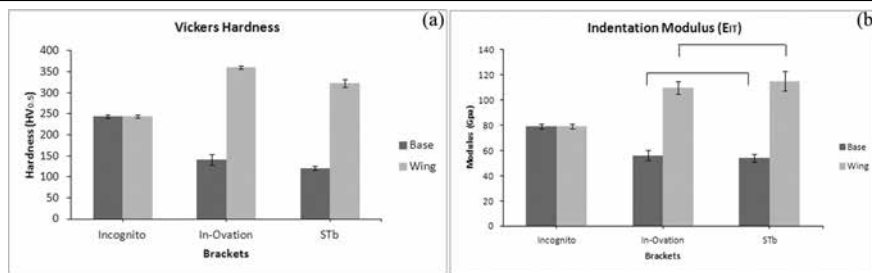


Рис. 4. Графики, показывающие твердость по Виккерсу (а) и модуль отступа (В) для всех протестированных брекетов. Такие же средние значения и стандартные отклонения были приложены к Incognito для области базиса и крыла, так как у него цельная структура. Связывающие линии означают средние значения без статистически значимых различий ($p>0,05$)

ся в течение всего времени, что индентор находится в контакте с образцом (рис. 3). Хотя ИТ чаще используется для измерения модуля Юнга и твердости, дополнительные механические свойства могут быть измерены, например, отступы ползучести, отступы релаксации, пластиковые и эластичные части отступа работы, тщательно представленной в ISO 14577-1. Большим преимуществом этого метода является то, что стоматологические устройства могут быть проверены в качестве конечных продуктов, минуя необходимость для стандартных образцов (т.е. образцы гантель для испытаний на растяжение, прямоугольных полос для изгибания, и т.д.) и таким образом, предполагается, что этот метод будет находить множество применений в механических характеристиках собственности в области стоматологии.

Клинические последствия этого исследования двукратны. Во-первых, это имеет дело с различиями в механических свойствах, во время как другое относится к коррозионной стойкости в гальваническом действии системы брекет-дуга в целом. Incognito представляет более низкий модуль, что означает более низкое сопротивление в упругой деформации при тех же напряжениях, по сравнению с черными

сплавами и одновременно низкую износостойкость к разведению и скольжению. Жесткость дуг Ni-Ti составляет от 300 до 430 HV (Darabara др., 2007), в то время как дуги из нержавеющей стали могут быть до 600 HV (Hunt и др., 1999). Более жесткие дуги оставляют след в мягком пазах брекета и результат износа, предположительно, принимает некоторые активации дуги и увеличение трения (Eliades, 2011).

Результаты этого исследования показали, что брекеты, которые проходят тестирования, имеют существенные различия в элементном составе, микроструктуре и механических свойствах, которые потенциально могли бы повлиять на их клиническую эффективность.

Выводы

- Брекеты Incognito и основание брекетов In-Ovation L являются многофазными сплавами.
- Существуют значительные различия в микроструктуре, элементном составе и механических свойствах среди протестированных брекетов; они могут иметь ряд клинических проявлений во время механотерапии.

Перевод: М. В. Мижуря.

Резюме

Цели: Изучить состав, микроструктуру и механические характеристики трех различных видов лингвальных брекетов.

Материалы и методы: Лингвальные брекеты Incognito™ (3M Unitek), In-Ovation L (DENTSPLY GAC) и STb™ (Light Lingual System, ORMCO) изучались под сканирующим электронным микроскопом с использованием электронов изображений обратного рассеяния и их элементный состав анализировали энергодисперсионным рентгеновским микроанализом. Кроме того, твердость по Виккерсу оценивали с помощью универсальной машины для определения твердости, и модуль отступа измеряли в соответствии с инструментальным измерением отступа. Как дискриминационная переменная проводился двусторонний дисперсионный анализ с учетом вида и расположения брекета (основание и крыло). Существенные различия между группами были определены после специального сравнительного анализа Student-Newman-Keuls при 95%-ном уровне значимости.

Результаты: Определено три разные фазы для брекетов Incognito и In-Ovation L на основе среднего атомного числа отличий. С другой стороны, брекеты STb не показали среднюю атомную область отличий и, таким образом, это определено в виде одной фазы. Incognito это цельный брекеты с такой же структурой крыла и основания. Incognito состоит в основном из благородных металлов, в то время как у брекетов In-Ovation L и STb наблюдаются аналогичные формулировки черных сплавов в крыле и основании. Не нашлось никаких существенных различий между металлическими брекетами в твердости и модуле значений, однако существуют значительные различия между крылом и основанием. У Incognito наблюдаются промежуточные значения с существенными отличиями от значений базиса и крыла металлических брекетов.

Выводы: Существуют значительные различия в микроструктуре, элементном составе и механических свойствах среди протестированных брекетов; они могут иметь ряд клинических проявлений во время механотерапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darabara M S, Bourithis L I, Zinelis S, Papadimitriou G D 2007 Metallurgical characterization, galvanic corrosion, and ionic release of orthodontic brackets coupled with Ni-Ti archwires. Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials 81: 126-134
2. Demling A, Demling C, Schweska-Polly R, Stiesch M, Heuer W 2009 Influence of lingual orthodontic therapy on microbial parameters and periodontal status in adults. European Journal of Orthodontics 31: 638-642
3. Doshi U H, Bhad-Patil W A 2011 Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics 139: 74-79
4. Eliades T 2011 Dental materials in orthodontics. In: Graber L W, Vanarsdall R L Jr, Vig K W L (ed.) Orthodontics: Current Principles and Techniques. Mosby, St. Louis, pp. 1023-1038

Полный список литературы находится в редакции.