

Экспериментальное исследование факторов, влияющих на поломку циклического характера у ротационных эндодонтических инструментов

Девятникова В.Г.

Манак Т.Н.

Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет» Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Актуальность. Присущие никель-титановым инструментам свойства памяти формы, сверхэластичности и пластичности делают визуальный прогноз их поломки максимально затрудненным. Поэтому важная роль отводится исследованиям, целью которых является прогнозирование времени их работы и выделение основных факторов, влияющих на вероятность фактуры. **Цель.** Сравнение устойчивости к циклической усталости Ni-Ti ротационных эндодонтических инструментов различных производителей. **Материалы и методы.** Исследование влияния процедуры автоклавирования и угла изгиба корневого канала на устойчивость вращающегося эндодонтического инструмента к циклическим нагрузкам проводили при помощи авторского запатентованного устройства, имитирующего вращение инструмента в реальном канале, фиксировали количество циклов совершенных каждым инструментом до его поломки. Исследовалась морфология изломов, микроструктура образцов под изломами и микротвердость образцов эндодонтических инструментов после испытаний. **Результаты.** Установлено, что устойчивость к усталостным разрушениям инструментов различных эндодонтических систем уменьшается с увеличением угла изгиба корневого канала. У инструментов системы Endostar E3 Basic Rotary System количество циклов снизилось в 1,2 раза, у инструментов системы Protaper Universal в 2,9 раз. У инструментов системы Protaper Next количество циклов при угле изгиба искусственного корневого канала 60 градусов снизилось в 1,5 раз по сравнению с количеством циклов при угле изгиба 45 градусов. В то же время, статистические данные и изучение микроструктуры образцов новых и прошедших 6 циклов автоклава инструментов не показали связи между процедурой автоклавирования и снижением их устойчивости к циклическим нагрузкам. **Выводы.** При работе в сложных изогнутых более чем 45° каналах рационально выбирать эндодонтический инструмент, прошедший термообработку на этапе производства (в рамках данного исследования это был Protaper Next 25/06 сплав M-Wire). Это снизит вероятность фактуры инструмента и вызванных ей опасных осложнений эндодонтического лечения.

Ключевые слова: циклическая усталость, автоклавирование, никель-титановые инструменты, механическая обработка.

Для цитирования: Девятникова В.Г., Манак Т.Н. Экспериментальное исследование факторов, влияющих на поломку циклического характера у ротационных эндодонтических инструментов. *Эндодонтия today*. 2020; 18(1):4-14. DOI: 10.36377/1683-2981-2020-18-1-4-14.

Experimental study of factors affecting the failure of the cyclical nature of rotary endodontic instruments

V.G. Deviatnikova

T.N. Manak

The Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

Relevance. The properties of shape memory, superelasticity and plasticity in nickel-titanium tools make the visual prediction of breakage as difficult as possible. Therefore, an important role is given to research, the purpose of which is to predict the time of their work and to identify the main factors affecting the probability of a fracture. **Aim.** Comparison of cyclic fatigue resistance of Ni-Ti rotary endodontic instruments of various manufacturers. **Materials and methods.** The influence of the autoclaving procedure and the angle of bending of the root canal on the resistance of a rotating endodontic instrument to cyclic loads was studied using an author's patented device that simulates the rotation of an instrument in a real channel; the number of cycles completed by each instrument before its fracture was recorded. The morphology of fractures, the microstructure of specimens under fractures, and the microhardness of specimens of endodontic instruments after testing were studied. **Results.** It has been established that resistance to fatigue fractures of instruments of various endodontic systems decreases with an increase in the bending angle of the root canal. For Endostar E3 Basic Rotary System tools, the number of cycles decreased by 1.2 times, for Protaper Universal tools by 2.9 times. The tools of the Protaper Next system reduced the number of cycles at a bending angle of the artificial root canal of 60 degrees by 1.5 times compared with the number of cycles at a bending angle of 45 degrees. At the same time, statistical data and the study of the microstructure of samples of new and past 6 cycles of autoclave tools did not show a connection between the autoclaving procedure and a decrease in their resistance to cyclic loads. **Conclusions.** When working in complex bent over 45 degrees channels, it is rational to choose an endodontic instrument that has undergone heat treatment at the production stage (in the framework of this study, it was Protaper Next 25/06 M-Wire).

alloy). This will reduce the likelihood of a file fracture and associated dangerous complications of endodontic treatment.

Keywords: cyclic fatigue, autoclaving, nickel-titanium tools, machining.

For citation: V.G. Deviatnikova, T.N. Manak. Experimental study of factors affecting the failure of the cyclical nature of rotary endodontic instruments. *Endodontics today*. 2020;18(1):4-14. DOI: 10.36377/1683-2981-2020-18-1-4-14.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В современной стоматологии прохождение и формирование корневых каналов при помощи вращающихся машинных инструментов давно перешло из разряда новшеств в область рекомендованных оптимальных методов механической обработки. Никель-титановые файлы, используемые при машинной обработке корневых каналов зубов, имеют высокую степень гибкости (что даёт возможность препарировать даже каналы, изогнутые под прямым углом [1]), способны восстанавливать свою исходную форму без видимой деформации. Их физико-механические свойства обуславливают повышенную режущую активность, что позволяет с наименьшими временными и трудозатратами оптимально сформировать канал для последующей obturation, избегая нежелательных спрямлений, уступов, перфораций, потерь рабочей длины; снижают риск смещения апикального отверстия и выведения инфицированных масс за пределы корневого канала [2]. Всех перечисленные выше свойства не исключают основной риск, связанный с использованием вращающихся файлов – возможность их поломки в процессе работы в корневом канале. Обломки инструмента становятся преградой для дальнейшего качественного формирования корневого канала, его медикаментозной обработки и последующей obturation, что, в конечном итоге, может привести к потере зуба [3]. Никель-титановые ротационные инструменты ломаются не чаще аналогов из других материалов: по данным статистики, сепарация стальных инструментов в канале происходит в 1-6% случаях, а Ni-Ti инструментов – в 0,5-5% [4-6,7]. Сложность создает тот факт, что в реальных условиях прохождения канала, файл испытывает и торсионные и циклические нагрузки одновременно, т.к. более 80% каналов зубов имеют ту или иную степень искривления [8,9]. Ряд ученых сообщает о влиянии автоклавных циклов на топографию поверхности, целостность структуры поперечного сечения или элементный состав Ni-Ti эндодонтических инструментов, что может приводить к их поломке [10-12]. Существует ряд исследований, в которых связь между количеством циклов стерилизации и снижением устойчивости файлов к циклической усталости не подтверждается [13-16], а в качестве основных факторов, влияющих на снижение прочностных характеристик приводятся угол изгиба корневого канала и прочностный потенциал сплава, заложенный на этапе производства. Известно, и то, что регулирующая температуру перехода фаз (аустенит-мартенсит) в сплаве никель-титана, может изменять циклическую стойкость роторных эндодонтических никель-титановых файлов [17-19]. Противоречивые данные литературы позволяют сделать вывод о необходимости дальнейших исследований в этом направлении.

Целью данного исследования стало сравнение устойчивости к циклической усталости Ni-Ti роторных эндодонтических инструментов различных производителей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Всего в исследовании *in vitro* было использовано 216 инструментов трех различных роторных никель-ти-

тановых эндодонтических систем. Протестировано 72 инструмента системы Protaper Universal (25/07-обычный Ni-Ti) Dentsply Maillefer, 72 инструмента системы Endostar E3 Basic Rotary System (25/06-обычный Ni-Ti) POLIDENT и 72 инструмента системы Protaper Next (25/06-сплав M-Wire) Dentsply Maillefer.

Каждая система инструментов была распределена на 2 группы, в зависимости от угла изгиба искусственного корневого канала 45 (n = 36) или 60 (n = 36) градусов соответственно. В свою очередь каждая группа была разделена на три подгруппы в зависимости от количества циклов автоклавирования: 1a (n = 12) и 2a (n = 12) инструменты без автоклавирования, 1b (n = 12) и 2b (n = 12) инструменты после одного цикла автоклавирования и 1c (n = 12) и 2c (n = 12) инструменты после шести циклов автоклавирования.

Элементный состав образцов эндодонтических файлов изучен при помощи рентгеноспектрального анализатора фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания).

Испытание инструментов на циклическую усталость проводили при помощи устройства «Устройство для испытания на прочность эндодонтических инструментов» (патент на полезную модель №11885). Авторская модель, в отличие от предшественников-прототипов имеет в качестве привода шаговый двигатель. Это допускает любые вращательные движения эндодонтического инструмента в искусственно созданных искривленных каналах, позволяет измерять (фазово-импульсным методом) прикладываемый к вращающемуся эндодонтическому инструменту крутящий момент, создавать управляемую силу трения на разных расстояниях от кончика эндодонтического инструмента (что имитирует заклинивание инструмента в реальном корневом канале). Подсчет количества оборотов (циклов) до поломки дает возможность выявлять инструменты с низким пределом прочности и упругости и прогнозировать их рабочий ресурс.

Устройство работает следующим образом (см. Рис. 1). Эндодонтический инструмент (22) закрепляют в оправке (20) посредством винта (21). Рабочую часть инструмента вводят в искривленный канал (23) металлического имитатора (24). Металлический имитатор искривленного канала (24) выполнен в двух модификациях: с полным искривленным каналом на всю длину рабочей части инструмента и с укороченной длиной искривленного канала, чтобы кончик инструмента (27)

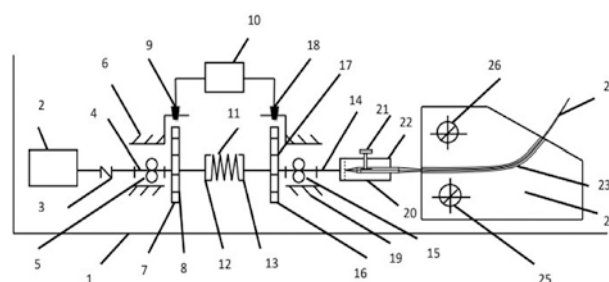


Рис. 1. Конструкции устройства для испытания эндодонтических инструментов на прочность

Fig. 1. Design of a device for testing of the endodontic instrument strength

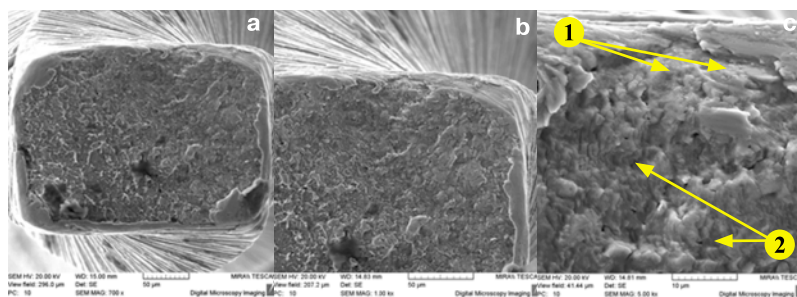


Рис. 2. Микроструктура излома образца ProTaper Next
 а – общий вид; б, с – очаг разрушения;
 1 – полосы скольжения; 2 – микроскопические
 выступы и впадины

Fig. 2. Microstructure of the ProTaper Next sample fracture
 а – general view; б, с – the center of destruction;
 1 – slip strip; 2 – microscopic protrusions and depressions

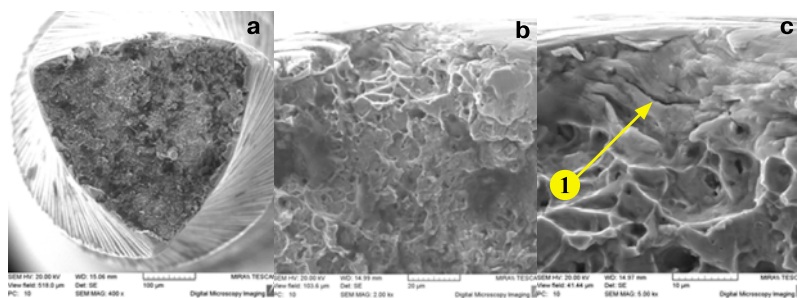


Рис. 3. Микроструктура излома образца ProTaper Universal

а – общий вид;
 б-д – очаги разрушения;
 1 – полосы скольжения;
 2 – микроскопические
 выступы и впадины

Fig. 3. Microstructure of the ProTaper Universal sample fracture

а – eneral view; б-д – foci of destruction;
 1 – slip strip; 2 – microscopic protrusions and depressions

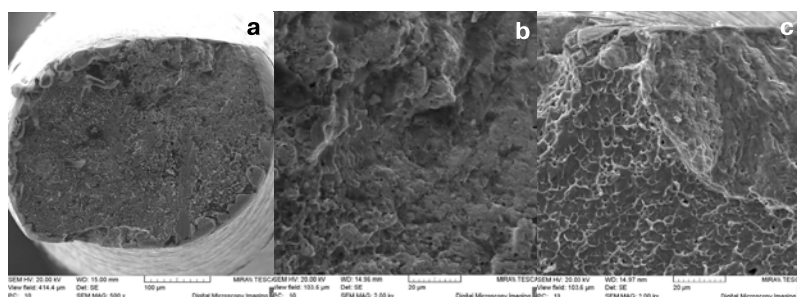


Рис. 4. Микроструктура излома образца Endostar E3 Basic Rotary System

а – общий вид;
 б-д – очаги разрушения;
 1 – полосы скольжения; 2 –
 микроскопических выступов и впадин

Fig. 4. Microstructure of the Endostar E3 Basic Rotary System sample fracture

а – general view; б-д – foci of destruction;
 1 – slip strip; 2 – microscopic protrusions and depressions

выступал. Испытания инструмента в металлическом имитаторе с искривленным каналом на полную длину инструмента производят для оценки прочности инструмента при циклических изгибных деформациях (ресурсные испытания на усталость). Для этого включают вращение шагового двигателя (2) вращение посредством муфты (3) передается валу (4) посредством упругого элемента (11) работающего на кручение и передает вращение валу (14), вращающему оправку (20), несущую инструмент (22) и в свободном вращении инструмента вне искривленного канала, оба диамагнитных диска (7) и (16) с ферромагнитными вставками (8,17) создают электрические импульсы посредством взаимодействия чувствительной части индуктивных преобразователей с ферромагнитными вставками (8,17). Так как крутящий момент в данном случае постоянный – это незначительные потери на трение во вращающихся элементах, то это является базой для отсчета крутящего момента при всех режимах его изменения во время испытания. Формируемые электронным блоком (10) импульсы от ферромагнитных вставок (8, 17) на диамагнитных дисках (7,16) сдвинуты по фазе на очень малую величину потерь на трение. В электронном блоке этот сдвиг может быть отрегулирован в «0». При введении инструмента в изогнутый канал крутящий момент резко возрастает, упругий элемент (11) закручивается на больший угол что приводит к значительному увеличению сдвигу фаз между импульсами. При поломке инструмента сдвиг фаз стремится к «0». Таким образом, можно проследить динамику изменения крутящего момента до поломки. При вращении инструмента в имитаторе искривленного канала с укороченным каналом, кончик инструмента зажимается между двумя фрикционными накладками. Величину создаваемого трения в таком случае определяют по величине сдвига фаз. Далее вращают до поломки кончика инструмента. Количество оборотов до поломки (ресурс) определяют по величине уменьшения сдвига фаз, т.е. крутящего момента. Таким образом, данное устройство может служить для самого широкого спектра исследований прочностных характеристик вращающегося эндодонтирующего.

В рамках текущего исследования каждый инструмент вращался в имитаторе корневого канала при температуре 37 градусов до разрушения, исследование морфологии изломов эндодонтических инструментов с целью подтверждения их циклического характера проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия). После этого фиксировали количество циклов, совершенных каждым инструментом до его поломки.

Дополнительно было проведено исследование микроструктуры под излома-

Таблица 1. Количество циклов до поломки исследуемых эндодонтических систем при различных углах вращения

Table 1. The number of cycles before failure of the studied endodontic systems at various rotation angles

Группы	Количество циклов при угле 45 градусов, n=36	Количество циклов при угле 60 градусов, n=36
Endostar E3 Basic Rotary System	530[500;660]	445[420;500]
Protaper Universal	955[800;1175]	330[270;360]
Protaper Next	2235[2005;2300]	1500[1480;1535]

ми и микротвердости образцов эндодонтических инструментов после испытаний. Исследование структуры проводили на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении $\times 100$, $\times 500$. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 100г. по ГОСТ 9450-76. Перевод чисел микротвердости в твердость по Роквеллу осуществлялся по таблице ASTM. Погрешность перевода до ± 3 ед. HRC.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета прикладных программ Statistica10.0 для Windows (StatSoftInc, США). Анализ типа распределения количественных переменных выполнен с использованием критерия Шапиро-Уилка с учетом описательных характеристик, коэффициента асимметрии и гистограмм распределения. Количественные данные описывались в виде медианы и квартилей (Me [Q1; Q3]). Для оценки различий количественных переменных применялись критерии Краскела-Уоллиса, Манна-Уитни, поправка Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируя морфологию изломов образцов (рисунки 2-4) после разрушения можно сделать вывод о том, что поломка эндодонтических инструментов произошла в результате циклической усталости сплава металла. На рисунках 3в, 4в, г, 5г присутствуют микропластичные деформации сдвига некоторых зёрен металла (при этом на поверхности зёрен видны полосы скольжения (стрелка 1) и скопления сдвигов (которые на некоторых материалах проявляется в виде микроскопических выступов и впадин – экструзий и интрузий (стрелка 2)).

Данный процесс усталостного разрушения структуры никель-титана обусловлен дефектами кристаллической решётки, возникающими в процессе многочисленных циклов сжатие-растяжение. Это приводит к концентрации напряжений, и последующим микропластичным деформациям сдвига зёрен металла (появление полос скольжения) и скопления сдвигов (экструзий и интрузий), как это представлено на рисунках 6-8. Далее сдвиги растут и срачиваются, что ведет к появлению активных макротрещин, по мере разрастания которых, поперечное сечение файла всё более ослабляется, и в конце концов происходит разрушение инструмента.

Количество циклов, совершенных каждым инструментом до его поломки при различных углах вращения представлено в таблице 1.

Различия по количеству циклов при углах 45 и 60 градусов во всех группах по критерию Манна-Уитни статистически значимы (Endostar E3 Basic Rotary

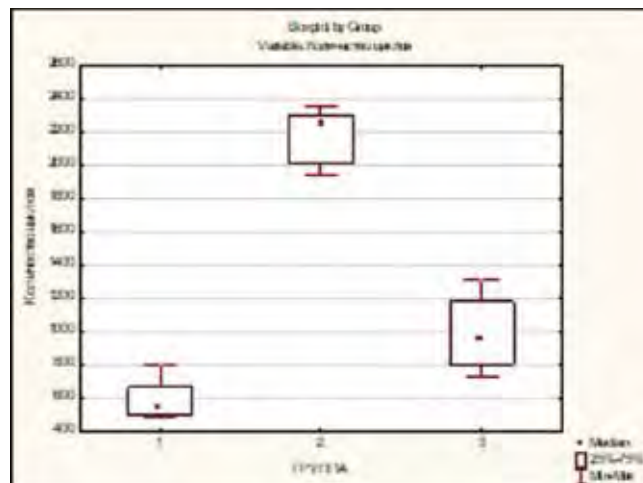


Рис. 5.- Сравнение исследуемых групп при угле вращения 45 градусов

Fig. 5.- Comparison of the studied groups at the rotation angle of 45 degrees

System U = 99,0, $p < 0,001$; Protaper Universal U = 99,0, $p < 0,001$; Protaper Next U = 99,0, $p < 0,001$).

Различия между тремя группами инструментов по количеству циклов при 45 градусах статистически значимы по критерию Краскела-Уоллиса $H = 93,565$, $df = 2$, $p < 0,001$).

Различия по количеству циклов при угле 45 градусов между группами инструментов Endostar E3 Basic Rotary System и Protaper Next ($U = 0$, $p < 0,001$), Endostar E3 Basic Rotary System и Protaper Universal ($U = 23,5$, $p < 0,001$), а также между группами инструментов Protaper Next и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы (Рис. 5).

Различия между тремя группами инструментов по количеству циклов при 60 градусах статистически значимы по критерию Краскела-Уоллиса $H = 86,647$, $df = 2$, $p < 0,001$).

Различия по количеству циклов при угле 60 градусов между группами инструментов Endostar E3 Basic Rotary System и Protaper Next ($U = 0$, $p < 0,001$), Endostar E3 Basic Rotary System и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$), а также между группами инструментов Protaper Next и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы (рисунок 6).

Измерения показателя «количество циклов» для инструментов системы Endostar E3 Basic Rotary System при углах 45 и 60 градусов в зависимости от количества циклов автоклавирования не выявлено статистически значимых различий между подгруппами (по критерию Краскела-Уоллиса $H = 0,4153625$, $df = 2$, $p = 0,8125$ и $H = 0,1563245$, $df = 2$, $p = 0,9248$ соответственно). Результаты измерений представлены в таблице 2 и на рисунке 7.

В свою очередь, различия в группах «количество циклов без автоклавирования» при 45 и 60 градусах (по критерию Манна-Уитни $U = 10,5$, $p < 0,001$), «количество циклов с 1 циклом автоклавирования» при 45 и 60 градусах ($U = 7$, $p < 0,001$) статистически значимы, а в в группах «количество циклов после 6 раз автоклавирования» ($U = 0$, $p < 0,001$) не было выявлено статистически значимых различий.

Измерения показателя «количество циклов» для инструментов системы «Protaper Next» при углах 45 и 60 градусов в зависимости от количества циклов автоклавирования не выявлено статистически значимых различий.

Таблица 2. Количество рабочих циклов инструмента Endostar E3 Basic Rotary System в зависимости от угла изгиба и процедуры автоклавирования

Table 2. The number of operating cycles of the Endostar E3 Basic Rotary System depending on the bending angle and autoclaving procedure

Endostar 45°	Me[Q1;Q3]	Min:Max	Endostar 60°	Me[Q1;Q3]	Min:Max
1a (без автоклавирования)	552,5[500;660]	480:795	2a (без автоклавирования)	442,5[420;482,5]	365:510
1b (1 цикл автоклавирования)	525[512,5;605]	500:790	2b (1 цикл автоклавирования)	447,5[415;482,5]	360:515
1c (6 циклов автоклавирования)	525[500;655]	480:780	2c (6 циклов автоклавирования)	450[430;500]	380:510

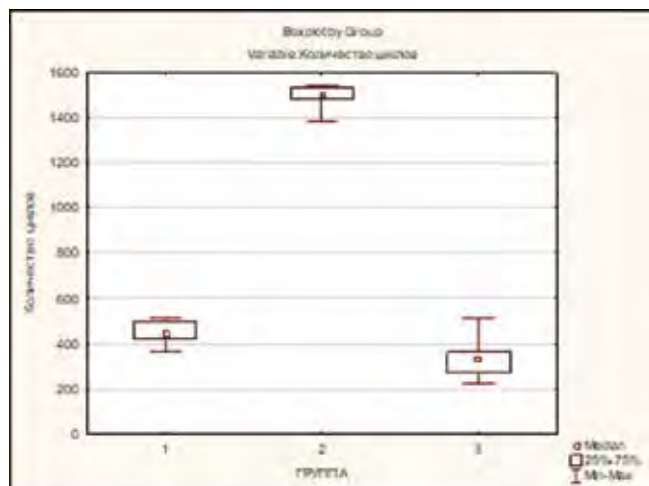


Рис. 6. - Сравнение исследуемых групп при угле вращения 60 градусов

Fig. 6. - Comparison of the studied groups at the rotation angle of 60 degrees

различий между подгруппами: по критерию Краскела-Уоллиса $H = 0,1879276$, $df = 2$, $p = 0,9103$ и $H = 4,232421$, $df = 2$, $p = 0,1205$ соответственно (таблица 3, рисунок 8).

В то же время, различия в группах «количество циклов без автоклавирования» при 45 и 60 градусах (по критерию Манна-Уитни $U = 0$, $p < 0,001$), «количество циклов с 1 циклом автоклавирования» при 45 и 60 градусах ($U = 0$, $p < 0,001$) и в группах «количество циклов после 6 раз автоклавирования» ($U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы.

Измерения показателя «количество циклов» для инструментов системы «Protaper Universal» при углах 45 и 60 градусов в зависимости от количества циклов автоклавирования не выявлено статистически значимых различий между подгруппами: по критерию Краскела-Уоллиса $H = 0,3786737$, $df = 2$, $p = 0,8275$ и $H = 1,001024$, $df = 2$, $p = 0,6062$ соответственно (таблица 4, рисунок 9).

Различия в группах «количество циклов без автоклавирования» при 45 и 60 градусах ($U = 0$, $p < 0,001$), «количество циклов с 1 циклом автоклавирования» при 45 и 60 градусах ($U = 0$, $p < 0,001$) и в группах «количество циклов после 6 раз автоклавирования» ($U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы.

При множественных сравнениях 3 групп инструментов (Endostar, Protaper Next и Protaper Universal) между собой по показателю количество циклов без автоклавирования при углах 45 и 60 градусов установлены статистически значимые различия: $H = 30,55899$, $df = 2$, $p < 0,001$ и $H = 28,47203$, $df = 2$, $p < 0,001$ соответственно (рисунок 10).

Различия по переменной «количество циклов без автоклавирования» при углах 45 и 60 градусов между группами Endostar и Protaper Next ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$,

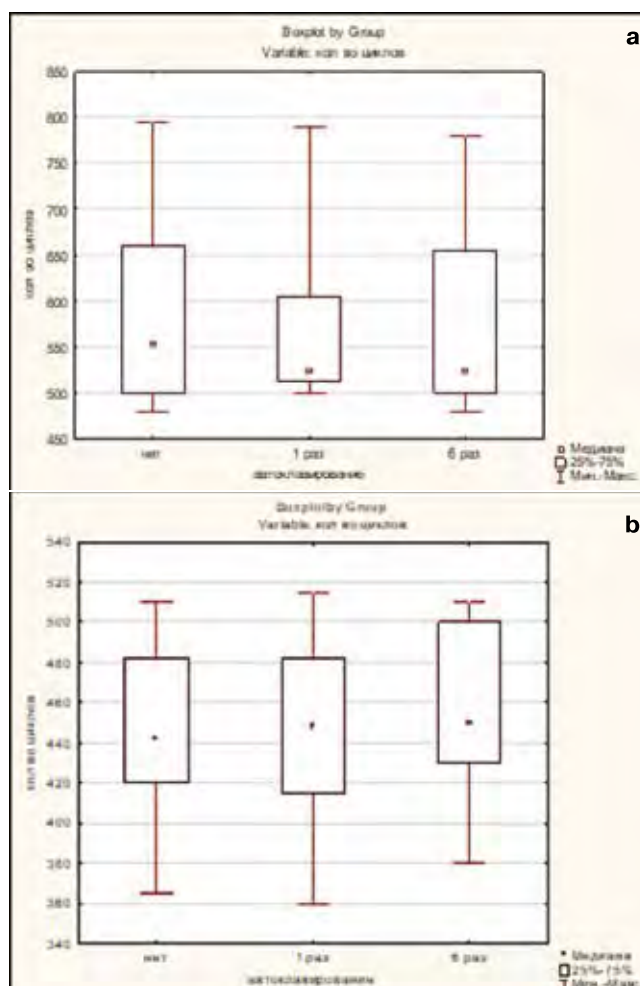


Рис. 7. Количество циклов инструмента Endostar E3 Basic Rotary System в зависимости от процедуры автоклавирования: а – при изгибе 45° б – при изгибе 60°. Статистически значимые различия внутри каждой из групп не выявлены. Различия между группами статистически значимы.

Fig. 7. The number of cycles of the Endostar E3 Basic Rotary System tool depending on the autoclaving procedure: а – at a bend of 45° б – at a bend of 60°. No statistically significant differences were found within each group. Differences between groups are statistically significant.

$p < 0,001$), между группами Poldent и Protaper Universal ($U = 3,0$, $p < 0,001$; $U = 14,0$, $p < 0,001$), а также между группами Protaper Next и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы.

При множественных сравнениях 3 групп (Endostar, Protaper Next и Protaper Universal) инструментов между собой по показателю количество циклов при автокла-

Таблица 3. Количество рабочих циклов инструмента Protaper Next в зависимости от угла изгиба и процедуры автоклавирования

Table 3. The number of operating cycles of the Protaper Next tool depending on the bending angle and the autoclaving procedure

Protaper Next 45°	Me[Q1;Q3]	Min:Max	Protaper Next 60°	Me[Q1;Q3]	Min:Max
1a (без автоклавирования)	2235[2030;2300]	1940:2350	2a (без автоклавирования)	1517,5[1495;1535]	1380:1540
1b (1 цикл автоклавирования)	2220[1990;2290]	1940:2350	2b (1 цикл автоклавирования)	1500[1480;1532,5]	1480:1540
1c (6 циклов автоклавирования)	2250[1995;2300]	1960:2320	2c (6 циклов автоклавирования)	1485[1475;1507,5]	1380:1535

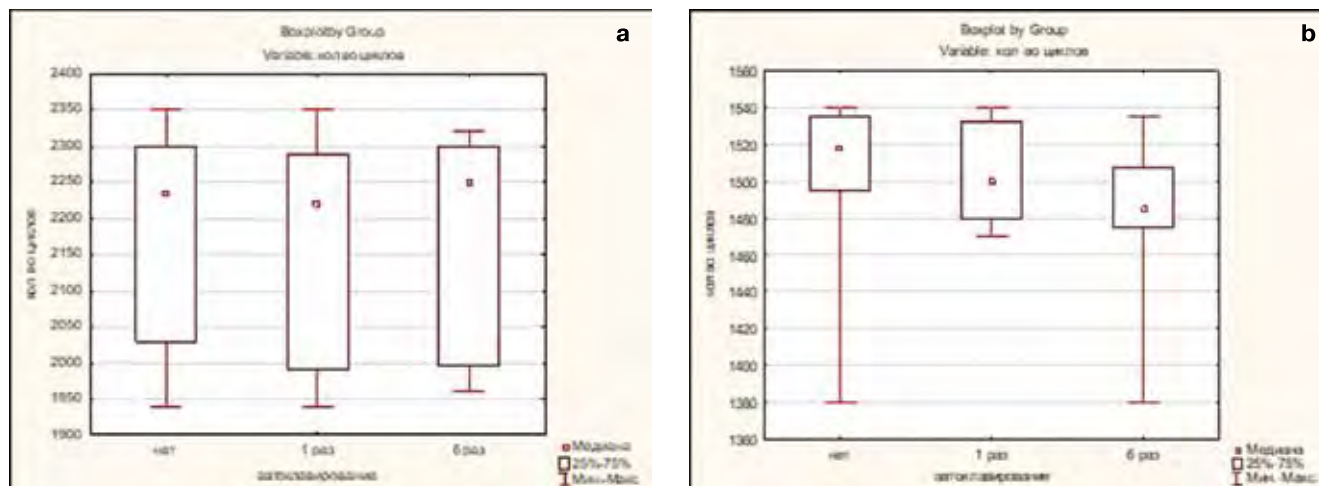


Рис. 8. Количество циклов инструмента Protaper Next в зависимости от процедуры автоклавирования: а – при изгибе 45°, б – при изгибе 60°. Статистически значимые различия внутри каждой из групп не выявлены. Различия между группами статистически значимы.

Fig. 8. The number of cycles of the Protaper Next tool depending on the autoclaving procedure: а – at a bend of 45°, б – at a bend of 60°. No statistically significant differences were found within each group. Differences between groups are statistically significant.

Таблица 4. Количество рабочих циклов инструмента Protaper Universal в зависимости от угла изгиба и процедуры автоклавирования

Table 4. The number of operating cycles of the Protaper Universal tool depending on the bending angle and the autoclaving procedure

Protaper Universal 45°	Me[Q1;Q3]	Min:Max	Protaper Universal 60°	Me[Q1;Q3]	Min:Max
1a (без автоклавирования)	907[800;1105]	720:1310	2a (без автоклавирования)	300[265;347]	220:515
1b (1 цикл автоклавирования)	945[800;1130]	720:1300	2b (1 цикл автоклавирования)	330[275;395]	220:500
1c (6 циклов автоклавирования)	962[800;1210]	760:1310	2c (6 циклов автоклавирования)	337,5[280;360]	220:490

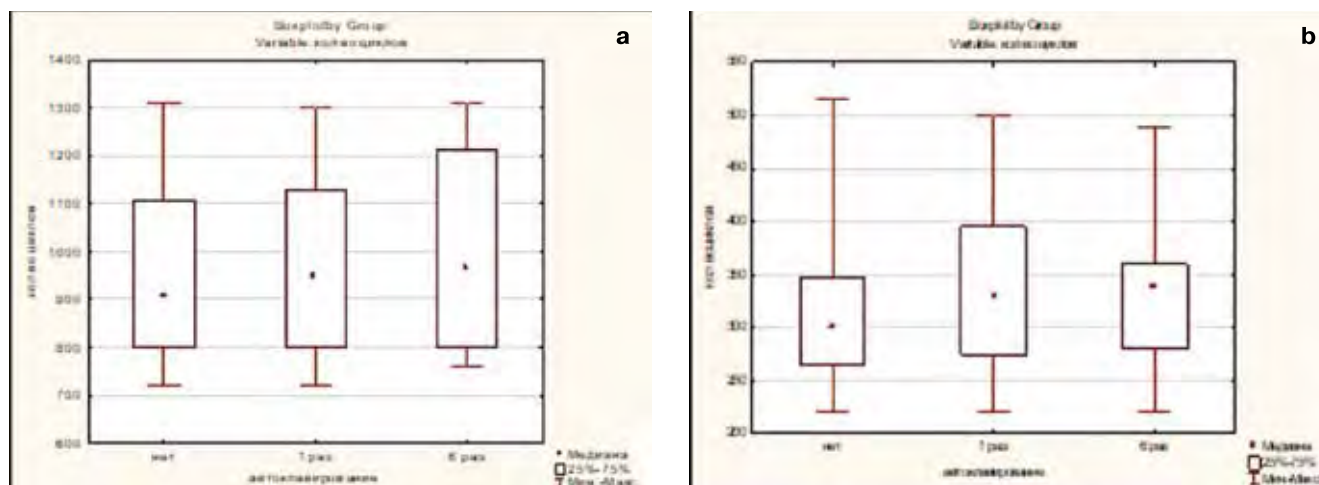


Рис. 9. Количество циклов инструмента Protaper Universal в зависимости от процедуры автоклавирования: а – при изгибе 45°, б – при изгибе 60°. Статистически значимые различия внутри каждой из групп не выявлены. Различия между группами статистически значимы.

Fig. 9. The number of cycles of the Protaper Universal tool depending on the autoclaving procedure: а – at a bend of 45°, б – at a bend of 60°. No statistically significant differences were found within each group. Differences between groups are statistically significant.

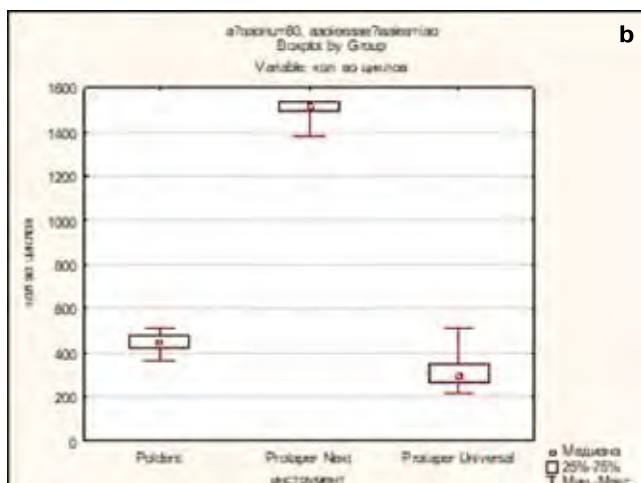
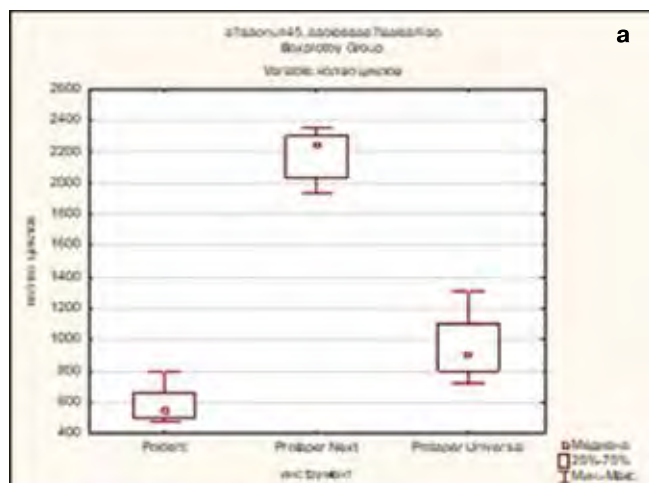


Рис. 10. Количество циклов инструментов Endostar, ProtaperNext и Protaper Universal без автоклавирования: а – при изгибе 45°, б – при изгибе 60°. Различия статистически значимы.

Fig. 10. The number of cycles of the Endostar, ProtaperNext and Protaper Universal tools without autoclaving: а – at a bend of 45°, б – at a bend of 60°. The differences are statistically significant.

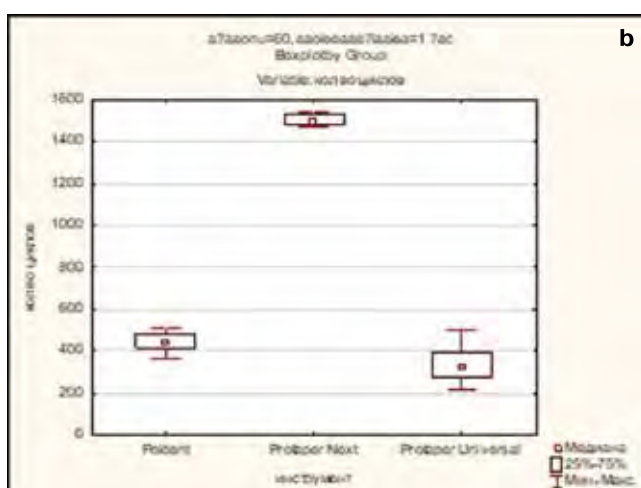
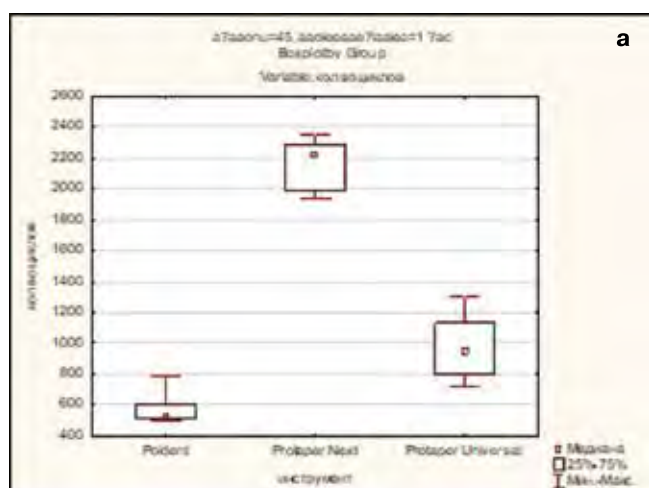


Рис. 11. Количество циклов инструментов Poldent, ProtaperNext и Protaper Universal после 1 цикла автоклавирования: а – при изгибе 45°, б – при изгибе 60°. Различия статистически значимы.

Fig. 11. The number of cycles of Poldent, ProtaperNext and Protaper Universal tools after 1 autoclaving cycle: а – at a bend of 45°, б – at a bend of 60°. The differences are statistically significant.

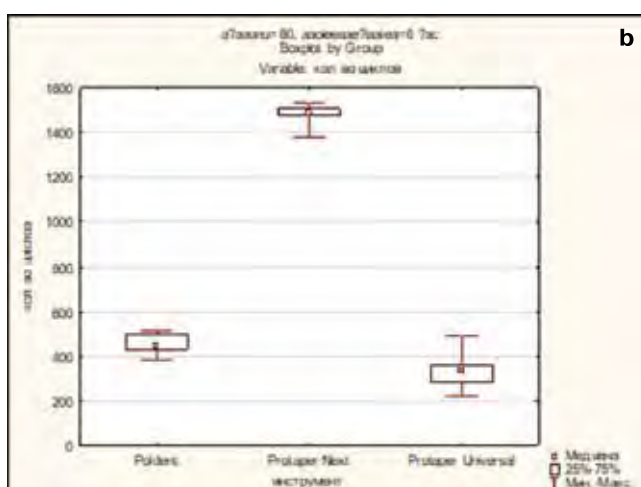


Рис. 12. Количество циклов инструментов Endostar, ProtaperNext и Protaper Universal после 6 циклов автоклавирования: а – при изгибе 45°, б – при изгибе 60°. Различия статистически значимы.

Fig. 12. The number of cycles of the Endostar, ProtaperNext and Protaper Universal tools after 6 autoclaving cycles: а – at a bend of 45°, б – at a bend of 60°. The differences are statistically significant.

вировании 1 раз при углах 45 и 60 градусов установлены статистически значимые различия: $H = 30,53930$, $df = 2$, $p < 0,001$ и $H = 27,88296$, $df = 2$, $p < 0,001$ соответственно (рисунок 11).

Различия по переменной "количество циклов при автоклавировании 1 раз" при углах 45 и 60 градусов между группами Endostar и Protaper Next ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$, $p < 0,001$), между группами Endostar и Protaper Universal ($U = 3,0$, $p < 0,001$; $U = 17,5$, $p < 0,001$), а также между группами Protaper Next и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы.

При множественных сравнениях 3 групп (Endostar, Protaper Next и Protaper Universal) инструментов между собой по показателю количество циклов при автоклавировании 6 раз при углах 45 и 60 градусов установлены статистически значимые различия: $H = 30,86185$, $df = 2$, $p < 0,001$ и $H = 28,74844$, $df = 2$, $p < 0,001$ соответственно (рисунок 12).

Различия по переменной «количество циклов при автоклавировании 6 раз» при углах 45 и 60 градусов между группами Endostar и Protaper Next ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$, $p < 0,001$), между группами Poldent и Protaper Universal ($U = 1,5$, $p < 0,001$; $U = 12,5$, $p < 0,001$), а также между группами Protaper Next и Protaper Universal ($U = 0$, $p < 0,001$; $U = 0$, $p < 0,001$) статистически значимы.

Полученные данные подтверждаются исследованием микроструктуры образцов при помощи светового микроскопа «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении $\times 100$, $\times 500$ и измерением микротвердости на микротвердомере «Micromet-II».

Микроструктура образцов представляет собой γ -твердый раствор с частицами упрочняющей фазы типа Ni_3Ti . Изменения микроструктуры в зависимости от автоклавирования образцов не наблюдается.

Фотографии микроструктур представлены на рисунках 13-15.

ОБСУЖДЕНИЕ

Микротвердость образцов также не меняется и находится в диапазоне 270-290 кгс/мм² (26-29 HRC), что свидетельствует об отсутствии разупрочняющих процессов в материале при воздействии автоклава.

Было установлено, что наибольшую устойчивость к циклическим нагрузкам имеют инструменты, сплав которых прошел специальную термическую обработку (сплав M-wire), инструменты из такого сплава показывают статистически значимо большее количество циклов до поломки по сравнению с обычным сплавом Ni-Ti. Именно их рационально выбирать при работе в сложных, изогнутых под большим углом каналах. Так при угле изгиба 45 градусов наибольшее количество циклов до поломки наблюдали у инструментов системы Protaper Next 2235[2005;2300], что на 57% и на 76,3% больше по сравнению с инструментами систем Protaper Universal и Endostar E3 Basic Rotary System соответственно. Так при угле изгиба искусственного корневого канала 60 градусов также наибольшей устойчивостью к циклической усталости обладают инструменты системы Protaper Next. Количество циклов до поломки составило 1500[1480;1535], что в свою очередь на 78% и на 70,4% больше по сравнению с инстру-

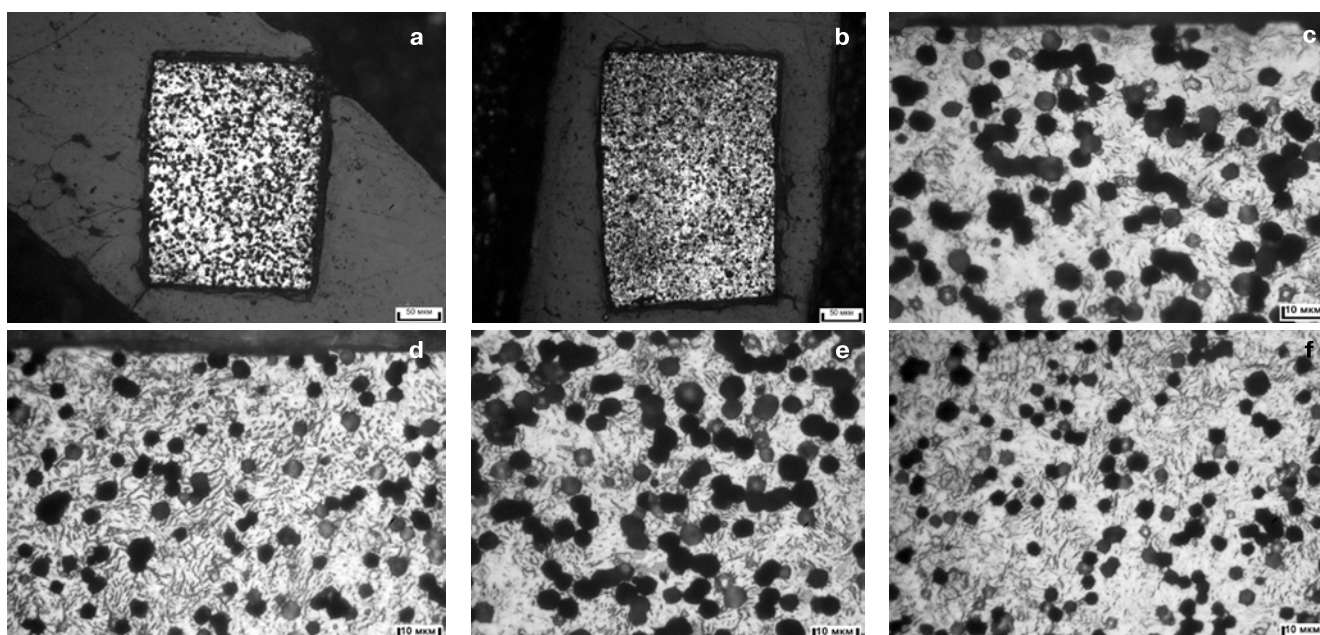


Рис. 13. Микроструктура образцов Protaper Next без автоклавирования и после 6 циклов автоклавирования под изломом

а – общий вид поперечного сечения без автоклавирования $\times 100$; б – общий вид поперечного сечения после 6 циклов автоклавирования $\times 100$; в – край без автоклавирования $\times 500$; д – край после 6 циклов автоклавирования $\times 500$; е – сердцевина без автоклавирования $\times 500$; ф – сердцевина после 6 циклов автоклавирования $\times 500$

Fig. 13. Microstructure of Protaper Next samples without autoclaving and after 6 cycles of autoclaving under fracture

a – general view of the cross section without autoclaving $\times 100$; б – general view of the cross section after 6 cycles of autoclaving $\times 100$; в – edge without autoclaving $\times 500$; д – edge after 6 cycles of autoclaving $\times 500$; е – core without autoclaving $\times 500$; ф – core after 6 $\times 500$ autoclaving cycles

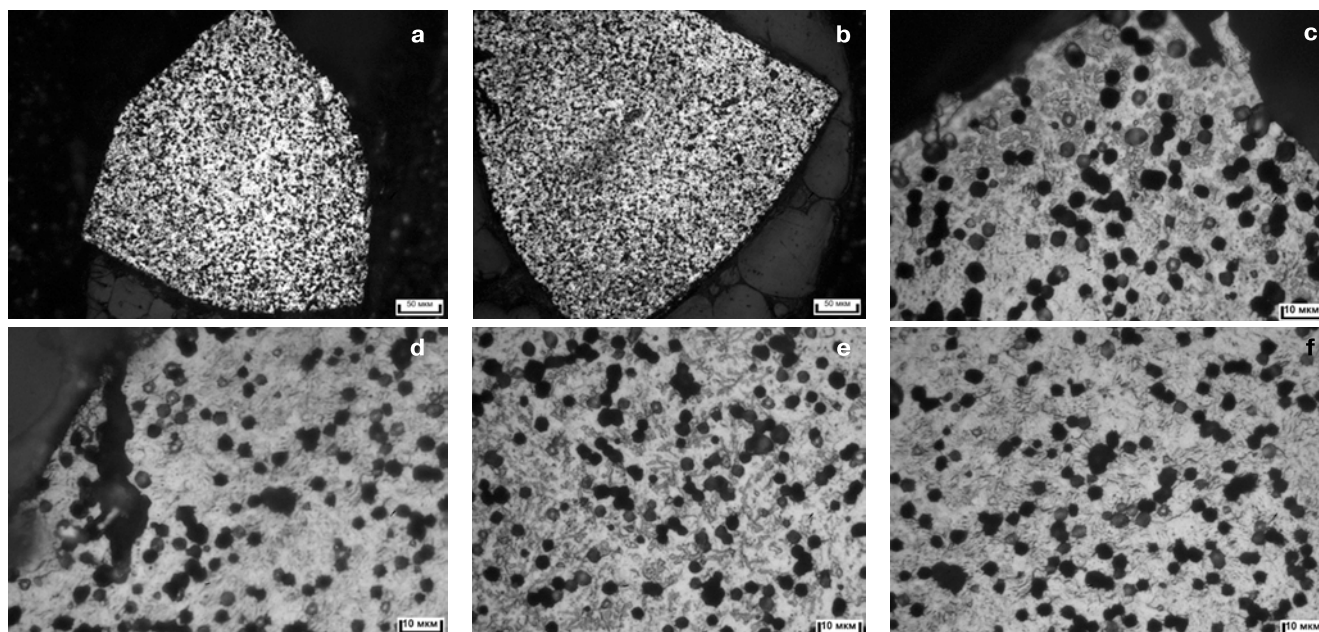


Рис. 14. Микроструктура образцов Protaper Universal без автоклавирования и после 6 циклов автоклавирования под изломом

а – общий вид поперечного сечения без автоклавирования x100; б – общий вид поперечного сечения после 6 циклов автоклавирования x100; с – край без автоклавирования x500; д – край после 6 циклов автоклавирования x500; е – сердцевина без автоклавирования x500; ф – сердцевина после 6 циклов автоклавирования x500

Fig. 14. The microstructure of Protaper Universal samples without autoclaving and after 6 cycles of autoclaving under kink

а – general view of the cross section without autoclaving x100; б – general view of the cross section after 6 cycles of autoclaving x100; с – edge without autoclaving x500; д – edge after 6 cycles of autoclaving x500; е – core without autoclaving x500; ф – core after 6 x500 autoclaving cycles

ментами систем Protaper Universal и Endostar E3 Basic Rotary System соответственно.

Полученные данные позволяют утверждать, что устойчивость к усталостным разрушениям инструментов различных эндодонтических систем уменьшается с увеличением угла изгиба корневого канала. Так у инструментов системы Endostar E3 Basic Rotary System количество циклов снизилось в 1,2 раза, у инструментов системы Protaper Universal в 2,9 раз. У инструментов системы Protaper Next количество циклов при угле изгиба искусственного корневого канала 60 градусов снизилось в 1,5 раз по сравнению с количеством циклов при угле изгиба 45 градусов. Количество циклов до поломки у инструментов системы Protaper Universal на 32% меньше по сравнению с инструментами системы Endostar (это объясняется большей конусностью

инструментов системы Protaper Universal (07), что делает инструмент более жестким).

ВЫВОД

В ходе исследования установлено, что процесс автоклавирования не влияет на циклическую усталость роторных никель – титановых эндодонтических файлов. Это подтверждено статистически и с помощью изучения микроструктуры образцов новых и прошедших 6 циклов автоклавирования инструментов.

На основании всего вышесказанного можно утверждать, что на циклическую усталость инструмента влияет не количество циклов автоклавирования, а производитель (метод производства и механические свойства самого инструмента) и угол изгиба в корневом канале при вращении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lopes H.P., Vieira M.V., Elias C.N. et.al. Influence of the geometry of curved artificial canals on the fracture of rotary nickel-titanium instruments subjected to cyclic fatigue tests. J Endod. 2013. №39(5). P. 704-707.
2. Ounsi H.F., Nassif W., Grandini S. et.al. Evolution of Nickel-titanium Alloys in Endodontics. J Contemp Dent Pract. 2017. №18(11). P. 1090-1096.
3. McGuigan M.B., Louca C., Duncan H.F. The impact of fractured endodontic instruments on treatment outcome. Br Dent J. 201. №214(6). P. 285-289.
4. Spili P., Parashos P., Messer H.H. The Impact of Instrument Fracture on Outcome of Endodontic Treatment. Journal of Endodontics. 2005. № 12. P. 88-92.
5. Alapati S.B., Brantley W.A., Svec T.A. et.al. SEM observations of nickel-titanium rotary endodontic instruments that fractured during clinical use. Journal of Endodontics. 2005. №31. P.40 –43.

REFERENCES

1. Lopes H.P., Vieira M.V., Elias C.N. et.al. Influence of the geometry of curved artificial canals on the fracture of rotary nickel-titanium instruments subjected to cyclic fatigue tests. J Endod. 2013. №39(5). P. 704-707.
2. Ounsi H.F., Nassif W., Grandini S. et.al. Evolution of Nickel-titanium Alloys in Endodontics. J Contemp Dent Pract. 2017. №18(11). P. 1090-1096.
3. McGuigan M.B., Louca C., Duncan H.F. The impact of fractured endodontic instruments on treatment outcome. Br Dent J. 201. №214(6). P. 285-289.
4. Spili P., Parashos P., Messer H.H. The Impact of Instrument Fracture on Outcome of Endodontic Treatment. Journal of Endodontics. 2005. № 12. P. 88-92.
5. Alapati S.B., Brantley W.A., Svec T.A. et.al. SEM observations of nickel-titanium rotary endodontic instruments that fractured during clinical use. Journal of Endodontics. 2005. №31. P.40 –43.

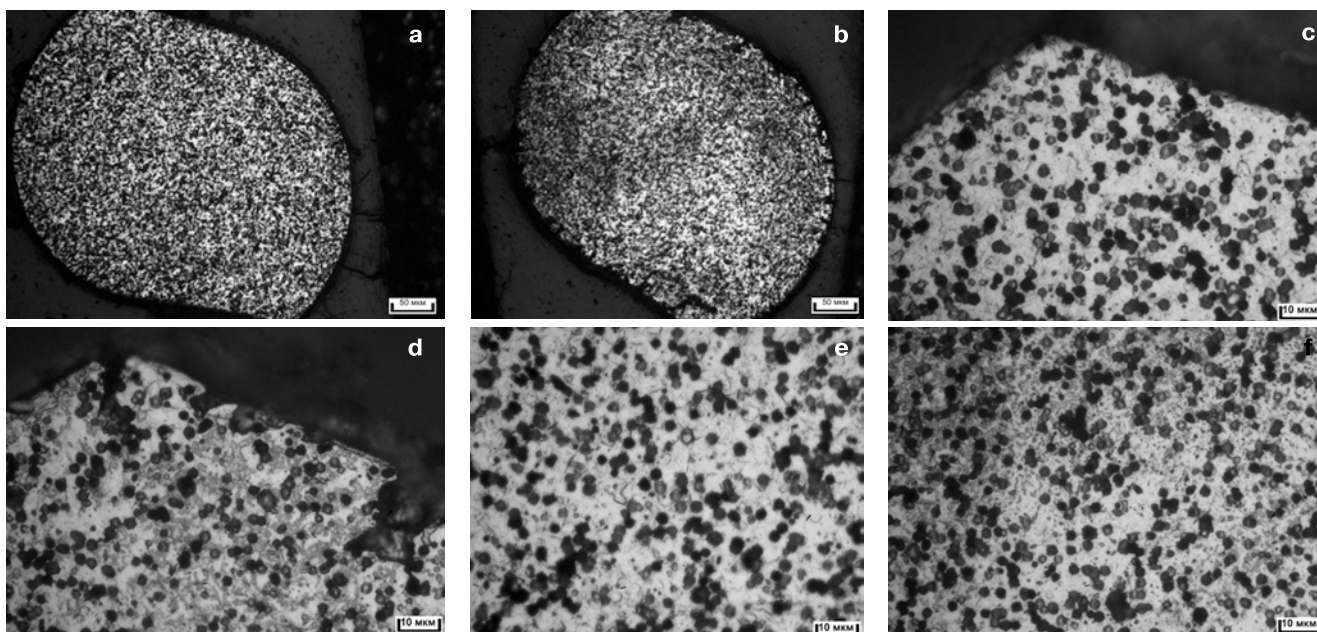


Рис. 15. Микроструктура образцов Endostar E3 Basic Rotary System без автоклавирования и после 6 циклов автоклавирования под изломом

а – общий вид поперечного сечения без автоклавирования x100; б – общий вид поперечного сечения после 6 циклов автоклавирования x100; в – край без автоклавирования x500; д – край после 6 циклов автоклавирования x500; е – сердцевина без автоклавирования x500; ф – сердцевина после 6 циклов автоклавирования x500

Fig. 15. Microstructure of Endostar E3 Basic Rotary System samples without autoclaving and after 6 fracture autoclaving cycles

a – general view of the cross section without autoclaving x100; б – general view of the cross section after 6 cycles of autoclaving x100; в – edge without autoclaving x500; д – edge after 6 cycles of autoclaving x500; е – core without autoclaving x500; ф – core after 6 x500 autoclaving cycles

6. Манак, Т. Н. Информированность врачей-стоматологов по вопросам современных технологий лечения заболеваний пульпы и апикального периодонта. Стоматол. журн. 2015. №2. С. 99–104.

7. Farmakis E.T., Sotiropoulos G.G., Pantazis N. et.al. The permanent deformation of the self-adjusting files when used in canals of extracted teeth. Int Endod J. 2013. №46(9). P. 863-869.

8. Schäfer E., Diez C., Hoppe W. et.al Rentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. J. Endod. 2002. №28 (3). P. 211-216.

9. Ржанов Е.А., Копьев Д.А. Метод оценки вероятности поломки никель-титанового инструмента в зависимости от продолжительности его работы в условиях искривленного канала. Эндодонтия Today. 2011. №2. С. 66-72.

10. Севбитов А.В., Кузнецова М.Ю., Васильев Ю.Л. и др. Влияние методов предстерилизационной очистки и стерилизации на функциональные свойства эндодонтического инструментария. Эндодонтия Today. 2016. № 1. С. 14-16.

11. Хабадзе З. С., Балашова М.Е., Зорян А.В., и др. Изменение кристаллической решетки никель-титановых эндодонтических инструментов в результате автоклавирования. Эндодонтия Today. 2019. №1. С.33-36.

12. Razavian H., Iranmanesh P., Mojtahedi H. Effect of Autoclave Cycles on Surface Characteristics of S-File Evaluated by Scanning Electron Microscopy. Iran Endod J. 2016. №11(1). P.29-32.

13. Plotino G., Costanzo A., Grande N.M. et.al. Experimental evaluation on the influence of autoclave sterilization on the cyclic fatigue of new nickel-titanium rotary instruments. J Endod. 2012. №38(2). P.222-225.

14. Bulem U.K., Kececi A.D, Guldaz H.E. Experimental evaluation of cyclic fatigue resistance of four different nickel-titanium instruments after immersion in sodium hypochlorite and/or sterilization. J Appl Oral Sci. 2013. №21(6). P.505-510.

15. Khabiri M., Ebrahimi M., Saei M.R. The Effect of Autoclave Sterilization on Resistance to Cyclic Fatigue of Hero Endodontic File #642 (6%) at Two Artificial Curvature. J Dent (Shiraz). 2017. №18(4). P.277-281.

16. Ren C.C., Bai Y.X., Wang H.M. et.al. Phase transformation analysis of varied nickel-titanium orthodontic wires. Chin Med J (Engl). 2008. №121(20). P.2060-2064.

6. Manak, T. N. Awareness of dentists on issues of modern technologies for the treatment of pulp and apical periodontal diseases. Stomatol. Journal. 2015. №2. P. 99–104.

7. Farmakis E.T., Sotiropoulos G.G., Pantazis N. et.al. The permanent deformation of the self-adjusting files when used in canals of extracted teeth. Int Endod J. 2013. №46(9). P. 863-869.

8. Schäfer E., Diez C., Hoppe W. et.al Rentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. J. Endod. 2002. №28 (3). P. 211-216.

9. Rzhzanov E.A., Kopiev D.A. A method for assessing the probability of failure of a nickel-titanium instrument depending on the duration of its operation in a curved channel. Endodontia Today. 2011. №2. P. 66–72.

10. Sevbitov A.V., Kuznetsova M.Yu., Vasiliev Yu.L., et al. Influence of pre-sterilization cleaning and sterilization methods on the functional properties of endodontic instruments. Endodontics Today. 2016. N1. P. 14–16.

11. Khabadze Z.S., Balashova M.E., Zoryan A.V., et al. Changes in the crystal lattice of nickel-titanium endodontic instruments as a result of autoclaving. Endodontics Today. 2019. №1. P.33–36.

12. Razavian H., Iranmanesh P., Mojtahedi H. Effect of Autoclave Cycles on Surface Characteristics of S-File Evaluated by Scanning Electron Microscopy. Iran Endod J. 2016. №11(1). P.29-32.

13. Plotino G., Costanzo A., Grande N.M. et.al. Experimental evaluation on the influence of autoclave sterilization on the cyclic fatigue of new nickel-titanium rotary instruments. J Endod. 2012. №38(2). P.222-225.

14. Bulem U.K., Kececi A.D, Guldaz H.E. Experimental evaluation of cyclic fatigue resistance of four different nickel-titanium instruments after immersion in sodium hypochlorite and/or sterilization. J Appl Oral Sci. 2013. №21(6). P.505-510.

15. Khabiri M., Ebrahimi M., Saei M.R. The Effect of Autoclave Sterilization on Resistance to Cyclic Fatigue of Hero Endodontic File #642 (6%) at Two Artificial Curvature. J Dent (Shiraz). 2017. №18(4). P.277-281.

16. Ren C.C., Bai Y.X., Wang H.M. et.al. Phase transformation analysis of varied nickel-titanium orthodontic wires. Chin Med J (Engl). 2008. №121(20). P.2060-2064.

17. Dosanjh A. Paurazas S., Askar M. The Effect of Temperature on Cyclic Fatigue of Nickel-titanium Rotary Endodontic Instruments. J Endod. 2017. №43(5). P.823-826.

18. Ye J., Gao Y. Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. J Endod. 2012. №38(1). P.105-107.

19. Rubio J., Zarzosa J.I., Pallarés A. Comparative Study of Cyclic Fatigue of 10 Different Types of Endodontic Instruments: an in Vitro Study. Acta Stomatol Croat. 2019. № 53(1). P. 28-36.

17.Dosanjh A. Paurazas S., Askar M. The Effect of Temperature on Cyclic Fatigue of Nickel-titanium Rotary Endodontic Instruments. J Endod. 2017. №43(5). P.823-826.

18.Ye J., Gao Y. Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. J Endod. 2012. №38(1). P.105-107.

19.Rubio J., Zarzosa J.I., Pallarés A. Comparative Study of Cyclic Fatigue of 10 Different Types of Endodontic Instruments: an in Vitro Study. Acta Stomatol Croat. 2019. № 53(1). P. 28-36.

Конфликт интересов:

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов /

Conflict of interests:

The Authors declare no conflict of interests.

Получена / Received 28.01.2020

Исправлена / Revised 21.02.2020

Принята / Accepted 28.02.2020

Координаты для связи с авторами /

Coordinates for communication with authors:

Манак Т.Н. / T.N. Manak

E-mail: tatyana.manak@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4155-2322