

# Метод оценки вероятности поломки никель-титанового инструмента в зависимости от продолжительности его работы в условиях искривленного канала

Е.А. РЖАНОВ, к.м.н., доц. кафедры терапевтической стоматологии и эндодонтии МГМСУ  
Д.А. КОПЬЕВ, врач-стоматолог

## Method for estimating the probability of the nickel-titanium instrument failure depending on the duration of its work in a curved channel

E.A. RZHANOV, D.A. KOPYEV

### Резюме

Проблема поломки эндодонтического инструмента в процессе обработки канала зуба остается актуальной и после внедрения во врачебную практику гибких никель-титановых инструментов. Основными причинами поломки инструментов являются торсионные и циклические перегрузки. В данной работе экспериментально исследовано поведение инструмента при циклических нагрузках. Эксперимент проводили в условиях, соответствующих каналу с углом изгиба 45° и радиусом кривизны около 5 мм. Модели каналов были изготовлены из прозрачных стеклянных трубок. В эксперименте использованы инструменты FlexMaster 25/.04. Длина, на которую инструмент помещали в трубку, составляла в первом случае 17 мм, во втором – 19 мм. При этом длина части инструмента после точки максимального искривления составляла 2 мм и 5 мм, соответственно. В обоих случаях в эксперименте использованы по 50 инструментов. Измерялись время до момента поломки инструментов при вращении их в трубках со скоростью 300 об./мин. и длины фрагментов. Результаты измерений позволили построить функцию распределения плотности вероятности от времени и определить зависимость вероятности поломки от продолжительности работы при циклических нагрузках. Показано, что при вероятности поломки, равной 10%, время работы инструмента составляет в первом случае (17 мм/2 мм) 53 сек. и 67 сек. во втором случае (19 мм/5 мм).

Ключевые слова: никель-титановые инструменты, циклическая нагрузка, излом при циклических перегрузках, вероятность излома.

### Abstract

The breakage of endodontic instruments during root canal treatment is a challenging problem which became even more critical after the introduction of NiTi instruments into clinical practice. The primary reasons of instrument breakage are torsion overloading and cyclic fatigue. In this article the results of experimental investigation under cyclic overloading are represented. Cyclic fatigue testing was performed using the glass models of the root canals corresponding to the curvature angle of 45° and the radius of curvature about 5 mm. The artificial canal models have been made of transparent glass tubes which allowed measuring the above mentioned parameters. The experiments have been accomplished on FlexMaster 25/.04 instruments for two configurations: 17 mm of working length and 2 mm pitch into curved part of canal, and 19 mm length and 5 mm pitch. 50 instruments were used for each case. Rotation time in the tube until the breakage at 300 rpm and the length of separated fragments were measured. These results allowed plotting the frequency distribution function of the time and then the probability value as the function of working time at the cyclic loading. It was shown for example that with a probability of 10% the working time is 53 sec for the 1-st experimental configuration (17 mm/ pitch 2 mm) and 67 sec for the 2-nd configuration (19 mm/ pitch 5 mm).

Key words: NiTi instruments, cyclic loading, breakage under cyclic loading, probability of breakage.

### Введение

Одной из существенных проблем, возникающих при использовании вращаемых никель-титановых инструментов, является довольно высокая вероятность их

«неожиданной» поломки в процессе обработки искривленных каналов зубов.

Причинами поломки инструментов являются торсионные и циклические перегрузки. В реальных

условиях инструмент при вращении в канале испытывает торсионные и циклические нагрузки одновременно. Проблема торсионных перегрузок отчасти решается применением приводов с регулируе-

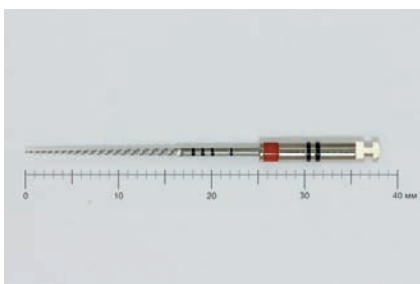


Рис. 1. Инструмент FlexMaster 25/.04



Рис. 2. Экспериментальная трубка с инструментом, погруженным на 17

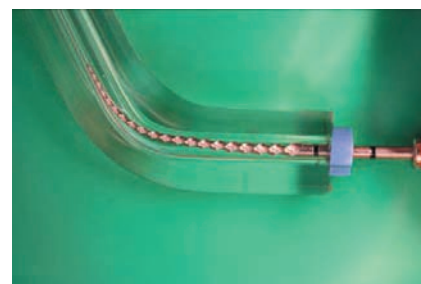


Рис. 3. Экспериментальная трубка с инструментом, погруженным на 19 мм

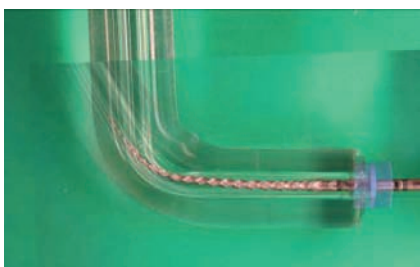


Рис. 4. На изображении совмещены изображения инструментов, погруженных в трубку на 17 мм и на 19 мм. Кривизна и угол изгиба инструментов полностью совпадают

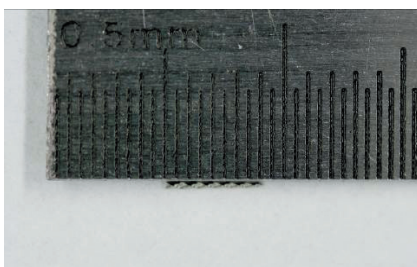


Рис. 5. Фотография фрагмента инструмента длиной 4 мм. Результаты

мым моментом вращения. С циклическими нагрузками все несколько сложнее, так как если инструмент работает в искривленном канале, избежать их фактически невозможно. Известно, что практически все каналы зубов имеют ту или иную степень искривления.

В 2005 году группа ученых из MIT (Массачусетский технологический институт) во главе с Jeremy M. Young [1] опубликовала работу, в которой была сделана попытка теоретически предсказать поведение инструмента при циклической нагрузке.

В этой работе исследовалось разрушение никель-титановой проволоки в условиях, близких к клиническим условиям работы реальных инструментов. Учитывались следующие семь параметров: радиус кривизны, угол отклонения от первоначального направления, диаметр сечения проволоки, амплитуда деформации, частота циклов сжатие – растяжение (число оборотов в единицу времени), объем материала, подвергнутого деформации, и удельная теплоемкость охлаждающей жидкости. Каждый из этих параметров обладает определенной относительной погрешностью, а все вместе они определяют погрешность конечного результата – времени работы инструмента до его поломки. Анализ показывает, что основной

вклад в эту погрешность вносят величина погрешности амплитуды деформации  $d\epsilon_a/\epsilon_a$  и погрешность определения объема деформированного материала  $dV_e/V_e$ .

Обе величины  $\epsilon_a$  и  $V_e$  в условиях больших амплитуд деформации и фазовой трансформации (аустенит-мартенсит) никель-титанового сплава имеют значительные флуктуации, которые приводят к большим ( $>20\%$ ) относительным погрешностям определения полного числа циклов  $N_f$ , что, видимо, и объясняет разброс значений  $N_f$ , полученный авторами в проверочных экспериментах.

Таким образом, теоретически проанализировать поведение инструмента в реальном канале и предсказать момент его поломки с достаточной точностью, на наш взгляд, не представляется возможным.

#### ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное определение продолжительности работы инструментов FlexMaster 25/.04 до момента поломки при вращении в условиях искусственно смоделированного искривленного канала. На основании этих данных с помощью математического анализа вычислить вероятность поломки инструмента в зависимости от времени его работы при циклических нагрузках.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2002 году Schafer E., Diez C. at al. [2] опубликовали работу, в которой были исследованы 1163 канала человеческих зубов, 980 из которых оказались искривленными, что составило 84% случаев. В зависимости от изгиба и радиуса кривизны каналы зубов можно разделить на три группы, как показано в табл. 1.

Параметры проведенного нами эксперимента соответствуют третьей группе, с тяжелыми условиями работы инструментов, обусловленными анатомией корневых каналов. В табл. 1 эта группа выделена цветом.

Для проведения эксперимента были изготовлены модели каналов двух типов. Модели представляют собой изогнутые стеклянные трубки, угол изгиба которых подобран так, чтобы инструмент отклонялся от первоначального направления на угол  $45^\circ$ , а радиус кривизны изгиба инструмента находился в пределах 5-6 мм. Применение гладких стеклянных трубок позволяет свести торсионную нагрузку на инструмент к минимуму, которым можно пренебречь, поскольку он не оказывает существенного влияния на качество проводимого эксперимента.

В эксперимент были включены 100 инструментов FlexMaster 25/.04 (рис. 1), которые были разделены на две группы.

Инструменты первой группы помещались в трубку на 17 мм, а второй – на 19 мм, при этом длина от верхушки инструмента до точки максимального изгиба составляла 2 мм и 5 мм, соответственно. Модели канала и инструменты в рабочем положении показаны на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 4 приведено совмещение двух предыдущих изображений, которое демонстрирует, что угол и кривизна изгиба инструментов в

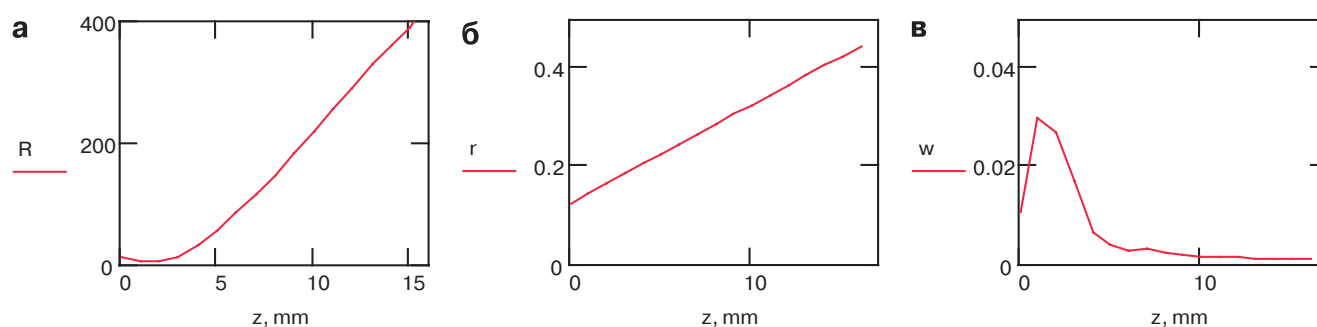


Рис. 6. Параметры инструмента, вращающегося в кварцевой модели канала, при глубине погружения 17 мм (группа 1)

а) Радиус кривизны изгиба инструмента  $R(z)$  как функция координаты вдоль оси инструмента от верхушки

б) Радиус инструмента конического профиля  $r(z)$  как функция координаты вдоль оси

в) Амплитуда деформации материала  $\varepsilon_a$  как функция координаты вдоль оси (на рисунке амплитуда обозначена как  $w$ ).

Область 0,6-2,8 мм, где амплитуда превышает значение 2%, подвержена фазовым переходам в материале.

В этой области локализованы изломы инструментов (рис. 8)

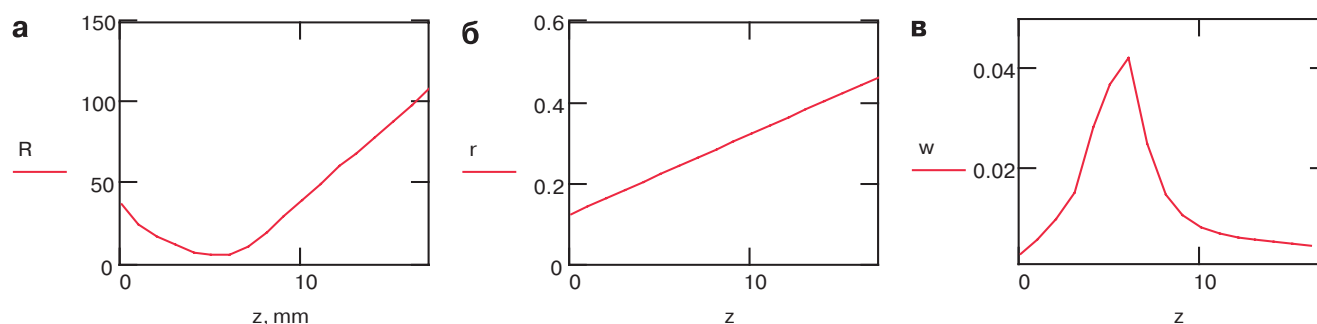


Рис. 7. Параметры инструмента, вращающегося в кварцевой модели канала, при глубине погружения 19 мм (группа 2)

а) Радиус кривизны изгиба инструмента  $R(z)$  как функция координаты вдоль оси инструмента от верхушки

б) Радиус инструмента конического профиля  $r(z)$  как функция координаты вдоль оси

в) Амплитуда деформации материала  $\varepsilon_a$  как функция координаты вдоль оси (на рисунке амплитуда обозначена как  $w$ ).

Область 3,4-7,8 мм, где амплитуда превышает значение 2%, подвержена фазовым переходам в материале.

В этой области локализованы изломы инструментов (рис. 9)

обеих экспериментальных моделях совпадают с достаточно высокой точностью.

Инструменты вращали в стеклянных трубках с помощью эндодонтического мотора EndoEst (GeoSoft, Россия) со скоростью 300 об./мин. без охлаждения, засекая время с помощью секундомера до момента их поломки. Измерение длин фрагментов сломанных инструментов проводили с помощью инженерной линейки (рис. 5).

### Результаты

Результаты проведенного эксперимента с учетом времени поломки и длины фрагмента для первой и второй групп представлены в табл. 2.

### Предельные циклические нагрузки

С целью определения предельно допустимых циклических нагрузок измерено распределение амплитуд деформации по изогнутой части инструмента вдоль его оси, найдены максимальные значения амплитуд и их локализация. Построены графики распределения

фрагментов инструментов по их длинам, позволяющие точно определить место излома. Построены распределения плотности вероятности излома от времени и найдены зависимости вероятности излома от продолжительности работы инструмента при циклических нагрузках.

Радиусы кривизны  $R$  определены в эксперименте по геометрии изогнутых инструментов и построены как функции координаты  $z$  вдоль оси инструмента от его верхушки на рис. 6а для первой группы и на рис. 7а для второй.

Минимальный радиус  $R_{\min} = 4,8$  мм локализован вблизи  $z = 1$  мм в первом случае и  $R_{\min} = 5,8$  мм вблизи  $z = 6$  мм – во втором. Зависимости  $R(z)$ , а также линейная зависимость радиуса конического инструмента  $r(z)$ , представленная на рис. 6б и 7б, позволили построить графики зависимостей амплитуды деформации  $\varepsilon_a(z)$  от координаты  $z$ , поскольку существует простая связь между этими величинами [2]:

$$\varepsilon_a(z) = \frac{r(z)}{R(z)} \quad (1)$$

Графики функции (1) представлены на рис. 6в и 7в для случаев погружения инструментов на 17 мм и 19 мм, соответственно. Нелинейные зависимости  $R(z)$  в обоих случаях имеют явно выраженные минимумы, которым на графиках зависимостей (1) соответствуют максимальные значения распределений амплитуд деформации  $\varepsilon_a(z)$ . Амплитуды деформации распределены неоднородно по объему материала, подверженного фазовому переходу аустенит-мартенсит. Следует отметить, что в работе Jeremy M. Young at al. распределение амплитуд по деформированному объему предполагалось однородным, что неприменимо для моделирования реальных инструментов, имеющих нецилиндрический профиль. Области, охваченные фазовой трансформацией, находятся между значениями координаты  $z$  в диапазоне 0,6-2,8 мм на рис. 6в и в диапазоне 3,4-7,8 мм – на рис. 7в. В этих диапазонах амплитуды деформации превышают уровень  $\varepsilon_a = 2\%$ , при котором начинаются фазовые трансформации кристаллической структуры никель-титанового

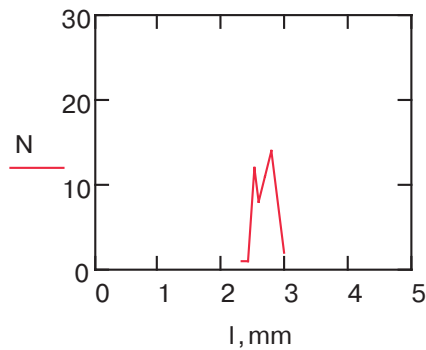


Рис. 8. Распределение фрагментов инструментов по длинам (группа 1, 17 мм/2 мм). Число фрагментов, образующих главный пик, равно 33 из 50. Их длина около 2,8 мм. Фрагменты, образующие второй пик, сосредоточены около 2,4 мм, их число равно 12. Разница в длинах соответствует разнице координат точек А и В на рис. 1 и равна 0,4 мм. Шаг нарезки в этом месте инструмента равен 0,6 мм

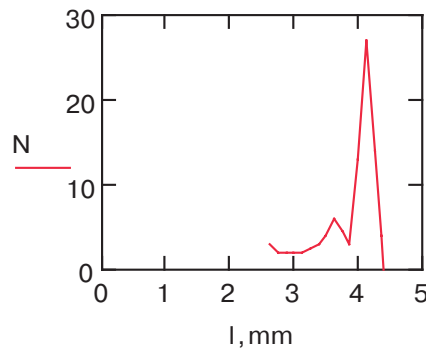


Рис. 9. Распределение фрагментов инструментов по длинам (группа 2, 19 мм/5 мм). Число фрагментов, образующих главный пик, равно 34 из 50. Их длина около 4,2 мм. Фрагменты, образующие второй пик, сосредоточены около 3,6 мм, их число равно шести. Разница в длинах соответствует разнице координат точек А и В на рис. 1 и равна 0,6 мм. Шаг нарезки в этом месте инструмента равен 0,78 мм

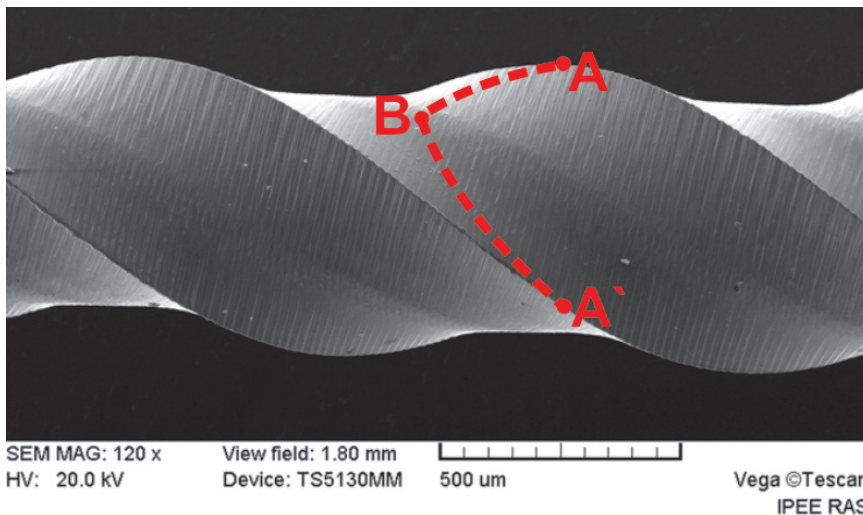


Рис. 10. Траектория движения точки соприкосновения инструмента со стенкой стеклянной трубки

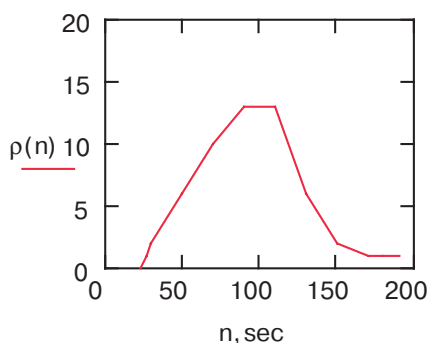


Рис. 11. Распределение плотности вероятности излома инструмента как функция времени работы инструмента при циклических нагрузках для группы 1 (17 мм/2 мм)

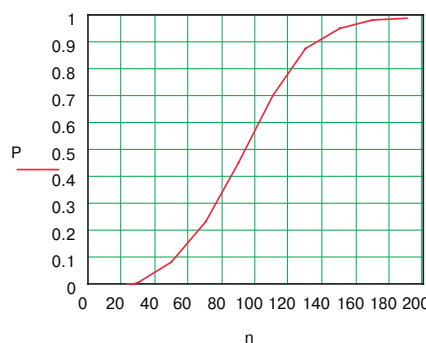


Рис. 12. Вероятность излома инструмента как функция времени работы инструмента при циклических нагрузках для группы 2 (17 мм/2 мм). Вероятность равна 10% при времени работы 53 сек.

материала. Внутри этих диапазонов находятся точки, в которых наблюдается излом инструментов при превышении предельного числа циклов сжатие–растяжение. Анализ фрагментов позволил построить графики распределения числа фрагментов по их длинам. Графики имеют характерный вид линий  $N(l)$ , образованных двумя пиками, раздвинутыми по оси  $l$  на расстояние 0,4 мм при глубине погружения 17 мм и на расстояние 0,6 мм в случае погружения на 19 мм. Графики этих распределений показаны на рис. 8 и 9, соответственно. Главный пик на рис. 9 образован 34 фрагментами, имеющими длину вблизи  $l = 4,2$  мм. Общее число фрагментов в эксперименте равно 50. Второй более слабый пик образован шестью фрагментами, имеющими длину вблизи  $l = 3,6$  мм. Разница в длинах фрагментов из первого и второго пиков равна  $\Delta l = 0,6$  мм и составляет часть шага нарезки инструмента, равного в данном месте 0,78 мм.

Происхождение второй точки излома объясняется треугольной формой поперечного сечения инструмента. За один оборот инструмента точка соприкосновения инструмента со стенкой трубки трижды скользит по траектории А-В-А' на каждой из трех граней инструмента (рис. 10).

При этом в точке В амплитуда деформации лишь немного меньше амплитуды деформации в точке А, поскольку в этой точке меньше не только радиус инструмента  $r_B$ , но также немного меньше и радиус кривизны изгиба  $R_B$ . Разница в количестве поломок в точках А и В, по нашему мнению, возникает потому, что в точке А на остром гребне нарезки условия для образования и развития трещины более благоприятные, чем на гладкой поверхности в точке В. Отметим здесь, что условия зарождения и развития трещины в поперечном направлении невозможно учесть в вычислительных процедурах, тогда как этот процесс является ключевым. На это указывает анализ поверхностей изломов циклического характера, полученных в диапазоне так называемых «реверсивных деформаций» ( $\epsilon_a < 9,5\%$ ), и тот факт, что излом локализован не в точке максимального значения амплитуды деформации, а справа или слева от нее в наших двух случаях, но обязательно в диапазонах фазовой



Таблица 1. Распределение каналов зубов в зависимости от угла изгиба и радиуса кривизны

| № группы | Угол изгиба, градус | Радиус кривизны, мм | % от общего количества каналов в исследовании |
|----------|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------|
| 1        | ≤27                 | <40                 | 65                                            |
| 2        | >27<35              | <15                 | 13                                            |
| 3        | >35                 | <13                 | 9                                             |

трансформации. Таким образом, трещина зарождается в результате накопления при каждом цикле дефектов не обязательно в точке, где амплитуда деформации максимальна, а там, где условия накопления дефектов наилучшие: на дислокациях, пустотах, дефектах технологического происхождения. Развитие трещины и скорость ее распространения от периферии к оси инструмента являются плохо контролируемыми параметрами, существенно влияющими на время до поломки инструмента при циклических нагрузках. Именно поэтому время поломки инструмента следует определять не через вычислительную процедуру, а посредством статистического эксперимента.

#### Определение вероятности возникновения поломки

Представляет интерес определение вероятности поломки инструмента как функции общего числа оборотов (числа циклов сжатия-растяжения) или времени от начала вращения инструмента в трубке до момента отделения фрагмента. Именно это время измерялось для каждого инструмента с достаточно высокой точностью ~0,5%.

Далее, по данным измерений построены функции распределения плотности вероятности поломки от времени  $p(n)$  для каждой группы из 50 инструментов, где  $n$  – время в секундах. Для построения этой функции определялось число поломок, попадающих в интервал времени от  $n$  до  $n+\Delta n$ , где величина интервала  $\Delta n$  выбрана равной 5 с. Интервал выбран достаточно большим для такого рода статистических измерений, поскольку здесь статистика не слишком высока – всего 50 инструментов в выборке. Кроме того, невысокая статистика эксперимента потребовала применения процедуры сглаживания функции  $p(n)$ , что, впрочем, не сильно повлияло на точность конечных результатов.

Таким способом вся ось времени  $n$  разбита на интервалы, для каждого из которых определено количество сломанных инструментов. Эти числа отложены по оси ординат при построении графиков функции  $p(n)$ . На рис. 11 и 13 функции плотности вероятности представлены для двух случаев, моделируемых в эксперименте: 17 мм/2 мм и 19 мм/5 мм, соответственно. Функции имеют вид, характерный для такого рода измерений, с максимумом, вблизи 80-100 с. Площадь, ограниченная кривой и осью времени, пропорциональна вероятности излома инструмента для каждого указанного момента времени  $n$ . Полная площадь под кривой на рис. 11 равна вероятности излома инструмента по истечении всего времени эксперимента, то есть вероятности достоверного события, ведь инструмент обязательно ломается в какой-то момент времени на интервале от 0 до  $\infty$ .

По определению, вероятность достоверного события принимается равной единице. Чтобы удовлетворить этому определению, необходимо вычислить вероятность  $P(n)$  для любого момента времени  $n$  следующим образом:

$$P(n) = \frac{\int_0^n p(n) dn}{\int_0^\infty p(n) dn}. \quad (2)$$

Интеграл в знаменателе уравнения (2) есть площадь под всей кривой на рис. 11 или рис. 13. Интеграл в числителе есть площадь под кривой, ограниченная моментом времени  $n$ . Таким образом, вероятность  $P(n)$ , вычисленная для любого момента времени  $n$ , будет выражена в долях единицы или может быть записана в процентах. Интегрирование функции  $p(n)$  выполнено графическим методом с кусочно-линейной аппроксимацией подынтегральной функции. На рис. 12 представлена зависимость вероятности излома инструмента

от времени вращения его в кварцевой модели канала при глубине погружения 17 мм. Зависимость получена интегрированием плотности вероятности, изображенной на рис. 11. Аналогичная зависимость  $P(n)$  для инструмента, погруженного на глубину 19 мм, изображена на рис. 14. Эта зависимость получена интегрированием функции, представленной на рис. 13.

Зависимости  $P(n)$  имеют характерный вид функций, описывающих вероятностный процесс. Обе зависимости меняются от нуля и стремятся к единице при больших значениях времени, когда вероятность описывает достоверное событие – инструмент сломан. Представляет интерес сравнение поведения функций для наших двух случаев. Обе функции близки к единице при значениях времени порядка 200 сек., то есть некоторые инструменты данного типа способны выдерживать циклическую нагрузку в течение достаточно длительного промежутка времени – до трех минут. Обе функции быстро нарастают при средних значениях времени 80-100 сек. Но вот при малых значениях времени функции ведут себя по-разному. Вторая (19 мм/5 мм) начинает свое нарастание со значения времени 60 сек. и нарастает круто, а первая (17 мм/2 мм) – со значения 30 сек. и вначале нарастает плавно. Если бы процесс излома определялся величиной амплитуды деформации, которая в первом случае меньше, чем во втором (сравнить амплитуды на рис. 6в и 7в), то в первом случае время должно было быть больше. По-видимому, время до поломки определяется процессом развития и распространения исходных трещин от периферии к оси инструмента, и тогда время, необходимое во втором случае, должно быть больше, так как радиус инструмента в области излома в этом случае больше. Отношение

Таблица 2. Длины фрагментов и время до поломки в секундах в группе 1 и 2 соответственно

| №<br>инструмента | Группа 1<br>17 мм/2 мм |                            | Группа 2<br>19 мм/5 мм |                            |
|------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
|                  | Длина фрагмента        | Время поломки<br>(секунды) | Длина фрагмента        | Время поломки<br>(секунды) |
| 1                | 2,6                    | 57                         | 3,3                    | 105                        |
| 2                | 2,6                    | 85                         | 3,1                    | 105                        |
| 3                | 2,7                    | 112                        | 4,0                    | 110                        |
| 4                | 2,8                    | 47                         | 2,7                    | 125                        |
| 5                | 2,8                    | 65                         | 2,6                    | 140                        |
| 6                | 2,8                    | 54                         | 3,0                    | 170                        |
| 7                | 2,8                    | 65                         | 3,7                    | 140                        |
| 8                | 2,8                    | 60                         | 3,4                    | 140                        |
| 9                | 2,8                    | 45                         | 4,0                    | 70                         |
| 10               | 2,7                    | 83                         | 3,4                    | 155                        |
| 11               | 2,8                    | 171                        | 4,0                    | 140                        |
| 12               | 2,7                    | 81                         | 2,5                    | 125                        |
| 13               | 2,8                    | 113                        | 3,0                    | 120                        |
| 14               | 2,6                    | 108                        | 4,0                    | 165                        |
| 15               | 2,5                    | 106                        | 4,2                    | 195                        |
| 16               | 2,7                    | 108                        | 4,2                    | 78                         |
| 17               | 2,7                    | 88                         | 3,5                    | 58                         |
| 18               | 2,5                    | 103                        | 4,0                    | 78                         |
| 19               | 2,7                    | 78                         | 4,0                    | 67                         |
| 20               | 2,5                    | 92                         | 4,2                    | 60                         |
| 21               | 3,0                    | 93                         | 4,5                    | 70                         |
| 22               | 2,5                    | 85                         | 3,5                    | 57                         |
| 23               | 2,7                    | 80                         | 4,0                    | 85                         |
| 24               | 2,7                    | 85                         | 4,0                    | 106                        |
| 25               | 2,8                    | 73                         | 4,0                    | 105                        |
| 26               | 2,5                    | 56                         | 4,2                    | 64                         |
| 27               | 2,7                    | 27                         | 4,3                    | 60                         |
| 28               | 2,8                    | 37                         | 3,8                    | 79                         |
| 29               | 2,5                    | 100                        | 4,0                    | 60                         |
| 30               | 2,5                    | 81                         | 4,0                    | 81                         |
| 31               | 2,6                    | 145                        | 4,2                    | 84                         |
| 32               | 2,7                    | 119                        | 3,7                    | 132                        |
| 33               | 2,8                    | 108                        | 4,0                    | 82                         |
| 34               | 3,0                    | 106                        | 4,0                    | 84                         |
| 35               | 2,6                    | 168                        | 4,0                    | 103                        |
| 36               | 2,8                    | 134                        | 4,2                    | 98                         |
| 37               | 2,5                    | 120                        | 4,3                    | 85                         |
| 38               | 2,5                    | 118                        | 4,0                    | 85                         |
| 39               | 2,7                    | 111                        | 3,5                    | 82                         |
| 40               | 2,6                    | 221                        | 4,5                    | 109                        |
| 41               | 2,5                    | 127                        | 4,0                    | 84                         |
| 42               | 2,3                    | 122                        | 3,2                    | 113                        |
| 43               | 2,6                    | 83                         | 4,2                    | 130                        |
| 44               | 2,5                    | 62                         | 4,0                    | 80                         |
| 45               | 2,4                    | 74                         | 4,2                    | 77                         |
| 46               | 2,8                    | 104                        | 3,8                    | 70                         |
| 47               | 2,4                    | 108                        | 3,8                    | 105                        |
| 48               | 2,6                    | 118                        | 4,0                    | 74                         |
| 49               | 2,8                    | 75                         | 4,0                    | 81                         |
| 50               | 2,5                    | 126                        | 3,5                    | 71                         |

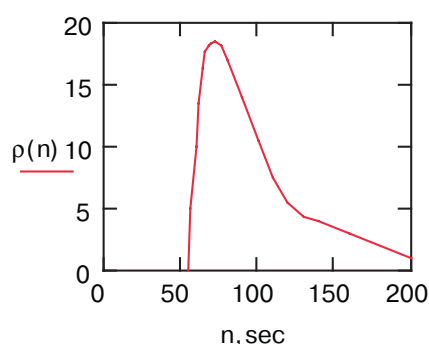


Рис. 13. Распределение плотности вероятности излома инструмента как функции времени работы инструмента при циклических нагрузках для группы 2 (19 мм/5 мм)

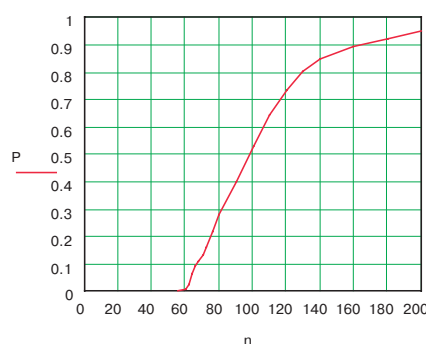


Рис. 14. Вероятность излома инструмента как функция времени работы инструмента при циклических нагрузках для группы 2 (19 мм/5 мм). Вероятность равна 10% при времени работы равном 67 сек.

площадей поперечного сечения в местах излома инструментов равно 1,5. Примерно также соотносятся времена, при которых начинается возрастание функций, описывающих вероятность. При значениях вероятности около 20% и выше времена в обоих случаях приблизительно совпадают. Такое поведение вероятности, по-видимому, означает, что при малых временах ломаются инструменты, в которых изначально присутствуют дефекты, с которых начинается развитие трещины, и тогда время до поломки определяется развитием и распространением трещины по всему поперечному сечению. Когда таких исходных дефектов нет или их концентрация мала, тогда вначале происходит накопление дефектов при циклических фазовых переходах и затем формирование и распространение трещин. Вероятность в таких случаях ведет себя примерно одинаковым образом практически независимо от величины поперечного сечения. Главный же результат состоит в том, что теперь есть возможность указать значение времени до поломки инструмента или время безопасной работы при его использовании в искривленных каналах.

Например, если в качестве критерия выбрать вероятность поломки, равную 10%, то время безопасной работы составит 67 с. для второй группы и 53 сек. – для первой. Практическая рекомендация, которую можно сформулировать на основе данного исследования, состоит в том, что инструмент должен быть исключен из числа используемых после одной минуты его работы в рота-

ционном режиме со скоростью 300 об./мин.

### Обсуждение

Условия вращения инструментов в стеклянных трубках идеальны для изучения их устойчивости к циклическим нагрузкам, поскольку в этом случае они не подвержены торсионным нагрузкам.

По мнению Jeremy M. Young et al., накопление дефектов происходит на границе между объемами деформируемого и недеформируемого материала. Однако прямые измерения, представленные в данной работе, показывают, что поломка наблюдается всегда в деформируемом объеме материала, там, где амплитуда деформации близка к максимальной. Таким образом, слишком высокая неопределенность процесса развития излома в материале не оставляет надежды на правильное предсказание времени до поломки инструмента через вычислительную процедуру. Если же усложнить задачу, учтя торсионные нагрузки, то такой путь представляется совсем безнадежным. Остаются только экспериментальные методы калибровки инструментов на предельно допустимые циклические нагрузки, например в стеклянных трубках, как это предложено в настоящей работе при оптимальном моменте вращения.

По данным таких измерений в клинических условиях можно определить возможность дальнейшего использования этого инструмента с учетом истории его эксплуатации, которая может быть зафиксирована посредством специальных функций электронного привода с возможностями веде-

ния такого рода протоколов и сохранения их в памяти устройства.

### Выводы

1. При определении времени до поломки инструмента нельзя полагаться на теоретические вычисления в связи с большим числом участвующих в модели сильно флуктуирующих параметров.

2. Инструменты необходимо калибровать по процедуре, предложенной в данной работе, – на время до поломки при циклических нагрузках. Процедура калибровки может быть рекомендована производителям инструментов.

3. Типичные никель-титановые инструменты .04 конусности размера 25 имеют ограниченное время эксплуатации и должны быть исключены из числа используемых после примерно одной минуты работы в искривленном канале в полновращательном режиме со скоростью 300 об./мин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jeremy M. Young, Krystyn J. Van Fleet. Predicting in vivo failure of pseudoelastic NiTi devices under low cycle, high amplitude fatigue. 2004 Willey Periodicals Inc. // J. Biomed Mater Res. Part B: Appl Biomater. 72B. 2005. P. 17-26.
2. Schafer E., Diez C., Hoppe W., Tepel J. Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth // J. Endod. 2002. Mar. №28 (3). P. 211-216.

Поступила 14.03.2011

Координаты для связи  
с авторами:  
127473, Москва,  
ул. Делегатская, д. 20/1