

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт прикладной математики и механики  
Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите  
Директор высшей школы  
\_\_\_\_\_ А.М. Кривцов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА  
ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОРОНКИ ЗУБА**

по направлению подготовки

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

профиль

01.03.03\_02 «Биомеханика и медицинская инженерия»

Выполнил

студент гр. 3630103/70201

В.С. Потехин

Руководитель

доцент,  
к. ф-м. н.

Е.Н. Вильчевская

Консультант

ассистент ВШТМ

А.В. Смирнов

Санкт-Петербург

2021

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Институт прикладной математики и механики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор высшей школы

теоретической механики

\_\_\_\_\_ А.М. Кривцов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Потехину Валентину Сергеевичу 3630103/70201

1. Тема работы: Оценка усталостной прочности коронки зуба
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 14.06.2021
3. Исходные данные по работе: научные статьи по теме работы
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): нахождение и упрощение геометрической модели зуба с коронкой, нахождение и задание упругих и усталостных свойств материалов зуба и коронки, рассмотрение нескольких видов нагружения, а также контактной задачи и построение распределения амплитуды напряжений от количества циклов нагружения
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрены
6. Консультанты по работе: Смирнов Александр Владимирович
7. Дата выдачи задания: 01.02.2020

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Е.Н. Вильчевская

Задание принял к исполнению: 01.02.2021 г.

Студент \_\_\_\_\_ В.С. Потехин

## **РЕФЕРАТ**

На 30 с., 29 рисунков, 1 таблица

**МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЗУБНАЯ КОРОНКА, ПЕРВЫЙ МОЛЯР, УСТАЛОСТЬ, КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА.**

В данной работе было произведено численное моделирование задачи об усталостном разрушении зубной коронки с помощью метода конечных элементов, а также сделаны выводы о количестве циклов нагрузки для коронок из материалов, рассмотренных в задаче, и выбран наиболее подходящий для коронки на данном зубе. Для реализации работы были найдены упругие свойства и усталостные кривые для дентина и материалов коронки, а также геометрическая модель, на которой проводилось численное моделирование.

## **ABSTRACT**

30 pages, 29 figures, 1 table

**FINITE ELEMENT METHOD, DENTAL CROWN, FIRST MOLAR, FATIGUE, CONTACT PROBLEM.**

In this work, a numerical simulation of the fatigue failure problem of a dental crown was performed using the finite element method, and conclusions were drawn about the number of load cycles for crowns made of the materials considered in the problem and the most appropriate one was selected for the crown on a given tooth. To implement the work, elastic properties and fatigue curves for dentin and crown materials were found, as well as a geometric model on which numerical simulations were performed.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ УСТАЛОСТИ .....	6
1.1. Усталость .....	6
1.2. Нагрузка .....	7
1.3. Усталостные свойства материала .....	10
ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	11
2.1. Геометрическая модель .....	11
2.2. Материалы .....	12
2.3. Конечно-элементная модель .....	15
2.4. Сила и учёт средних напряжений .....	16
ГЛАВА 3. КОННЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ .....	17
3.1. Задача с концентрированной силой .....	17
3.2. Задача с силой, распределённой по вогнутой поверхности .....	20
3.3. Задача контакта зуба с телом-нагрузкой .....	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	29



## ВВЕДЕНИЕ

Коронки используются людьми для восстановления естественных зубов по многим причинам, таким как потеря или поломка зубов, изменение цвета, обширный кариес, а также для улучшения их формы.

При восстановлении зубов используются различные материалы, которые делятся на металлические, керамические, скрепленные с металлом(металлокерамические) и цельнокерамические коронки.

Цельнокерамические реставрации обладают рядом благоприятных характеристик, таких как жизнеподобный внешний вид [14], биосовместимость [17], износостойкость и стабильность цвета [16]. Однако к недостаткам относятся менее чем идеальная краевая адаптация, чрезмерный износ противоположного зуба, агрессивный дизайн препарирования [14], чувствительность техники [7] и подверженность переломам. Более того, сообщается, что большинство цельнокерамических реставраций имеет высокий процент клинических неудач, особенно если они устанавливаются на боковые зубы [8]. Хрупкость этих материалов препятствует их широкому распространению для использования на боковых зубах [9].

Для предотвращения таких неудач в последнее время было разработано несколько реставрационных материалов. Например, цельнокерамические коронки, изготовленные с помощью автоматизированного проектирования и автоматизированного производства (CAD/CAM), которые обеспечивают повышенную прочность и благоприятную однородную структуру, что улучшает фиксацию и долговечность реставраций [11]. Наиболее распространенными CAD/CAM материалы цельнокерамических коронок являются диоксид циркония и дисиликат лития [5].

Целью данной работы является построение распределения количества циклов до разрушения зубной коронки из двух материалов и сравнительный анализ данных распределений.

# ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ УСТАЛОСТИ

## 1.1. Усталость

В настоящее время при анализе конструкций и их элементов всё большее внимание концентрируется не на задаче определения напряжённо-деформированного состояния, а на решении более общей задачи — задачи определения ресурса конструкции. Одним из процессов, вызывающих разрушение конструкции и её элементов является усталость.

Усталость материала — процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных(часто циклических) напряжений, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин, их развитию и разрушению за указанное время.

Усталостное разрушение обычно разделяют на две категории:

- Малоцикловая усталость (Low-cycle fatigue), когда число циклов прикладываемой нагрузки относительно невелико. Пластические деформации (plastic deformation) часто ассоциируют с расчетом малоцикловой усталости (low-cycle fatigue), это приводит к уменьшению времени усталостной долговечности (fatigue life). Подход долговечности в зависимости от уровня деформаций (Strain-Life) более применимы к расчету малоцикловой усталости.

- Многоцикловая усталость (High-cycle fatigue), когда число циклов приложения нагрузки велико (порядка  $1e4 - 1e9$ ). При такой постановке обычно уровень напряжений более низкий в сравнении с пределом прочности материала. Подход долговечности в зависимости от уровня напряжений (Stress-Life) обычно используется для расчёта многоцикловой усталости (high-cycle fatigue).

На основе анализа статистических данных по отказам различных конструкций [15] можно сделать вывод о том, что указанные отказы более чем в 50% случаев обусловлены протеканием процесса многоцикловой усталости. Рассмотрим возможность возможность определения степени повреждённости

материала в ходе многоциклового усталости с использованием конечно-элементного программного пакета ANSYS WORKBENCH, в которой реализована возможность исследования разрушения, вызванного многоциклового усталостью посредством оценки степени поврежденности материала в элементах конструкции при условии, что дефекты и их рост в явном виде не рассматриваются [4]. Данный подход не позволяет в явном виде оценить момент разрушения конструкции, но позволяет получить наглядную картину степени поврежденности конструкции на основе используемых моделей накопления повреждений.

## 1.2. Нагрузка

Существует методика оценки сопротивления усталости, предлагаемая в государственных стандартах и широко распространенным нормам расчёта на прочность [2], которой стоит следовать при решении задачи об усталостном разрушении.

Для начала следует задать историю нагружения. Под историей нагружения конструкции будем понимать зависимость от времени всех компонент тензора напряжений в каждой точке рассматриваемой конструкции за весь период эксплуатации. Так как вследствие многоцикловости процесс усталостного разрушения происходит в основном при упругом деформировании, то система в ходе процесса является линейной: напряжения, деформации и перемещения, возникающие в точках системы, прямо пропорциональны внешним усилиям. На основе линейности строится методика определения истории нагружения для всей конструкции в целом. Согласно рассматриваемому подходу сначала производится статический расчёт конструкции под действием системы сил  $F$ . Далее задаётся временной ряд  $T(t)$ , который описывает историю изменения сил  $F$  в течение времени эксплуатации системы. История изменения системы внешних сил за время эксплуатации будет определяться по формуле:

$$F(t) = k_{sc}FT(t) \quad (1)$$

где  $k_{sc}$  — шкалирующий множитель, служащий для подгона значения статической силы  $F$  к интервалу изменения переменной нагрузки.

С учётом линейности системы зависимость компоненты напряжённого состояния с координатами  $(x, y, z)$  от времени будет иметь вид:

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} F T(t) \quad (2)$$

где  $i, j = \overline{x, y, z}$ ,  $\sigma_{ij}^{FE}$  — значение рассматриваемой компоненты напряжённого состояния в изучаемой точке, полученное в результате решения статической задачи. Таким образом, задача о нахождении истории нагружения сводится к определению ряда  $T(t)$  и его последующего преобразования, так как с учётом линейности системы зависимость от времени всех компонент напряжённого состояния во всех точках конструкции будет одинакова.

Учитывая формулу (2), в качестве истории нагружения должен быть рассмотрен временной ряд  $T(t)$ . В общем случае данный временной ряд представляет собой набор  $T_{ag}$ ,  $T_{mg}$  и  $n_g$  — амплитудное и среднее значения цикла нагружения, а также число циклов нагружения соответственно. Данный набор характеризует историю внешнего воздействия. С учётом формулы (2) были получены характеристики истории нагружения для компонент тензора напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_{ij ag} = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} T_{ag} \\ \sigma_{ij mg} = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} T_{mg} \end{cases}; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l} \quad (3)$$

Так как существующие зависимости, связывающие долговечность изделия и внешнее нагружение, получены в условиях одноосного нагружения, а полученные соотношения (3) предполагают, что в точках конструкции возникает многоосное напряжения, необходимо полученные характеристики истории нагружения свести к эквивалентным по повреждаемости характеристикам в условиях одноосного нагружения, применяя соотношения, базирующиеся на критериях прочности в статике и позволяющие описывать поведение различных материалов [1]:

$$\begin{cases} \sigma_a^{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \\ \sigma_m^{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{1a}$ ,  $\sigma_{2a}$ ,  $\sigma_{3a}$  и  $\sigma_{1m}$ ,  $\sigma_{2m}$ ,  $\sigma_{3m}$  — главные напряжения тензоров амплитудных и средних значений напряжений соответственно, получаемых, используя соотношения (3).

Таким образом, вместо истории нагружения, задаваемой формулой (3), получаем набор приведённых характеристик истории нагружения  $\sigma_a^{\text{пр}}$  и  $\sigma_m^{\text{пр}}$ .

В большинстве случаев соотношения получены при симметричном цикле нагружения и, значит, не учитывают наличие средних напряжений, которые существенно влияют на сопротивление усталости [3]. Следовательно, сведём полученные характеристики к эквивалентным по повреждаемости в условиях симметричного цикла нагружения. Для выполнения данного перехода используем соотношения для амплитуды эквивалентного симметричного цикла напряжений  $\sigma_{a \text{ экв}}$  [1]:

- на основании зависимости Гудмана(Goodman). Применяется для малопластичных материалов:

$$\sigma_{a \text{ экв}} = \begin{cases} \sigma_a^{\text{пр}} / \left(1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_B}\right), & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ \sigma_a^{\text{пр}}, & -\sigma_B \leq \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \\ 0, & \sigma_m^{\text{пр}} < -\sigma_B \end{cases} \quad (5)$$

- на основании зависимости Герберга(Gerber). Применяется для пластичных материалов

$$\sigma_{a \text{ экв}} = \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{\left(1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_B}\right)} \quad (6)$$

- на основании зависимости Зодерберга(Soderberg). Применяется для хрупких материалов

$$\sigma_{a \text{ экв}} = \begin{cases} \sigma_a^{\text{пр}} / \left(1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_B}\right), & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ \sigma_a^{\text{пр}} & , -\sigma_T \leq \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \\ 0 & , \sigma_m^{\text{пр}} < -\sigma_T \end{cases} \quad (7)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности материала,  $\sigma_T$  — предел текучести.

### 1.3. Усталостные свойства материала

Следующим этапом при оценке сопротивления усталости является выбор вида зависимостей, связывающих приложенную нагрузку с параметрами, характеризующими сопротивление усталости: долговечностью и уровнем накопленных повреждений.

Основной характеристикой материала, используемой для описания связи уровня внешней нагрузки с соответствующей ему долговечностью, является кривая усталости — кривая, описывающая зависимость максимального напряжения в цикле от числа циклов до разрушения при данном уровне максимального напряжения, постоянного в ходе всего процесса нагружения. Является аппроксимацией экспериментальных данных.

Кривая строится для некоторого уровня асимметрии цикла нагружения с коэффициентом асимметрии:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (8)$$

В случае, если существующая кривая построена для одного уровня асимметрии цикла нагружения, а изделие должно эксплуатироваться при другом уровне асимметрии, то история нагружения сводится к известному уровню асимметрии нагружения, например, используя зависимости (5-7).

## ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 2.1. Геометрическая модель

Так как в работе производится моделирование влияния циклов нагружения на зубную коронку, а также на сам зуб, был произведён поиск геометрической модели зуба с коронкой в формате STEP. Для рассмотрения был взят первый моляр, который представляет собой боковой зуб с обширной жевательной поверхностью, которая подвергается внешнему нагружению [10].

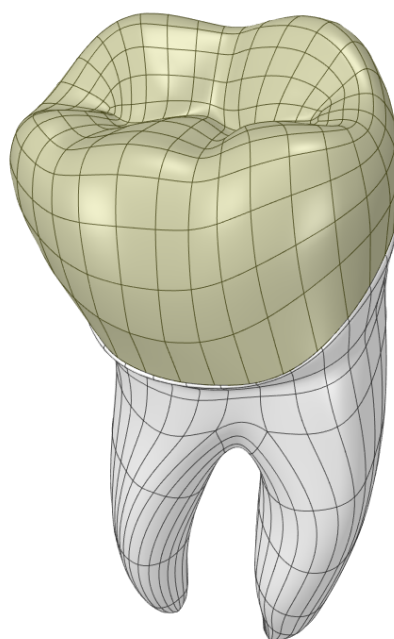


Рис. 1. Геометрическая модель зуба с короной

Геометрическая модель состоит из двух твердотельных частей: препарированного зуба и коронки.

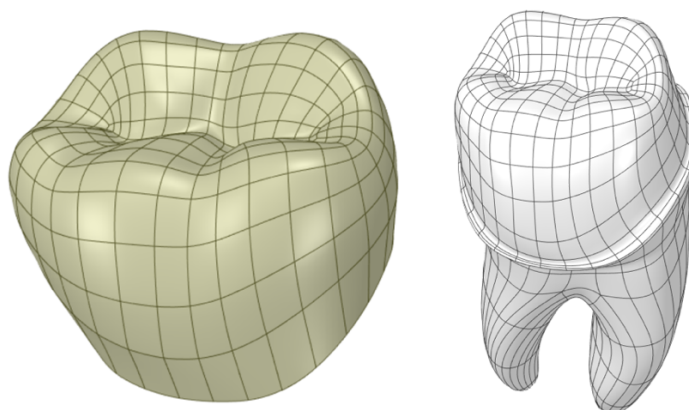


Рис. 2. Геометрические модели зуба и коронки по-отдельности

Для проведения численного моделирования геометрическая модель была упрощена посредством удаления корня в инструменте препарирования геометрии SpaceClaim, встроенном в конечно-элементный пакет ANSYS WORKBENCH. Таким образом, оставляем только внешнюю часть, которая находится непосредственно в зубной полости, а внутреннюю часть, представляющую собой корень, мы не рассматриваем, так как напряжения, которые возникают в коронке, а также в самом зубе, не влияют на внутреннюю часть зуба.

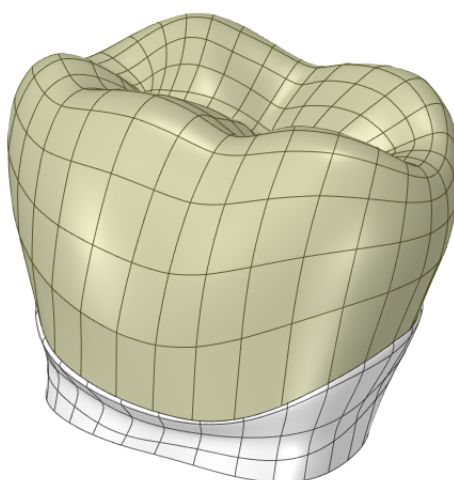


Рис. 3. Упрощённая геометрическая модель

## 2.2. Материалы

Для решения задачи об усталостном разрушении зубной коронки необходимо определить материалы и их упругие свойства, такие как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, значения прочности на изгиб, сжатие и сдвиг, а также усталостные кривые, которые представляют собой зависимости амплитуды напряжений от количества циклов нагружения(SN-curve) и задать их в модуле Engineering Data конечно-элементной системы ANSYS WORKBENCH.

Рассматриваемая геометрия состоит из зуба состоит из двух твердотельных частей: зуба и установленной на нём коронки, которая в



здоровом зубе состоит из эмали, которая при износе посредством препарирования зуба заменяется искусственной коронкой.

Материалом зуба является Дентин, составляющий основную часть структуры человеческого зуба и имеющий решающее значения для его структурной целостности [13].

- Модуль Юнга —  $18,6E+3$  МПа
- Коэффициент Пуассона — 0,31
- Прочность на изгиб — 105,5 МПа
- Прочность на сжатие — 267 МПа
- Прочность на сдвиг — 138 МПа

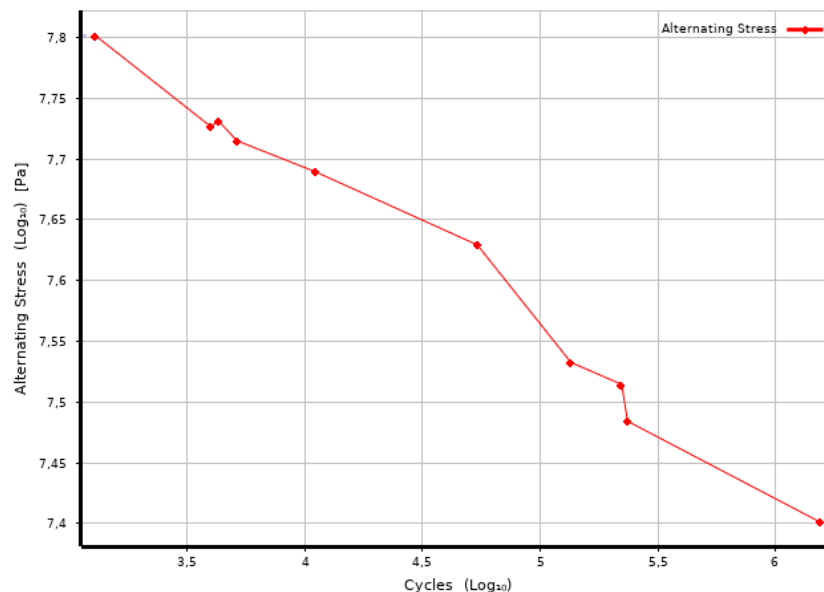


Рис. 4. Усталостная кривая для Дентина

Материалами, из которых состоит коронка в данной работе, как уже было сказано ранее, являются Диоксид Циркония и Дисиликат Лития, наиболее часто используемые для цельнокерамических коронок CAD/CAM-материалы [12].

Диоксид Циркония:

- Модуль Юнга —  $210E+3$  МПа
- Коэффициент Пуассона — 0,32
- Прочность на изгиб — 900 МПа
- Прочность на сжатие — 900 МПа

- Прочность на сдвиг — 900 МПа

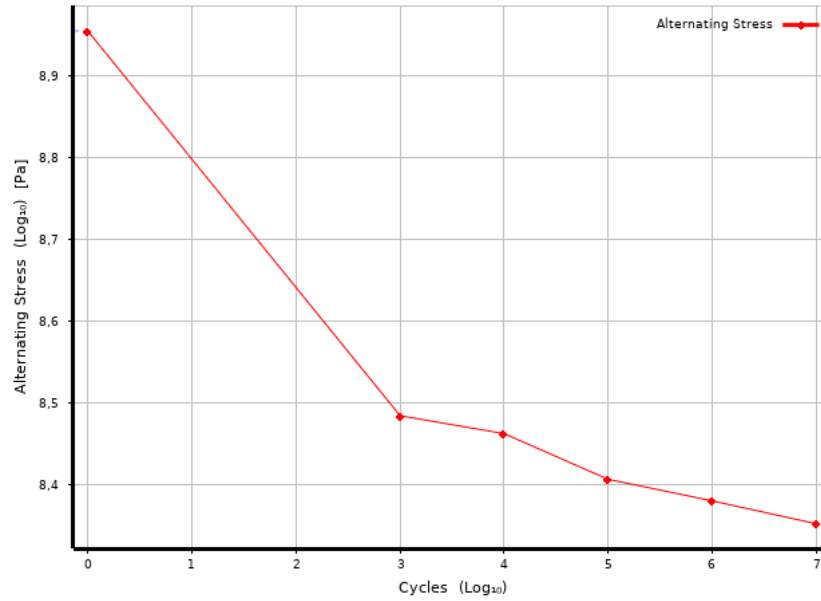


Рис. 5. Усталостная кривая для Диоксида Циркония  
Дисиликат Лития:

- Модуль Юнга — 95,9E+3 МПа
- Коэффициент Пуассона — 0,23
- Прочность на изгиб — 356,7 МПа
- Прочность на сжатие — 356,7 МПа
- Прочность на сдвиг — 356,7 МПа

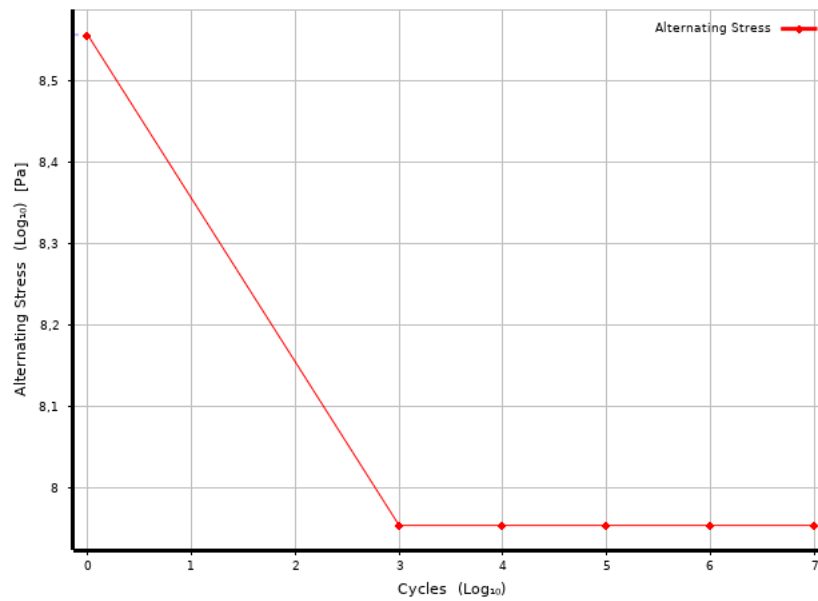


Рис. 6. Усталостная кривая для Дисиликата Лития

### 2.3. Конечно-элементная модель

Для построения конечно-элементной модели необходимо разделить трёхмерную расчётную область, которая представляет собой зуб с коронкой, на небольшие объёмы, называемые элементами. Для этого определим тип и размер элементов, являющиеся входными данными для генерации модели.

По геометрии, рассматриваемой в задаче была построена конечно-элементная модель, элементы которой представляют собой тетраэдры размером 0,4 мм.

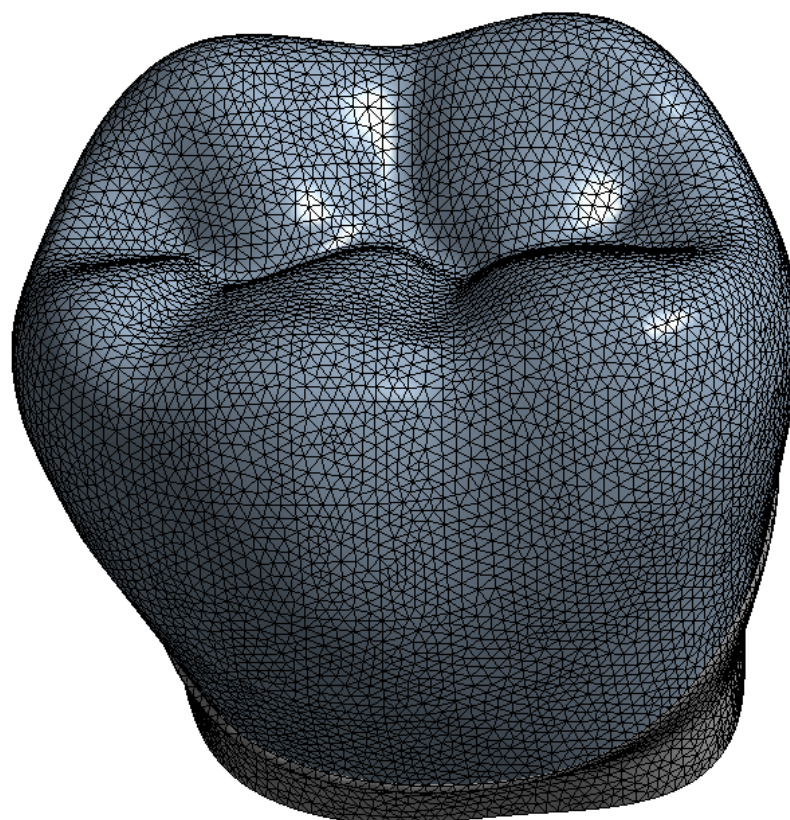


Рис. 7. Сетка

Количество узлов	451382
Количество элементов	305962

Табл. 1. Параметры сетки

## 2.4. Сила и учёт средних напряжений

Для имитации жевательного воздействия на зуб будет действовать периодическая сила 700 Н, являющаяся максимальной из средних сил человеческого укуса [6], с отнулевым циклом (Zero-Based).

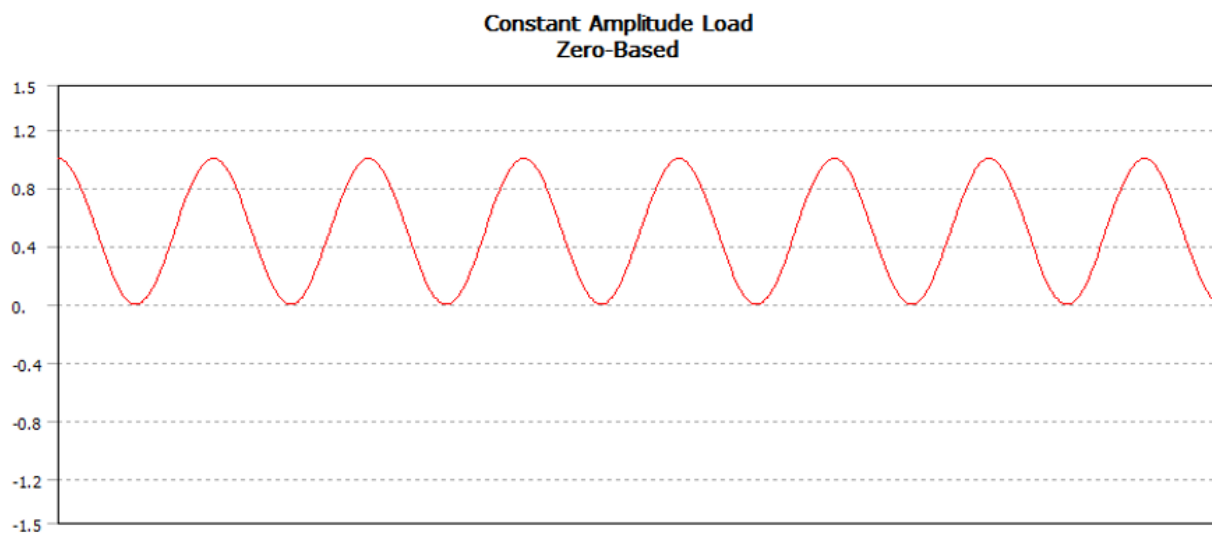


Рис. 8. Отнулевой цикл нагрузки (Zero-Based)

Так как цикл нагрузки отнулевой, большое значение имеют средние напряжения, возникающие в теле при циклической нагрузке. Материалы коронки: Диоксид Циркония и Дисиликат Лития – являются хрупкими, поэтому будем пользоваться теориями, имеющимися в модуле ANSYS Fatigue, учёта средних напряжений Гудмана (Goodman) и Зодерберга (Soderberg), так они подходят для рассмотрения малопластичный и хрупких материалов соответственно.

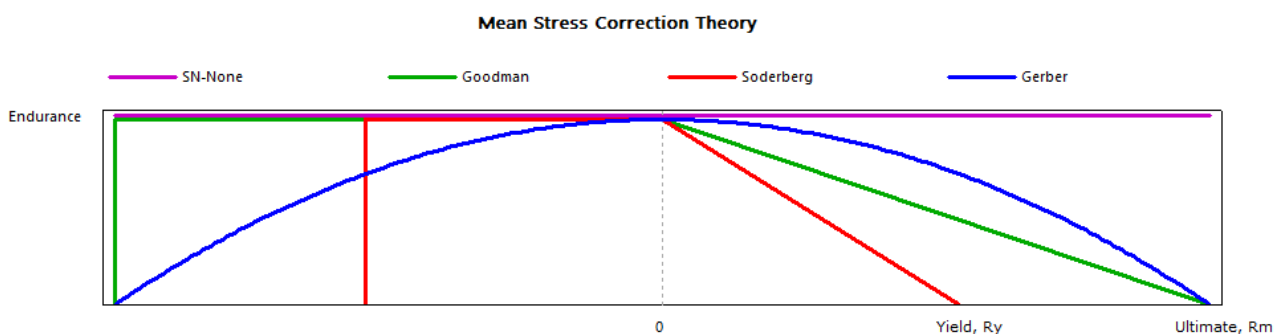


Рис. 9. Теории учёта средних напряжений

## ГЛАВА 3. КОННЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ

В данной главе будет рассмотрено три задачи с разными видами нагружения:

- сконцентрированная на малом участке площади зубной коронки
- распределённая по вогнутой жевательной поверхности
- задача контакта зуба с телом, которое будет являться приложенной нагрузкой

Таким образом, будет рассмотрен один утрированный и достаточно далёкий от реальности вариант, показывающий, что будет с коронкой и зубом при концентрированном нагружении, вариант, при котором нагрузка распределяется по всей жевательной поверхности, и вариант, учитывающий то, что не вся поверхность зуба подвержена нагрузке, а также не пренебрегающий трением между зубом и контактирующей с ним внешней телом-нагрузкой.

### 3.1. Задача с концентрированной силой

В данной постановке на коронку с заранее выбранным малым участком будет действовать сконцентрированная на данный участок периодическая сила 700 Н с отнулевым циклом (Zero-Based). Нижняя плоская поверхность зуба закреплена жёсткой заделкой (Fixed Support).

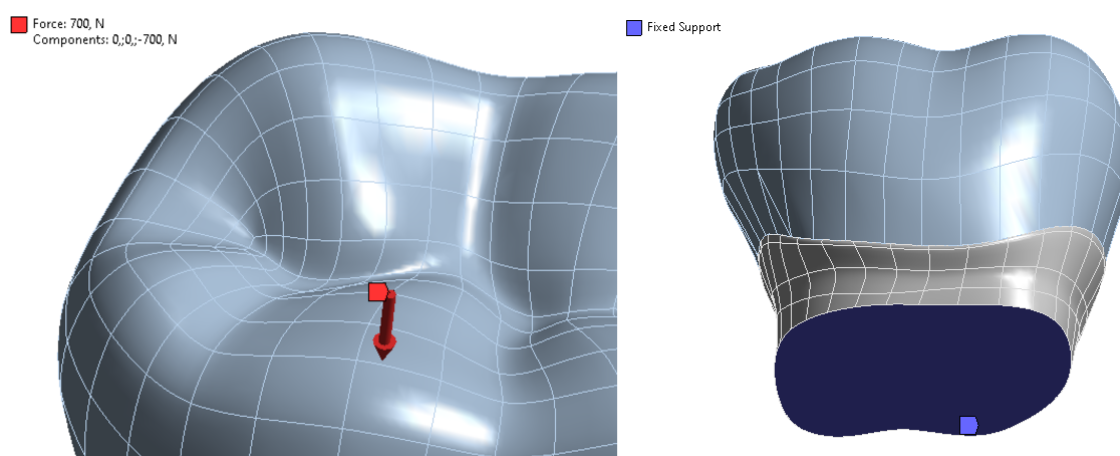


Рис. 10. Граничные условия для задачи с концентрированной силой

Решив задачу в данной постановке, было получено распределение напряжений по Мизесу для зуба и для коронок из обоих материалов. Данные напряжения являются внешней нагрузкой в задаче об усталостном разрушении и исходя из которых строится распределение амплитуды напряжений от количества циклов нагружения.

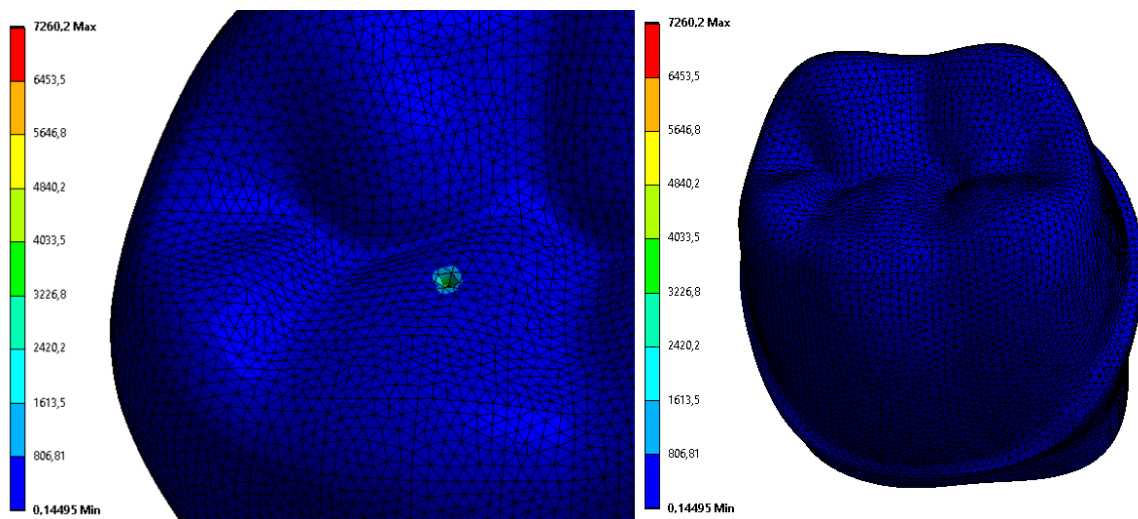


Рис. 11. Распределение напряжений для Диоксида Циркония и Дентина

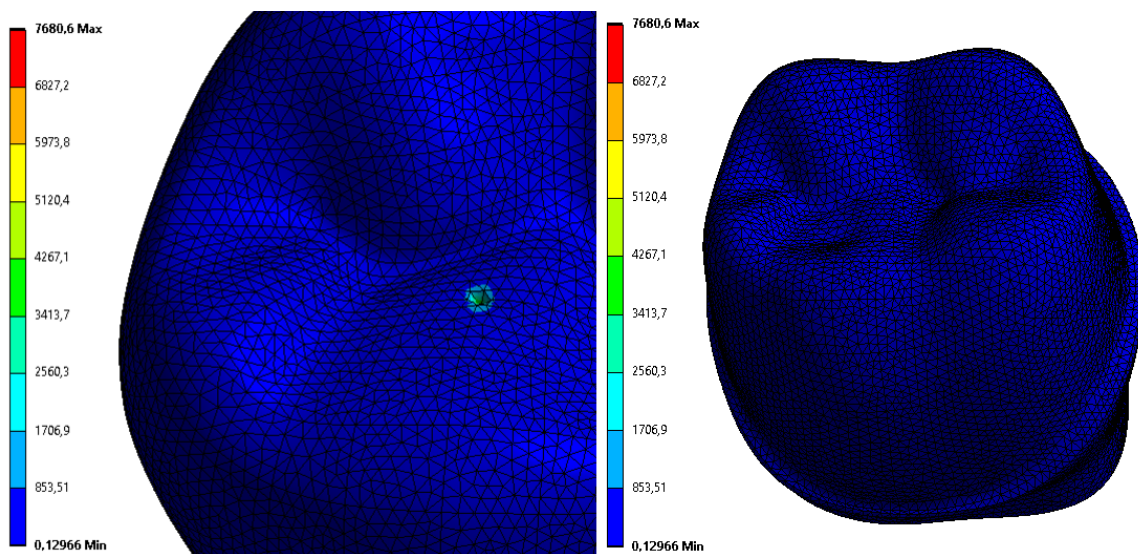


Рис. 12. Распределение напряжений для Дисиликата Лития и Дентина

Можно заметить, что коронка при воздействии концентрированной на малый участок силы подвергается воздействию наибольших напряжений, которые сильно превышают пределы прочности для обоих материалов, под действием которых коронка разрушается и быстро становится непригодной для эксплуатации носителем. Причём данный вывод можно сделать как для циркониевой коронки, так и для литиевой.



Для подтверждения данного результата были построены распределения амплитуды напряжений от количества циклов и покажем, что коронка «не проживёт» и одного цикла подобной нагрузки и подвергнется усталостному разрушению на данном участке площади.

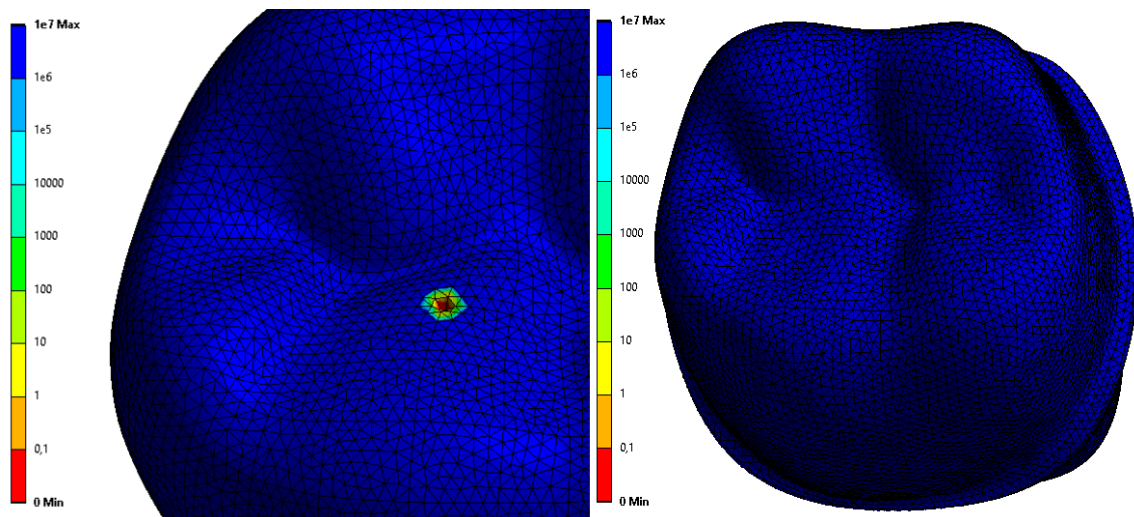


Рис. 13. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для  
Диоксида Циркония и Дентина

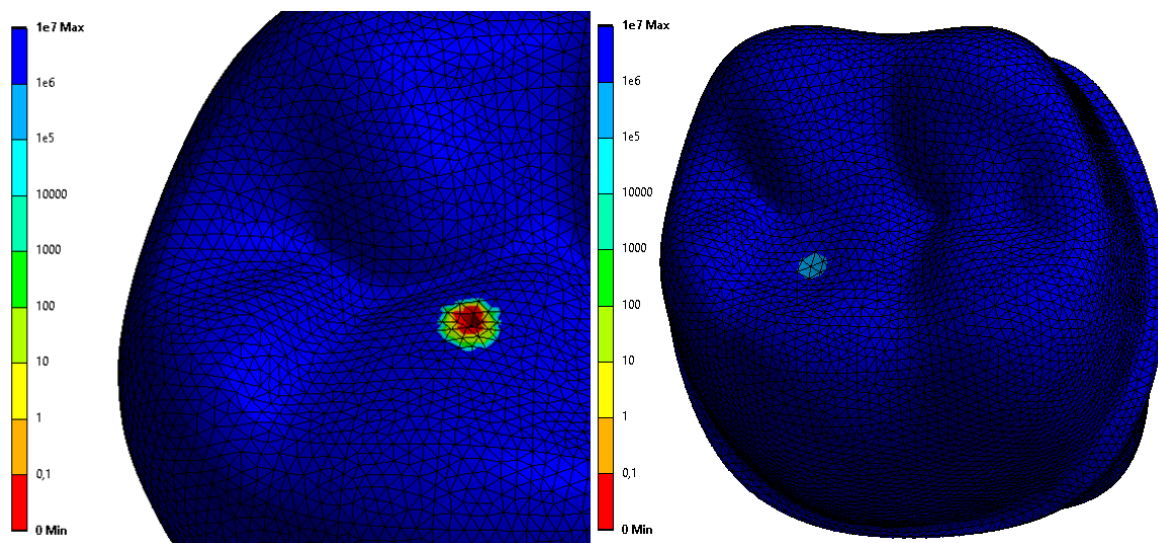


Рис. 14. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для  
Дисиликата Лития и Дентина

Как и было сказано ранее, ни одна, ни вторая коронки «не проживут» в данной малой области нагружения и одного цикла и подвергнутся разрушению, что говорит о том, что материалы не рассчитаны на нагрузки такого вида, да и сами такие нагрузки не представляются возможными в реальных условиях, так как при жевании на зуб действует сила распределённая

на области больших размеров. Примеры таких областей нагружения будут рассмотрены в последующих постановках.

### 3.2. Задача с силой, распределённой по вогнутой поверхности

В постановке такой задачи на вогнутую поверхность коронки будет действовать периодическая сила 700 Н с отнулевым циклом (Zero-Based), направленная вертикально вниз к жевательной площади. Нижняя плоская поверхность зуба также закреплена жёсткой заделкой (Fixed Support).

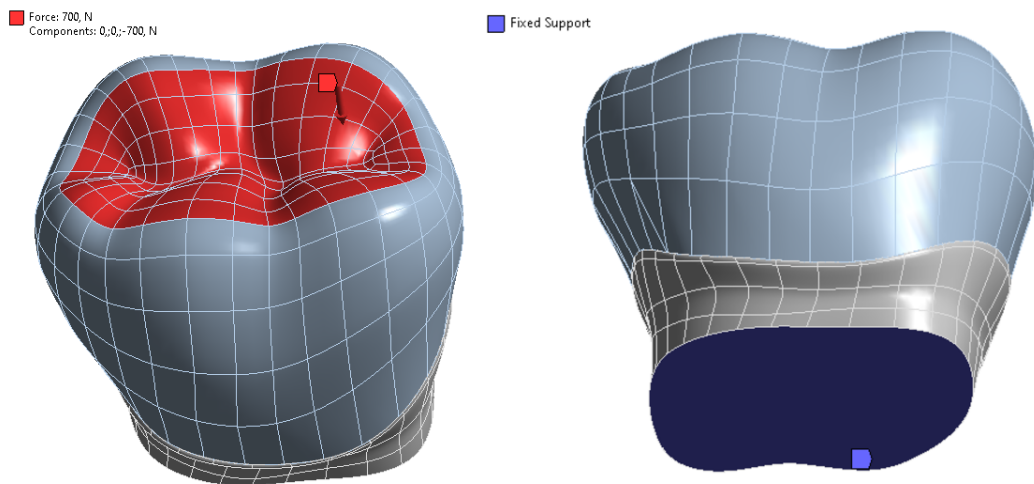


Рис. 15. Граничные условия для задачи с силой, распределённой по вогнутой поверхности

Распределения по Мизесу для задачи в данной постановке:

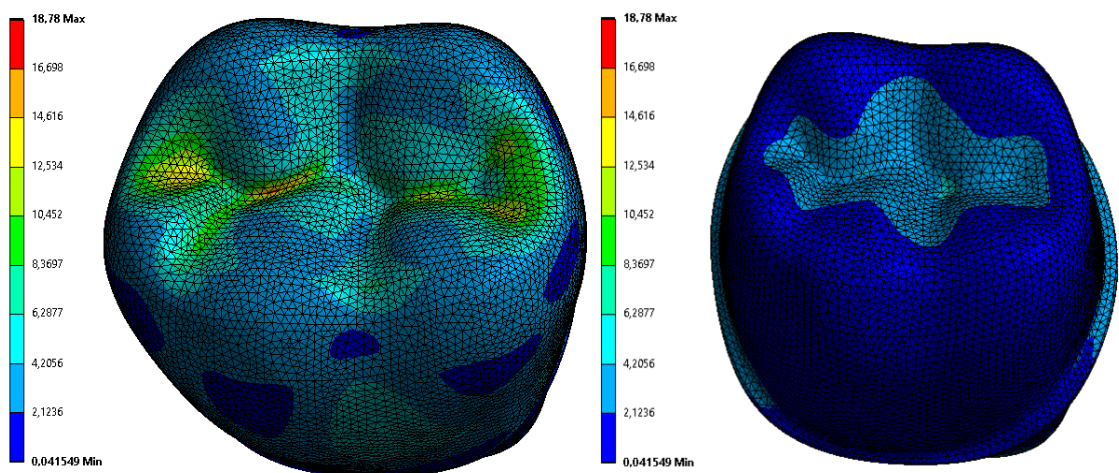


Рис. 16. Распределение напряжений для Диоксида Циркония и Дентина



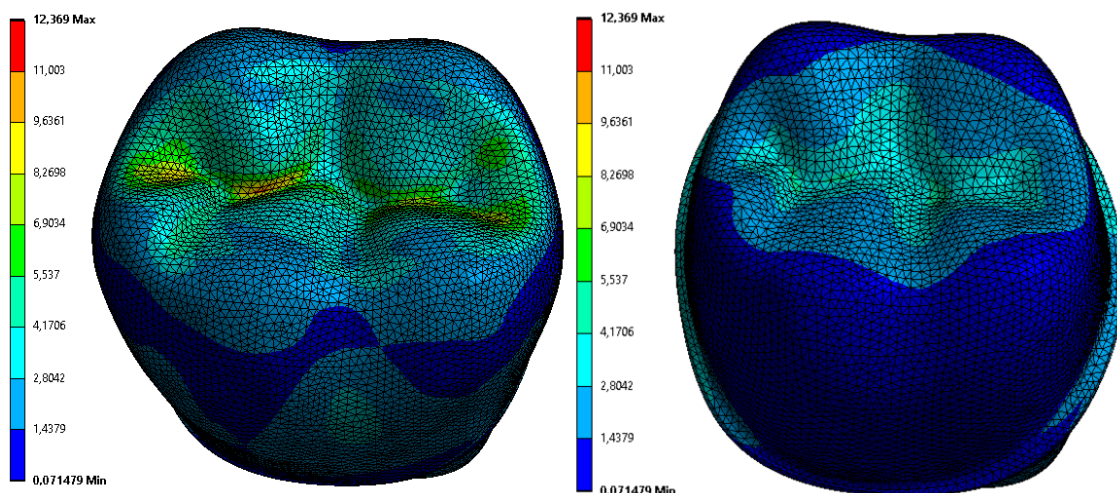


Рис. 17. Распределение напряжений для Дисиликата Лития и Дентина

Напряжения достигают своих максимальных значений лишь в малых областях коронки, а остальные напряжения распределяются по нагруженной площади, а также по остальной поверхности коронки и зубу под коронкой. Максимальные значения не достигают пределов прочности, что позволяет предположить, что при данной нагрузке коронка, а также сам зуб будут «жить вечно», что в задаче об усталостном разрушении означает, что количество циклов для разрушения тела будет более чем  $10E6$ .

Для убеждения в данном предположении было построено распределение циклов до разрушения для обеих коронок:

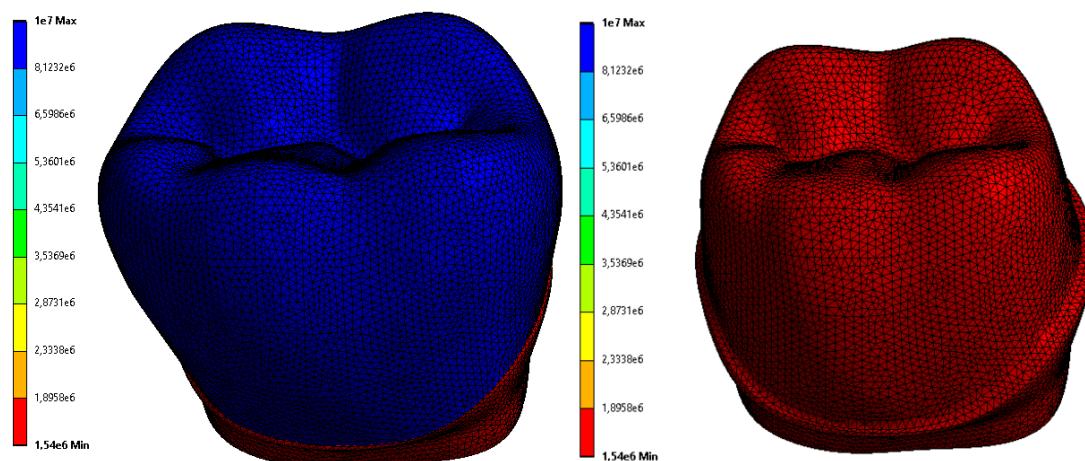


Рис. 18. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Диоксида Циркония и Дентина

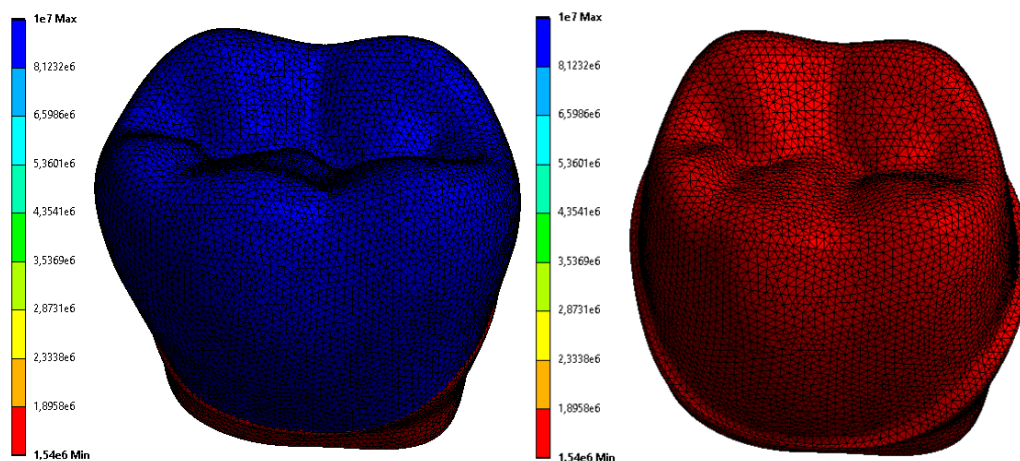


Рис. 19. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Дисиликата Лития и Дентина

Как было предположено ранее, обе коронки «проживут» более  $10E7$  циклов до разрушения, а зуб – более  $10E6$  циклов, что позволяет сделать вывод о том, что при данном виде нагрузки коронки из обоих материалов прослужат своим владельцам достаточно, чтобы не беспокоиться о её замене на протяжении годов. Ещё стоит учитывать то, что  $700\text{ Н}$  – это максимальное из средних значение силы укуса человека, из чего следует, что коронка прослужит ещё большее количество времени ввиду непостоянности сил укуса, которые будут в большинстве своём меньше значения в  $700\text{ Н}$ .

### 3.3. Задача контакта зуба с телом-нагрузкой

Так как прошлая задача не рассматривает силу, распределённую по всей жевательной поверхности, а также трение между зубом и приложенной нагрузкой, была рассмотрена контактная задача зуба с телом-нагрузкой, которая будет представлять собой полусферу, к плоской поверхности которой приложена сила  $700\text{ Н}$  и которая будет перемещаться только вертикально вниз к поверхности коронки, тем самым воздействуя на зуб в областях соприкосновения. Коэффициент трения тела-нагрузки об поверхность коронки будет взят равным  $0,3$  [12].

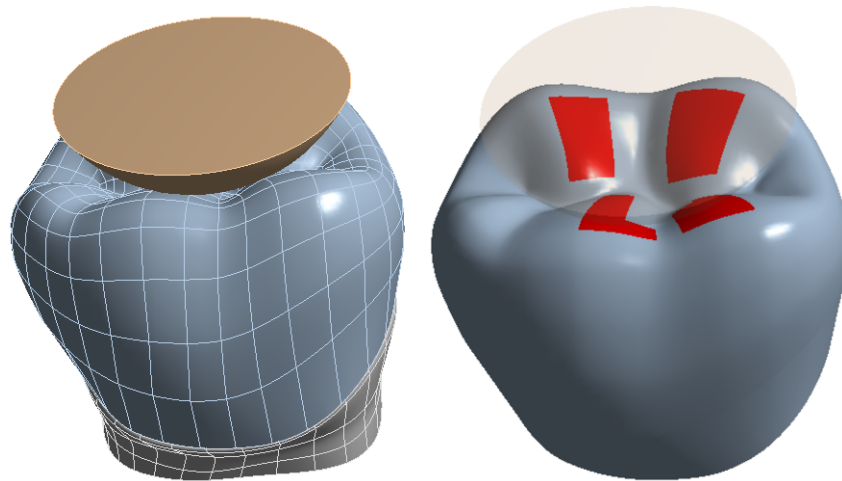


Рис. 20. Геометрия зуба с телом-нагрузкой и места их контакта

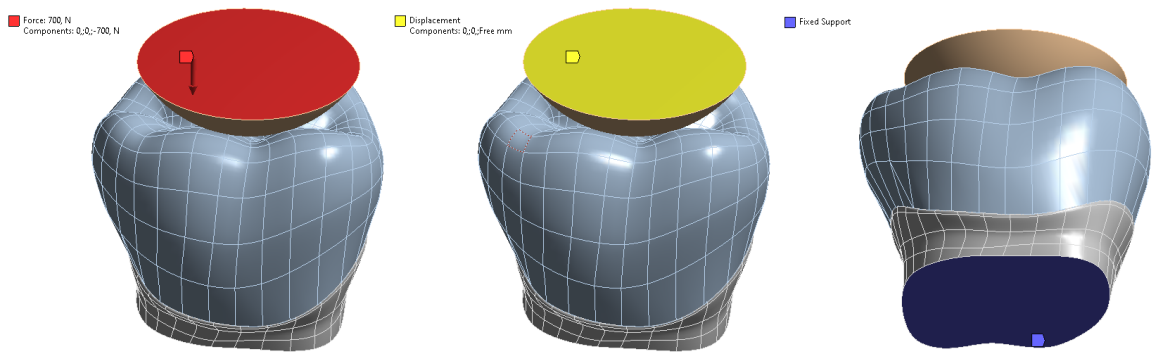


Рис. 21. Граничные условия для контактной задачи

Для данной постановки были получены распределения напряжений по Мизесу для обеих коронок и зуба, на котором они располагаются:

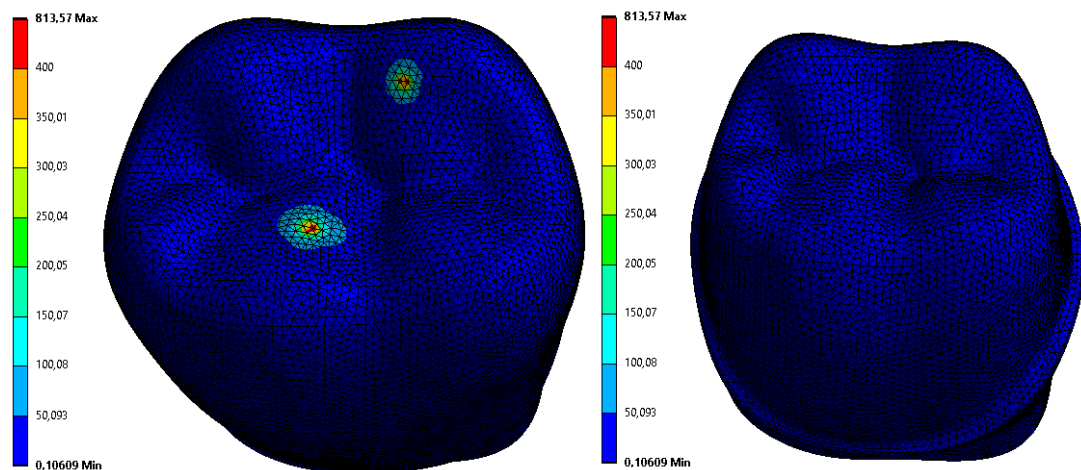


Рис. 22. Распределение напряжений для Диоксида Лития и Дентина



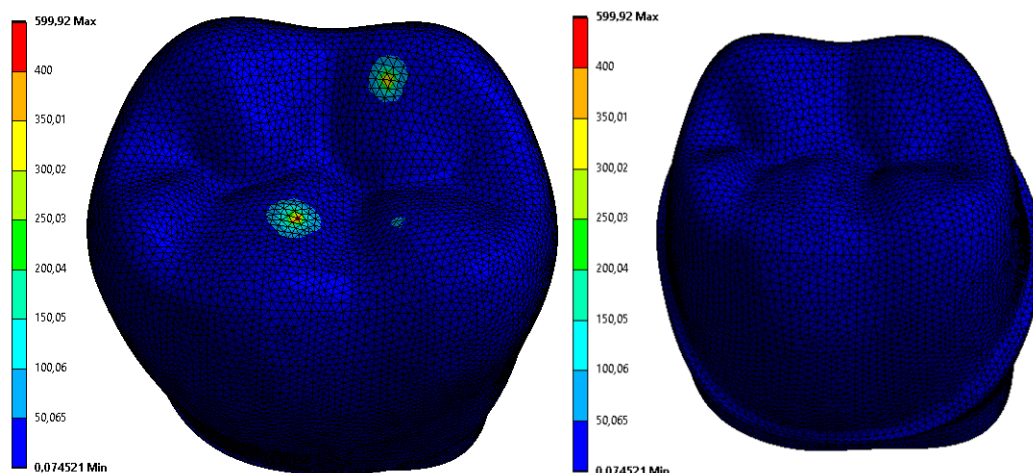


Рис. 23. Распределение напряжений для Дисиликата Лития и Дентина

Из данных распределений можно увидеть, что в максимальные значения напряжений, не превышающие пределов прочности для диоксида циркония, но при этом превышающие – для дисиликата лития, расположены в двух поверхностях контакта зубной коронки с телом-нагрузкой, остальные же напряжения распространяются по всей поверхности коронки. Напряжения же в препарированном под коронку зубе равномерно распределены по всей площади и минимальны, что составляет 0,1 МПа для задачи с циркониевой коронкой и 0,07 МПа – для литиевой. Из данных распределений можно сделать предположение о том, что на этих поверхностях нагружения литиевая коронка будет выдерживать малое количество циклов до усталостного разрушения, либо сразу разрушаться в этих местах.

Для проверки данных предположений были построены распределения количества циклов нагружения для обеих коронок:

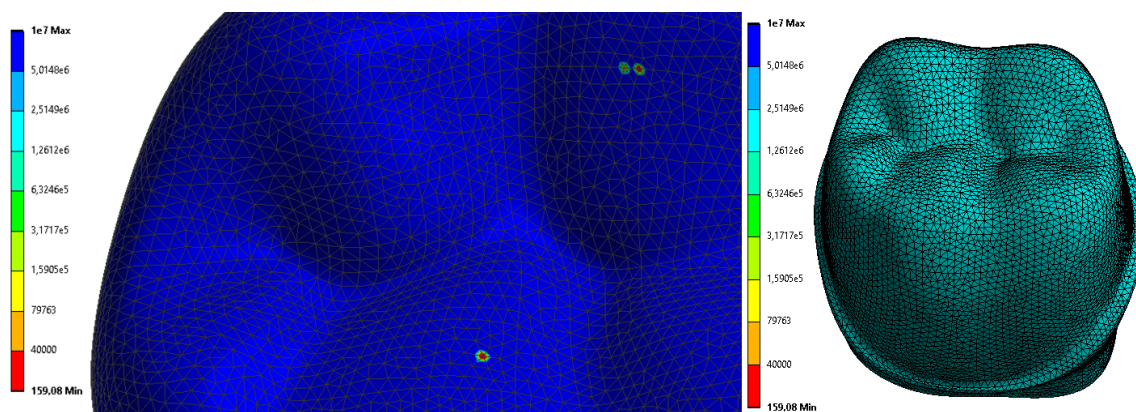


Рис. 24. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Диоксида Циркония и Дентина

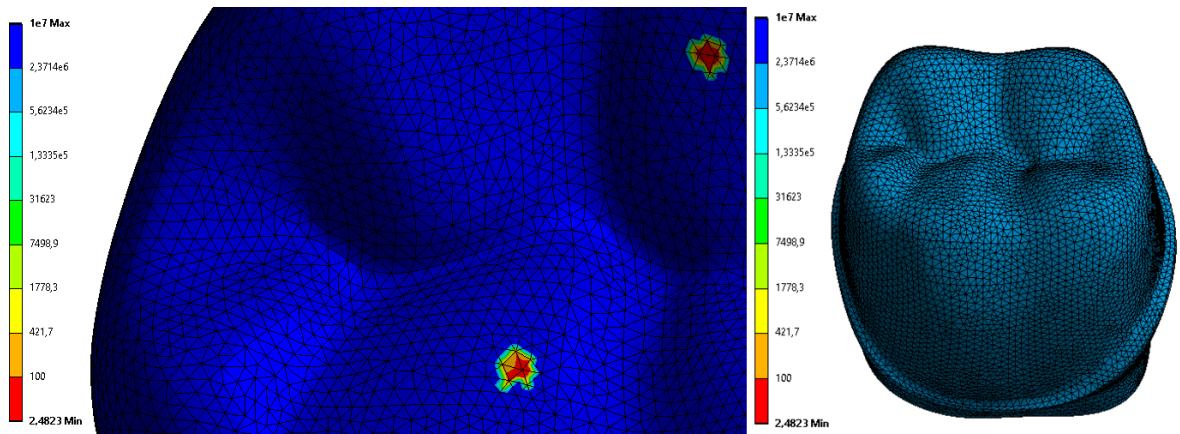


Рис. 25. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Дисиликата Лития и Дентина

Как ранее было сказано, в данных местах коронки «проживают» наименьшее количество циклов, что для циркониевой коронки равно примерно 160 циклов, а для литиевой – примерно 2 цикла. В остальных местах коронка, а также сам зуб выдерживают более чем  $10E6$  циклов нагружения. Из данных распределений можно сделать вывод, что эти места коронки являются наиболее подверженными усталостному разрушению, но так как сила 700 Н является максимальной из средних сил укуса человека, коронки, вследствие непостоянства значения приложенной нагрузки, а также мест её приложения, будут выдерживать большее количество циклов нагружения.

Так как цикл нагрузки является отнулевым, следует рассмотреть задачу об усталостном разрушении зубной коронки с учётом средних напряжений, так как они не будут равны нулю как в случае симметричного цикла, в котором значение нагрузки изменяется от амплитудного с отрицательным знаком к амплитудному с положительным. Ввиду хрупкости обоих материалов для изготовления коронки будут рассматриваться теории учёта средних напряжений Гудмана(Goodman) и Зодерберга(Soderberg):

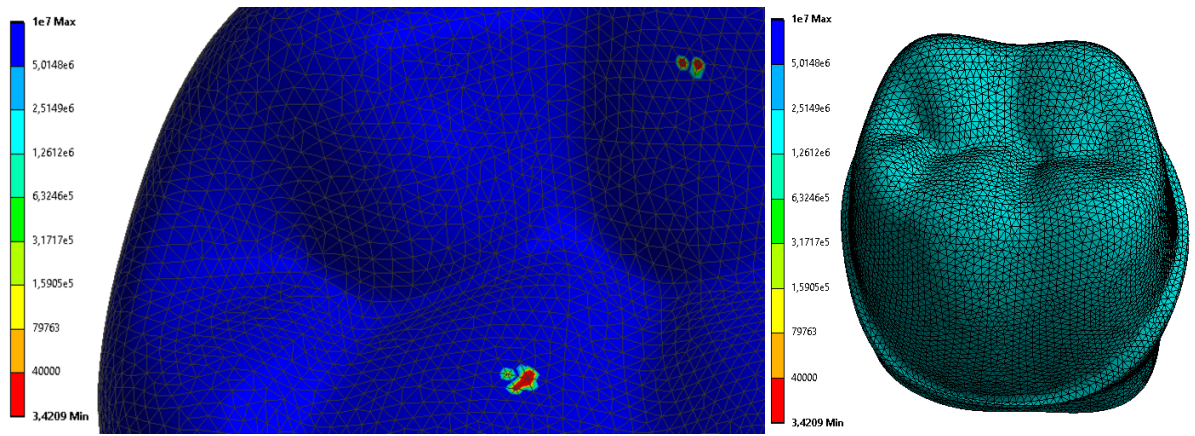


Рис. 26. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Диоксида Циркония и Дентина с учётом средних напряжений Гудмана

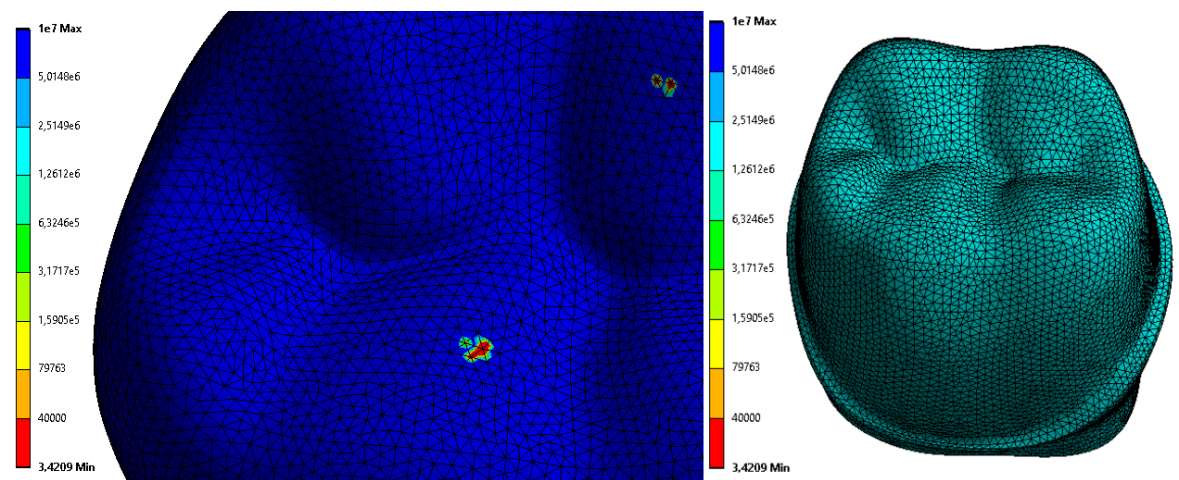


Рис. 27. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Диоксида Циркония и Дентина с учётом средних напряжений Зодерберга

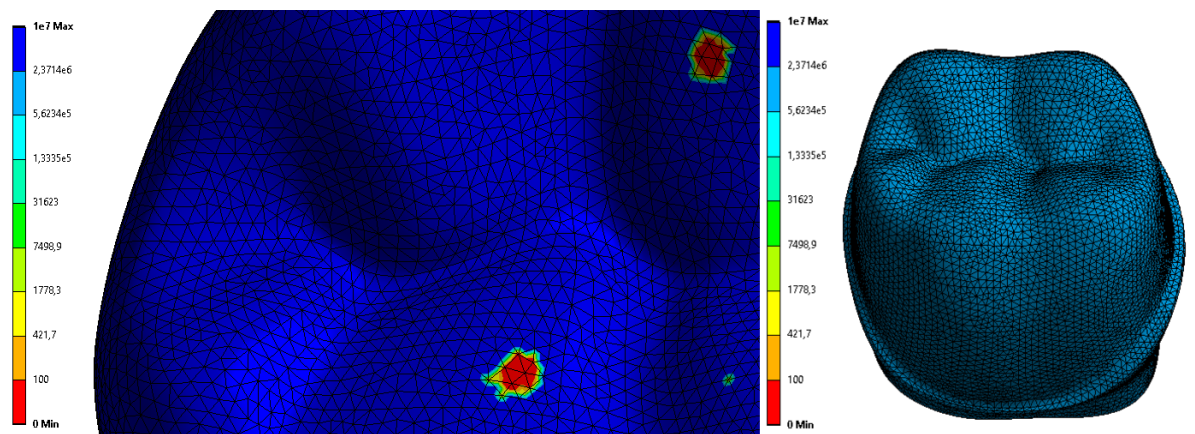


Рис. 28. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Дисиликата Лития и Дентина с учётом средних напряжений Гудмана



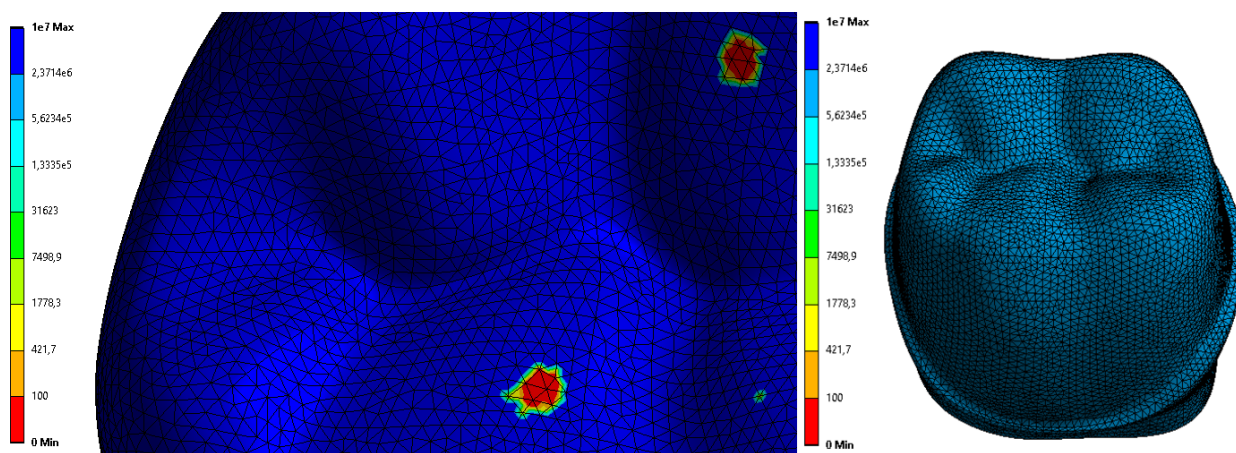


Рис. 29. Распределение количества циклов до усталостного разрушения для Дисиликата Лития и Дентина с учётом средних напряжений Зодерберга

Из полученных распределений можно увидеть, что учёт средних напряжений действительно сильно влияет на значения количества циклов до разрушения. Для обеих теорий минимальное количество циклов уменьшилось для обеих коронок. В наиболее подвергнутых усталостному разрушению областях для циркониевой коронки минимальное количество циклов для обеих теорий составляет примерно 3 цикла. Литиевая же коронка в данных местах не выдерживает и одного цикла нагружения. Но эти результаты справедливы при нагружении на одни и те же области одинаковой нагрузкой, которая является максимальной из средних сил укуса человека.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведён поиск и упрощение под решение задачи об усталостном разрушении геометрической модели первого моляра с коронкой, изучение его анатомии и последующее нахождение упругих и усталостных свойств дентина, материала основной части зуба, а также материалов коронки: Диоксида Циркония и Дисиликата Лития. Используя все найденные данные, в конечно-элементном пакете ANSYS WORKBENCH было произведено моделирование задач с несколькими видами нагрузок и учётом средних напряжений теориями Гудмана и Зодерберга, а также контактной задачи о нагружении зубной коронки телом-нагрузкой, представляющим собой полусферу, нагруженную силой в 700 Н. Результатом данного моделирования стали распределения количества циклов до усталостного разрушения для коронок из двух материалов, а также последующий сравнительный анализ полученных данных, в результате которого можно сделать вывод, что коронка из Диоксида Циркония выдерживает большее количество циклов нагружения в наиболее подверженных усталостному разрушению областях как с учётом средних напряжений, так и без их учёта, нежели коронка из Дисиликата Лития.

Данная модель, в особенности модель с контактным взаимодействием, позволяет рассчитывать распределение циклов до усталостного разрушения для различных материалов и оценивать долговечность коронки из заданного материала. Для этого необходимо задать упругие и усталостные свойства материала коронки и провести расчёт.

Данная модель может быть улучшена посредством задания непропорциональной нагрузки и изменения формы, а также положения тела-нагрузки, с которым контактирует зуб с расположенной на нём коронкой.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берендеев Н. Н. Сопротивление усталости. Основы. Учебно-методическое пособие — Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. — 64 с.
2. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. — М. : Изд-во стандартов, 1981. — 28 с.
3. Трошенко В. Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: в 2. ч. Ч. 1. — Киев: Наукова думка, 1987. — 320 с.
4. ANSYS release 11.0 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. — Электрон. дан. и прогр. — [Б. м.], 2007 — 2 электрон, опт. диск (DVD-ROM).
5. Biscaro L, Bonfiglioli R, Soattin M, Vigolo P. An in vivo evaluation of fit of zirconium-oxide based ceramic single crowns, generated with two CAD/CAM systems, in comparison to metal ceramic single crowns. *J Prosthodont.* 2013;
6. Black, G.V. The force exerted in the closure of the jaws. *Dent Cosmos.*1895;
7. Blatz MB. Long-term clinical success of all-ceramic posterior restorations. *Quintessence Int.*2002;
8. Chen C, Trindade FZ, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. The fracture resistance of a CAD/CAM Resin Nano Ceramic (RNC) and a CAD ceramic at different thicknesses. *Dent Mater.* 2014;
9. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater.* 2008;
10. GrabCAD Community: 3D CAD Model Library. — URL: <https://grabcad.com/library/first-molar-prepared-with-crown-1>
11. Guess PC, Silva NR, Bonfante EA, Coelho PG, Thompson VP. Monolithic CAD/CAM lithium disilicate versus veneered Y-TZP crowns: comparison of failure modes and reliability after fatigue. *Int J Prosthodont.* 2010;

12. Noor Al Mortadi, Khaled Bataineh, Mohammad Al Janaideh. Fatigue Failure Load of Molars with Thin-Walled Prosthetic Crowns Made of Various Materials: A 3D-FEA Theoretical Study. 2020
13. R. K. Nalla, V. Imbeni, J. H. Kinney, M. Staninec, S. J. Marshall, R. O. Ritchie. In vitro fatigue behavior of human dentin with implications for life prediction. 2002;
14. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Contemporary Fixed Prosthodontics. St. Louis, MO: Mosby; 2001
15. Shin-ichi Nishida. Failure analysis in engineering applications. – Butterworth, 1990. – 220 p.
16. Siervo S, Pampalone A, Siervo P, et al. Where is the gap? Machinable ceramic systems and conventional laboratory restorations at a glance. Quintessence Int. 1994;
17. Sjogren G, Sletten G, Dahl JE. Cytotoxicity of dental alloys, metals, and ceramics assessed by millipore filter, agar overlay, and MTT tests. J Prosthet Dent. 2000;