

DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_147

[С.И. Абакаров,](#)

член-корр. РАН, д.м.н., профессор, зав. кафедрой ортопедической и общей стоматологии

[Д.В. Сорокин,](#)

д.м.н., профессор кафедры ортопедической и общей стоматологии

[В.Ю. Лапушко,](#)

аспирант кафедры ортопедической и общей стоматологии

[С.С. Абакарова,](#)

к.м.н., доцент кафедры ортопедической и общей стоматологии

РМАНПО, 125993, Москва, Россия

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Абакаров С.И., Сорокин Д.В., Лапушко В.Ю., Абакарова С.С. Напряженно-деформированное состояние несъемного протеза на имплантатах при жевательной нагрузке в зависимости от угла наклона стенок абатмента. — *Клиническая стоматология*. — 2023; 26 (1): 147—157. DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_147

[S.I. Abakarov,](#)

Russian Academy of Science corresponding member, PhD in Medical Sciences, full professor of the Prosthodontics and general dentistry Department

[D.V. Sorokin,](#)

PhD in Medical Sciences, professor of the Prosthodontics and general dentistry Department

[V.Yu. Lapushko,](#)

postgraduate at the Prosthodontics and general dentistry Department

[S.S. Abakarova,](#)

PhD in Medical sciences, associate professor of the Prosthodontics and general dentistry Department

Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, 125993, Moscow, Russia

## Напряженно-деформированное состояние несъемного протеза на имплантатах при жевательной нагрузке в зависимости от угла наклона стенок абатмента

**Реферат.** Несмотря на широкое распространение несъемных протезов с опорой на имплантаты, ряд вопросов, связанных с их изготовлением остается дискуссионным. Многие авторы поднимают вопрос о необходимой степени угла наклона стенок абатментов для улучшения пассивной припасовки и устойчивости протеза, что и определило актуальность и **цель** данной публикации. **Материалы и методы.** Проведено исследование напряженно-деформированного состояния составляющих несъемного протеза при цементировании на абатмент (керамическая облицовка, каркас, цемент, абатмент) методом конечных элементов (МКЭ) в зависимости от конструкции несъемного протеза, высоты и угла наклона стенок абатмента. Всего было изучено и проанализировано 99 моделей. **Результаты.** При трех различно направленных жевательных нагрузках на несъемные протезы с увеличением угла наклона стенок абатмента уровень значений напряженно-деформированного состояния в керамической облицовке снижается по всей поверхности ( $p \leq 0,05$ ). Также при увеличении угла наклона стенок абатментов снижается уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему каркаса ( $p \leq 0,05$ ). При анализе результатов исследования напряжений в цементном слое с увеличением угла наклона стенок абатмента уровень касательных и растягивающих напряжений в цементном слое статистически достоверно ( $p \leq 0,05$ ) возрастает при жевательной нагрузке под углом  $30^\circ$  — 200 Н и поперечной жевательной нагрузке в 100 Н при увеличении угла наклона стенок абатмента в результате его чрезмерной конической поверхности, данные напряжения могут привести к расцементировке несъемного протеза. Исследование напряженно-деформированного состояния абатментов при трех различно направленных жевательных нагрузках показало резкий всплеск напряжений в их верхней части при угле наклона  $10^\circ$  и диаметром 4,5 мм в несъемных металлокерамических протезах на одиночной опоре, на двух опорах, на трех опорах, и статистически достоверное ( $p \leq 0,05$ ) уменьшение в 3,7 раза значений напряжения при уменьшении угла наклона до  $8^\circ$ . **Заключение.** Высота и угол наклона стенок абатмента влияют на неравномерность распределений напряжений в керамической облицовке, каркасе, цементном слое и абатменте.

**Ключевые слова:** жевательная нагрузка, имплантат, абатмент, несъемные протезы, металлокерамика, угол наклона стенок, конвергенция, напряженно-деформированное состояние

## Stress-deformed state of a non-removable prosthesis on implants under mustering load depending on the angle of abutment wall tilt

**Abstract.** Despite the widespread use of implant-supported fixed prostheses, a number of issues related to their manufacture remain debatable. Many authors raise the question of the necessary degree of inclination of the abutment walls to improve the passive fit and stability of the prosthesis, which determined the relevance and **purpose** of this publication. **Material and methods.** A study of the stress-strain state of the components of a fixed prosthesis during cementation on an abutment (ceramic veneer, frame, cement, abutment) was carried out using the finite element method (FEM), depending on the design of the fixed prosthesis, the height and angle of inclination of the abutment walls. A total of 99 models were studied and analyzed. **Results.** The analysis of the obtained results showed that with three differently directed chewing loads on fixed prostheses, with an increase in the angle of inclination of the abutment walls, the level of stress-strain state values in the ceramic veneer statistically significantly ( $p \leq 0.05$ ) decreases over the entire surface. Also, with an increase in the angle of inclination of the walls of the abutments, the level of maximum tensile stresses over the entire volume of the framework decreases statistically significantly ( $p \leq 0.05$ ). When analyzing the results of studying stresses in the cement layer with an increase in the angle of inclination of the abutment walls, the level of tangential and tensile

## FOR CITATION:

Abakarov S.I., Sorokin D.V., Lapushko V.Yu., Abakarova S.S. Stress-deformed state of a non-removable prosthesis on implants under masticatory load depending on the angle of abutment wall tilt. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2023; 26 (1): 147—157 (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_147

stresses in the cement layer increases statistically significantly ( $p \leq 0.05$ ) with a masticatory load at an angle of  $30^\circ$  — 200 N and a transverse masticatory load of 100 N at an increase in the angle of inclination of the walls of the abutment as a result of the excessive conical surface of the abutment, these stresses can lead to decementation of the fixed prosthesis. The study of the stress-strain state of abutments under three differently directed masticatory loads showed a sharp surge of stresses in their upper part at an inclination angle of  $10^\circ$  and a diameter of 4.5 mm in fixed metal-ceramic prostheses on a single support, on two supports, on three supports, and statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) a 3.7-fold decrease in stress values with a decrease in the angle of inclination to  $8^\circ$ . **Conclusions.** It has been established that the height and angle of inclination of the abutment walls affect the uneven distribution of stresses in the ceramic veneer, framework, cement layer and abutment.

**Key words:** chewing load, implant, abutment, fixed prostheses, ceramic-metal, wall inclination angle, convergence, stress-strain state

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое распространение несъемных протезов с опорой на имплантаты ряд вопросов, связанных с их изготовлением, остается дискуссионным. Многие авторы поднимают вопрос о необходимой степени угла наклона стенок абатментов для улучшения пассивной припасовки и устойчивости протеза [1–6]. Ряд специалистов отмечает, что цементный слой наряду с углом наклона опоры играет роль в надежном функционировании несъемного протеза [7–16]. Вместе с тем отмечен большой разброс в рекомендациях по углу наклона стенок абатмента [17–21].

Неизученным остается влияние процесса цементирования на составляющие несъемного протеза на имплантатах, поэтому в последнее время возникла необходимость изучения биомеханических процессов, возникающих в полости рта, многие авторы обращают особое внимание на моделирование клинических ситуаций и изучение напряженно-деформированных состояний методом конечных элементов [22–29].

**Цель исследования** — изучить напряженно-деформированное состояние составляющих несъемного протеза фиксированного на абатмент имплантата (керамическая облицовка, каркас, цемент, абатмент) методом конечных элементов при моделировании жевательной нагрузки в зависимости от конструкции несъемного протеза, высоты абатмента и угла наклона его стенок.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения влияния угла наклона стенок абатментов на распределение напряженно-деформированного состояния в абатментах, цементном слое, каркасе и керамической облицовке при цементировании использовался метод конечных элементов (МКЭ) с применением математического моделирования, которое проводилось в конечно-элементном программном комплексе Ansys Workbench. В работе изучали:

- металлокерамические коронки с опорой на одиночный абатмент (рис. 1А);
- металлокерамические коронки с опорой на два абатмента (рис. 1В);
- металлокерамические коронки с опорой на три абатмента (рис. 1С).

Исследовали несъемные протезы на абатментах высотой 3 и 5 мм с диаметром абатментов у основания уступа 4,5 мм, углом наклона стенок от  $0^\circ$  до  $10^\circ$  с шагом в  $2^\circ$ . При высоте абатментов 7 мм и диаметром у основания уступа 4,5 мм изучали углы наклона стенок от  $0^\circ$  до  $8^\circ$  с шагом в  $2^\circ$ , из-за сходимости стенок абатментов при угле наклона стенок  $10^\circ$  изучали дополнительные конструкции абатментов высотой 7 мм с увеличением диаметра у основания уступа до 6 мм и углами наклона стенок от  $0^\circ$  до  $10^\circ$  с шагом в  $2^\circ$  (рис. 2). При высоте абатментов 9 мм и диаметром у основания уступа 4,5 мм изучали углы наклона стенок от  $0^\circ$  до  $6^\circ$  с шагом

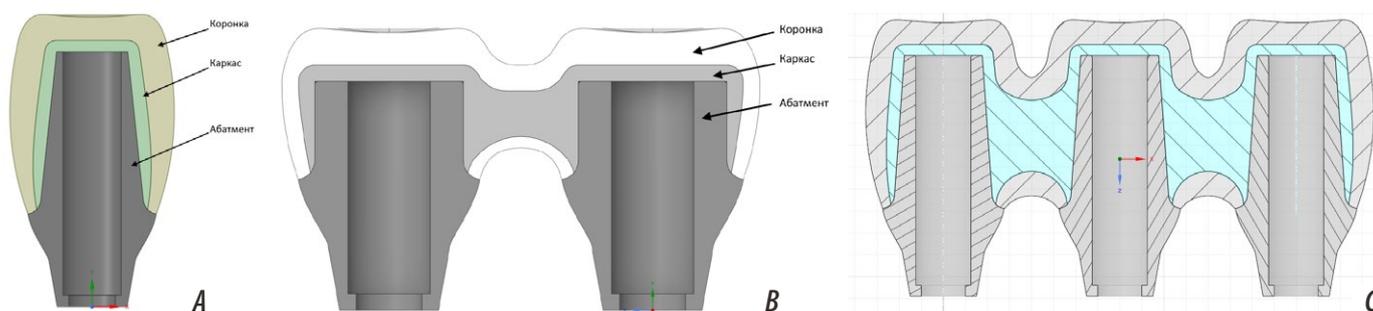


Рис. 1. Общий вид конструкции металлокерамической коронки: А — на одиночном абатменте; В — на двух опорах абатментов; С — на трех опорах абатментов

Fig. 1. General view of the design of the metal-ceramic crown: A — on a single abutment; B — on two abutment supports; C — on three abutment supports

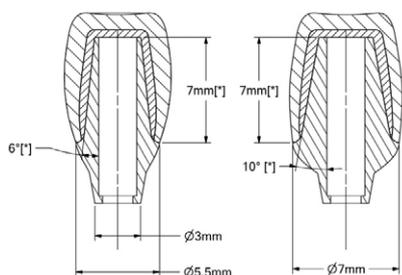


Рис. 2. Схема конструкций с высотой абатментов 7 мм при диаметрах 4,5 и 6 мм у основания уступов  
Fig. 2. Structures with abutment height of 7 mm with diameters of 4.5 and 6 mm at the base of the ledges

в 2°. При углах наклона стенок 8° и 10° и диаметре 4,5 мм происходило схождение стенок в верхней части абатмента без возможности проектирования шахты для винта, поэтому изучали дополнительные конструкции абатментов высотой 9 мм с увеличением диаметра у основания уступа до 6 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2°. В исследовании использовали стандартные параметры ширины уступа 0,5 мм и толщины цементной пленки 50 мкм. Всего было изучено и проанализировано 99 моделей.

При математическом моделировании абатментов и каркасов за основу были приняты стандартные механические свойства титанового сплава Ti6Al4V [30], а также использовались механические свойства стеклоиономерного цемента и керамики [31]. В исследовании использовались только линейно-упругие свойства материалов. Механические свойства материалов представлены в таблице.

Исследование с помощью МКЭ для изучения напряженно-деформированного состояния несъемных протезов в зависимости от угла наклона стенок абатментов проводилось в процессе моделирования жевательных нагрузок на несъемные металлокерамические протезы, цементированные на абатменты.

К предварительно напряженным фиксированным несъемным протезам на абатментах прикладывали жевательные нагрузки (рис. 3):

- Шаг 1. Вертикальная нагрузка 400 Н.
- Шаг 2. Нагрузка 200 Н под углом 30° к вертикали.
- Шаг 3. Поперечная нагрузка 100 Н.

При моделировании конечно-элементные конструкции, состоящие из абатмента, каркаса и керамической

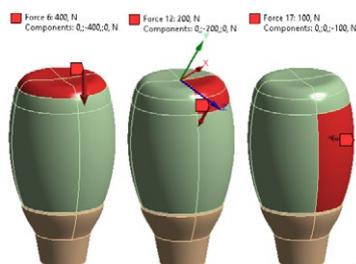


Рис. 3. Направления приложения и силы жевательных нагрузок на несъемные протезы, фиксированные с опорой: А — на одиночном абатменте, В — на двух абатментах

### Механические свойства материалов

#### Mechanical properties of materials

	Ti6Al4V	Керамика	Цементный слой
Модуль упругости, МПа	108 000	82 200	80
Коэффициент Пуассона	0,37	0,35	0,33
Предел прочности на растяжение, МПа	830	50	7
Предел прочности на сжатие, МПа	830	517	140

облицовки, содержали 200 тысяч узлов и 75 тысяч гексаэдрических элементов второго порядка. В местах скруглений сетка сгущена. Общий вид конечно-элементной сетки представлен на рис. 4.

Данный способ нагружения несъемных протезов жевательными нагрузками позволил учесть совокупность внутренних напряжений в несъемных протезах на абатментах после застывания цемента и распределения новых напряжений, возникших при жевательных нагрузках каждого несъемного протеза.

В результате изучения влияния наклона стенок абатментов на распределение напряжений в несъемных протезах в программном конечно-элементном комплексе Ansys WorkBench были получены распределения напряжений в абатментах, каркасах, керамической облицовке, а также были определены контактные давления и величины сдвиговых напряжений в цементном слое.

В качестве анализируемой компоненты напряжений для керамической облицовки были использованы максимальные растягивающие напряжения, поскольку керамика является материалом, подверженным хрупкому

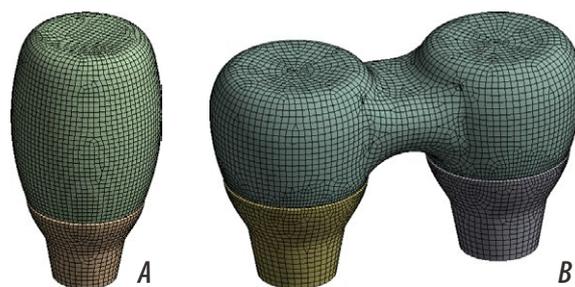


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной модели одиночного несъемного протеза фиксированного: А — на одиночном абатменте; В — на два абатмента

Fig. 4. General view of the finite element model of a single fixed prosthesis: A — on a single abutment; B — for two abutments

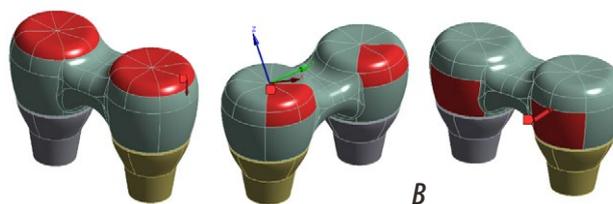
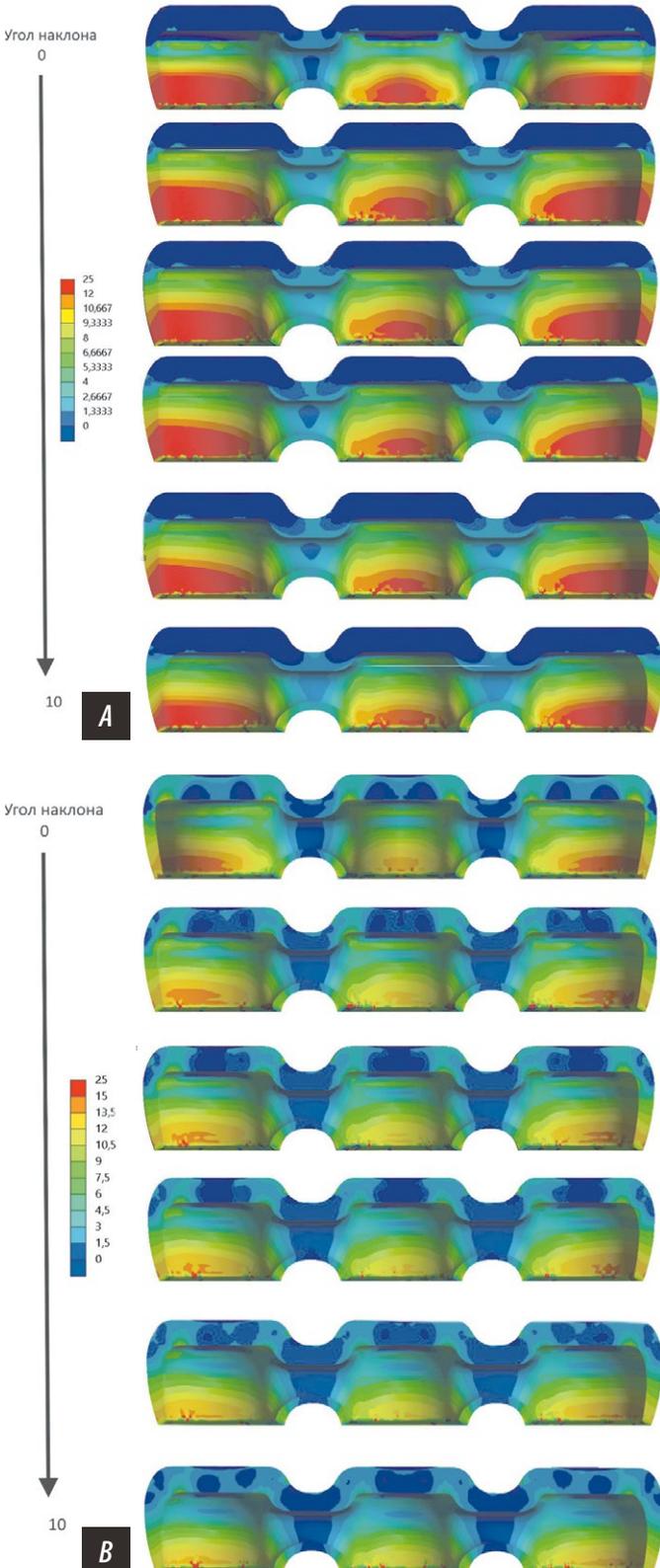


Рис. 3. Directions of application and forces of masticatory loads on fixed prostheses fixed with support: А — на одиночном абатменте, В — на двух абатментах

разрушению. В качестве анализируемой компоненты напряжений для титанового сплава Ti6Al4V были использованы эквивалентные напряжения по Мизесу, поскольку титановый сплав является пластичным материалом.



В качестве анализируемой компоненты для определения прочности цементного слоя рассматривались максимальные растягивающие напряжения и максимальные напряжения сдвига, которые позволили выделить зоны, подверженные начальному разрушению цементного слоя.

В качестве критерия оценки изучаемых углов наклона стенок абатментов рассматривались прочностные свойства в совокупности всей конструкции по каждому ее элементу (абатмент, цементный слой, каркас, керамическая облицовка).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показало исследование процесса нагружения металлокерамических коронок на абатменты жевательными нагрузками, в керамической облицовке напряжения в основном возникают в пришеечной области, и в пришеечной области они уменьшаются по мере увеличения угла наклона стенок абатментов (рис. 5).

Данные исследования уровня напряжений оценивали на графиках в одинаковых точках для отслеживания

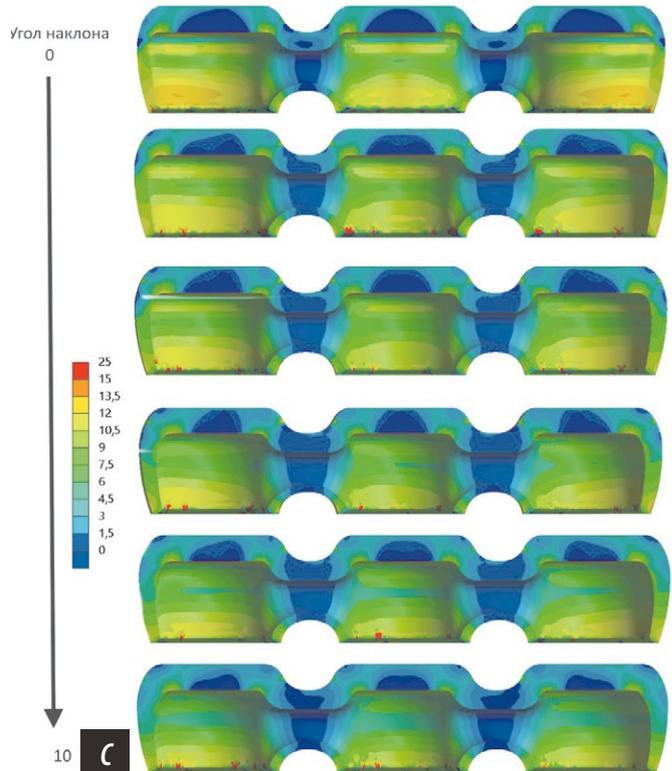


Рис. 5. Распределение максимальных растягивающих напряжений в керамической облицовке несъемного протеза на трех абатментах и углах наклона стенки 10°, 8°, 6°, 4°, 2° и 0°: А — при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н, В — при жевательной нагрузке 200 Н под углом 30°, С — при поперечной жевательной нагрузке 100 Н  
 Figure 5. Distribution of maximum tensile stresses in the ceramic lining of a fixed prosthesis on three abutments and wall inclination angles of 10°, 8°, 6°, 4°, 2° and 0°: А — with a vertical chewing load of 400 N, В — with a chewing load 200 N at an angle of 30°, С — with a transverse chewing load of 100 N

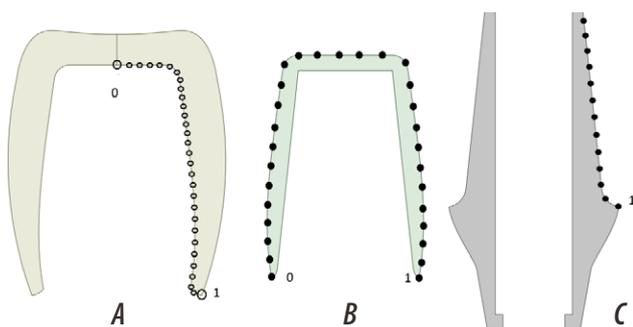


Рис. 6. Схематическое обозначение точек на элементах конструкции для отслеживания изменений и отображения их на графике: А — керамическая облицовка; В — каркас; С — абатмент  
Fig. 6. Schematic designation of points on structural elements to track changes and display them on a graph: A — ceramic cladding; B — frame; C — abutment

изменений показателей. На рис. 6 представлено схематическое обозначение точек на элементах для отображения их на графике.

Как показано на рис. 7, увеличение уровня напряжения возникает в пришеечной области керамической облицовки, максимальное при  $0^\circ$  напряжение достигает 14,97 МПа; при  $2^\circ$  — 14,47 МПа;  $4^\circ$  — 14,37 МПа;  $6^\circ$  — 13,82 МПа;  $8^\circ$  — 13,33 МПа;  $10^\circ$  — 13,17 МПа.

Как показано на рис. 8, увеличение уровня напряжения возникает в пришеечной области керамической облицовки, максимальное при  $0^\circ$  напряжение достигает 15,16 МПа; при  $2^\circ$  — 14,77 МПа;  $4^\circ$  — 14,65 МПа;  $6^\circ$  — 13,99 МПа;  $8^\circ$  — 12,24 МПа;  $10^\circ$  — 9,86 МПа.

Как показано на рис. 9, увеличение уровня напряжений возникает в середине коронки и в пришеечной

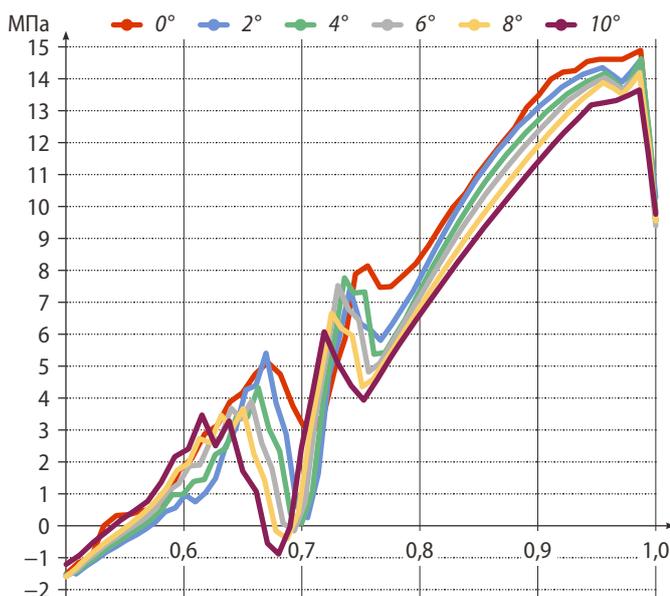


Рис. 7. График распределения максимально растягивающих напряжений в керамической облицовке несъемного металлокерамического протеза с опорой на 3 абатмента с высотой 3 мм при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н  
Fig. 7. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the ceramic lining of a non-removable metal-ceramic prosthesis supported by three abutments with a height of 3 mm at a vertical masticatory load of 400 N

области керамической облицовки. Максимальное при  $0^\circ$  напряжение достигает 11,79 МПа; при  $2^\circ$  — 9,93 МПа;  $4^\circ$  — 9,65 МПа;  $6^\circ$  — 8,82 МПа;  $8^\circ$  — 6,47 МПа;  $10^\circ$  — 6,24 МПа.

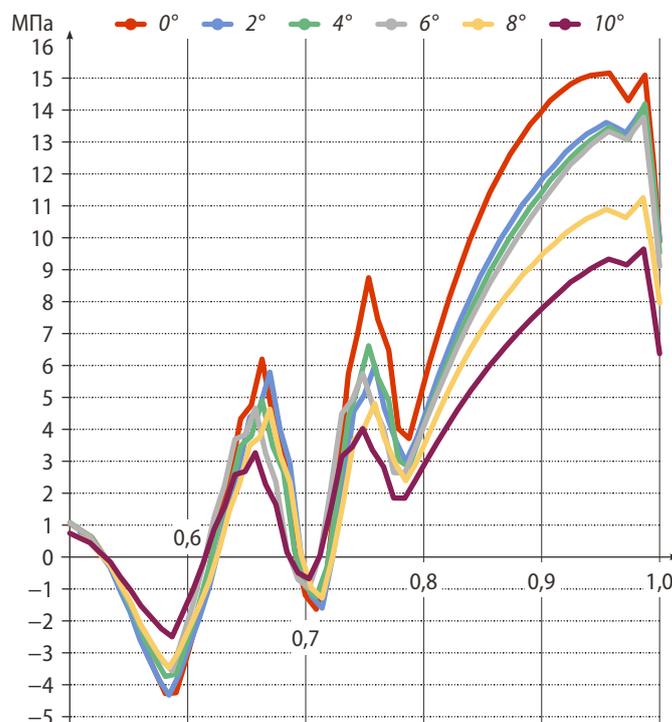


Рис. 8. График распределения максимально растягивающих напряжений в керамической облицовке несъемного металлокерамического протеза с опорой на три абатмента с высотой 3 мм при жевательной нагрузке 200 Н под углом  $30^\circ$   
Fig. 8. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the ceramic veneer of a non-removable metal-ceramic prosthesis supported by three abutments with a height of 3 mm at a masticatory load 200 N at an angle of  $30^\circ$

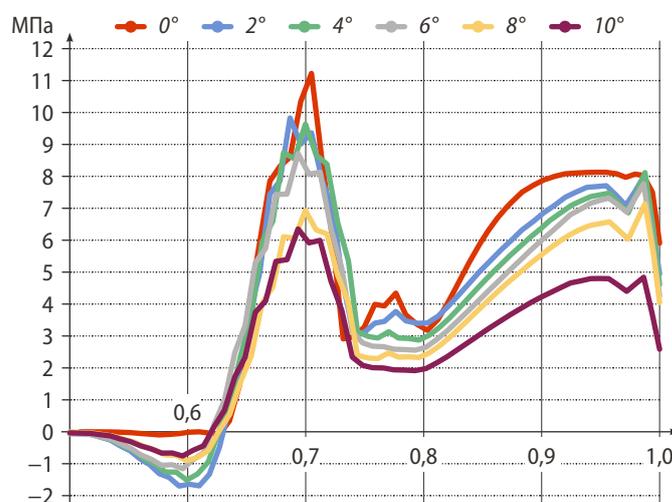


Рис. 9. График распределения максимально растягивающих напряжений в керамической облицовке несъемного металлокерамического протеза с опорой на три абатмента с высотой 3 мм при поперечной жевательной нагрузке 100 Н  
Fig. 9. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the ceramic lining of a non-removable metal-ceramic prosthesis supported by three abutments with a height of 3 mm at a transverse 100 N masticatory load

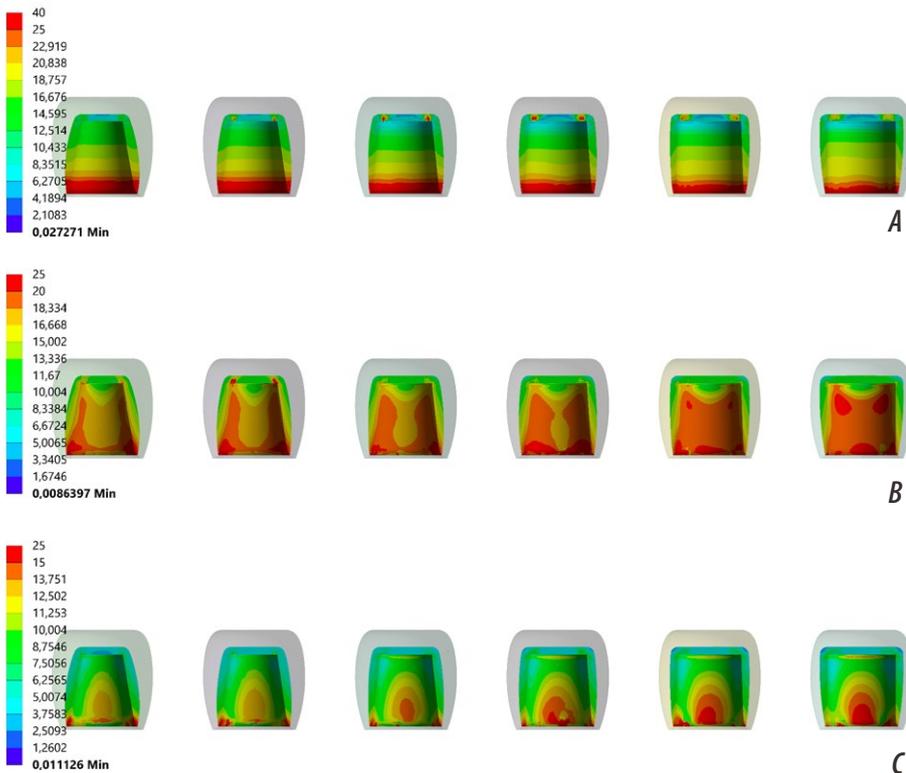


Рис. 10. Распределение напряженно-деформированного состояния в каркасе несъемного протеза на единичном абатменте высотой 5 мм и углами наклона стенки 10°, 8°, 6°, 4°, 2° и 0°: **A** — при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н; **B** — при жевательной нагрузке 200 Н под углом 30° к несъемному протезу, **C** — при поперечной жевательной нагрузке 100 Н  
 Fig. 10. Distribution of the stress-strain state in the frame of a fixed prosthesis on a single abutment 5 mm high and wall inclination angles of 10°, 8°, 6°, 4°, 2° and 0°: **A** — with a vertical masticatory load of 400 N; **B** — with a chewing load of 200 N at an angle of 30° to a fixed prosthesis, **C** — with a transverse chewing load of 100 N

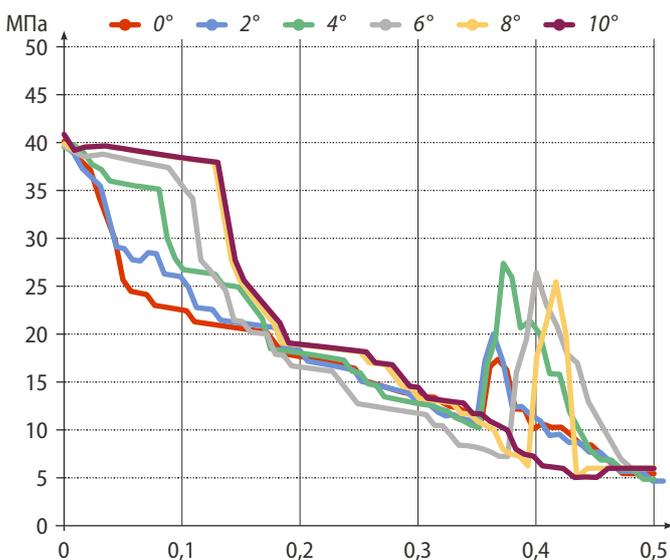


Рис. 11. График распределения максимально растягивающих напряжений в металлическом каркасе несъемного металлокерамического протеза с опорой на единичный абатмент высотой 5 мм при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н  
 Fig. 11. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the metal frame of a non-removable ceramic-metal prosthesis supported by a single abutment with a height of 5 mm at a vertical masticatory load of 400 N

Визуальная оценка напряженно-деформированного состояния и анализ графиков изменения уровня напряжений показал, что при увеличении угла наклона стенок абатментов снижается уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему керамической облицовки. Также при увеличении угла наклона стенок абатментов при вертикальной нагрузке 400 Н и нагрузке 200 Н под углом 30° к вертикали уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему керамической облицовки снижается, однако в пришеечной области уровень напряжений растет за счет опоры металлокерамических протезов на уступ.

При поперечной нагрузке и увеличении угла наклона стенок абатмента снижается уровень максимальных растягивающих напряжений по всей керамической облицовке. Различия значений напряжений при жевательных нагрузках в керамической облицовке между несъемными протезами на одиночной опоре, на двух и трех опорах абатментов равнозначной высотой 3, 5, 7 и 9 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2° не значимы ( $p \geq 0,05$ ). При увеличенном диаметре опоры абатмента 6 мм значения напряженно-деформированного состояния ниже при всех углах наклона стенок абатментов, в отличие от значений напряженно-деформированного состояния при абатменте с диаметром в пришеечной области 4,5 мм ( $p \leq 0,05$ ).

Таким образом, при увеличении угла наклона стенок абатмента уровень напряжений по всей поверхности керамической облицовки снижается.

При изучении напряженно-деформированного состояния в металлическом каркасе всплеск напряжений наблюдался в пришеечной области каркаса, в основном при воздействии вертикальной нагрузки 400 Н — это обусловлено опорой металлокерамической конструкции на уступ (рис. 10А). При жевательной нагрузке под углом 30° на несъемный протез уменьшалось напряженно-деформированное состояние по всей поверхности каркаса с увеличением угла наклона стенок абатмента (рис. 10В). При поперечной нагрузке 100 Н наблюдается увеличение напряженно-деформированного состояния по центру металлического каркаса в пришеечной области, а также у основания каркаса и уступа (рис. 10С).

Как показано на рис. 11, увеличение уровня напряжения при воздействии вертикальной нагрузки 400 Н, обусловленное опорой металлического каркаса на уступ, возникает в пришеечной области металлического

каркаса и достигает максимальных значений до 40 МПа при всех углах наклона абатмента.

Как показано на рис. 12, увеличение уровня напряжения при воздействии жевательной нагрузки под углом 30° 200 Н возникает в пришеечной области металлического каркаса и достигает максимальных значений до 25 МПа при всех углах наклона абатмента, но напряженно-деформированное состояние уменьшается по всей поверхности каркаса с увеличением угла наклона стенок абатмента.

Как показано на рис. 13, увеличение уровня напряжения при воздействии жевательной поперечной нагрузки 100 Н возникает в пришеечной области металлического каркаса и достигает максимальных значений до 25 МПа при углах наклона абатмента 0° и 2°, 19,6 МПа — при угле наклона 4°, 17,3 МПа — при угле наклона стенки 6°, 16,8 МПа — при угле наклона 8°, а самые минимальные значения доходят до 14,9 МПа при угле наклона 10°.

При увеличении угла наклона стенок абатментов снижается уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему каркаса. При увеличении угла наклона стенок абатментов при вертикальной нагрузке 400 Н отмечается увеличение напряженно-деформированного состояния в пришеечной области, обусловленное опорой металлокерамического протеза на уступ. При нагрузке 200 Н под углом 30° к вертикали и поперечной нагрузке 100 Н уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему каркаса снижается с увеличением угла наклона стенок абатментов. При нагрузке 200 Н под углом 30° уровень напряжений при 0° по всему каркасу находится в диапазоне от 20 до 25 МПа, с увеличением угла уровень напряжений снижается при 10° до 15–20 МПа по всей поверхности каркаса. При поперечной нагрузке 100 Н уровень напряжений при 0° достигает до 24,8 МПа; при 2° — 24,6 МПа; при 4° — 20,63 МПа; при 6° — 17,4 МПа; при 8° — 16,4 МПа; при 10° — 15,6 МПа.

Различия значений напряжений при жевательных нагрузках в каркасе между несъемными протезами на одиночной опоре, на двух и трех опорах абатментов равнозначной высотой 3, 5, 7 и 9 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2° не значимы ( $p \geq 0,05$ ). При увеличенном диаметре опоры абатмента 6 мм значения напряженно-деформированного состояния ниже при всех углах наклона стенок абатментов, в отличие от значений напряженно-деформированного состояния при абатменте с диаметром в пришеечной области 4,5 мм ( $p \leq 0,05$ ).

Таким образом, при увеличении угла наклона стенок абатмента уровень напряжений по всей поверхности металлического каркаса снижается.

В цементном слое всплеск напряжений наблюдался в верхней части цементной пленки с уменьшением угла наклона стенки абатмента, в основном при воздействии вертикальной нагрузки 400 Н. Значения напряжений в цементном слое возрастает при жевательной нагрузке под углом 30° — 200 Н и поперечной жевательной

нагрузке в 100 Н при увеличении угла наклона стенок абатмента в пришеечной области несъемного металло-керамического протеза.

Увеличение уровня касательных напряжений в цементном слое при воздействии жевательной вертикальной нагрузки 400 Н возрастает с уменьшением угла наклона стенки абатмента и достигает 9,7 МПа при 0°, также на графике отмечается увеличение

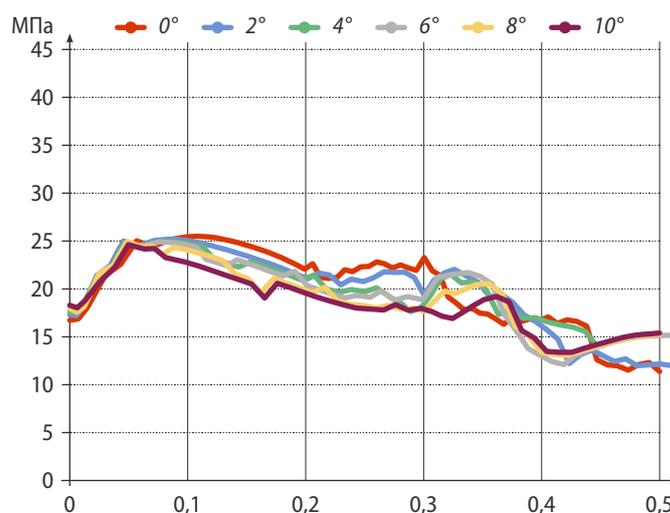


Рис. 12. График распределения максимально растягивающих напряжений в металлическом каркасе несъемного металлокерамического протеза с опорой на одиночный абатмент с высотой 5 мм при жевательной нагрузке 200 Н под углом 30°

Fig. 12. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the metal frame of a non-removable metal-ceramic prosthesis supported by a single abutment with a height of 5 mm with a masticatory load at an angle of 30° 200 N.

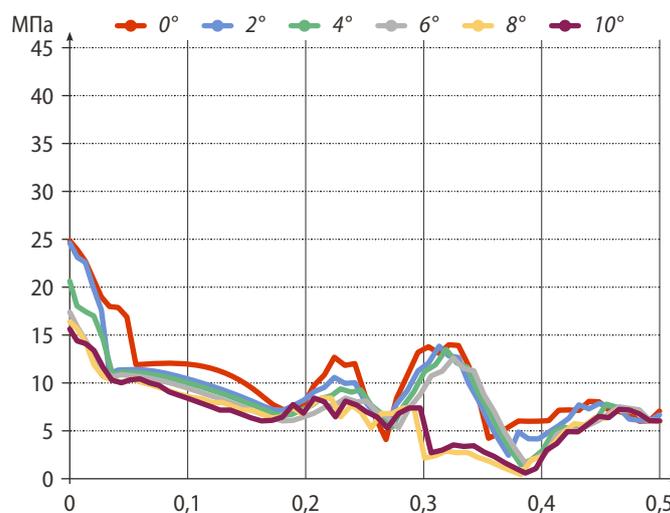


Рис. 13. График распределения максимально растягивающих напряжений в металлическом каркасе несъемного металлокерамического протеза с опорой на одиночный абатмент высотой 5 мм при поперечной жевательной нагрузке 100 Н

Fig. 13. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the metal frame of a non-removable metal-ceramic prosthesis supported by a single abutment 5 mm high at a transverse masticatory load of 100 N

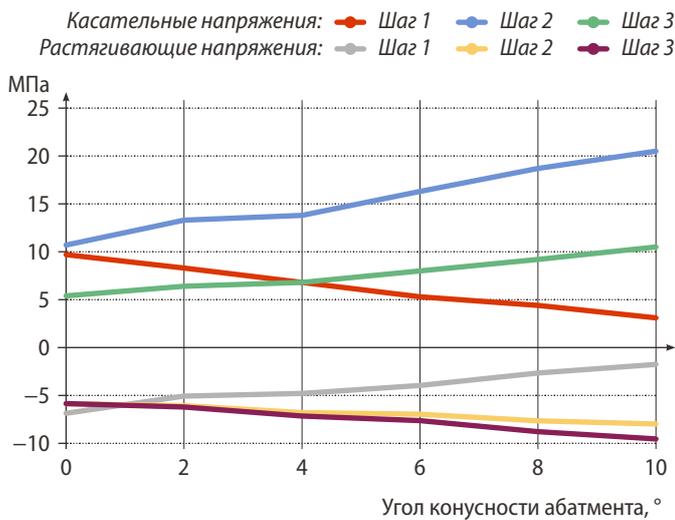


Рис. 14. График распределения максимально касательных и растягивающих напряжений в цементном слое несъемного металлокерамического протеза с опорой на одиночный абатмент высотой 5 мм при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н (шаг 1), жевательной нагрузке 200 Н под углом 30° (шаг 2) и поперечной жевательной нагрузке в 100 Н (шаг 3)

Fig. 14. Graph of the distribution of maximum tangential and tensile stresses in the cement layer of a non-removable ceramic-metal prosthesis supported by a single abutment with a height of 5 mm at a vertical chewing load of 400 N (step 1), a chewing load at an angle of 30° 200 N (step 2) and with a transverse chewing load at 100 N (step 3).

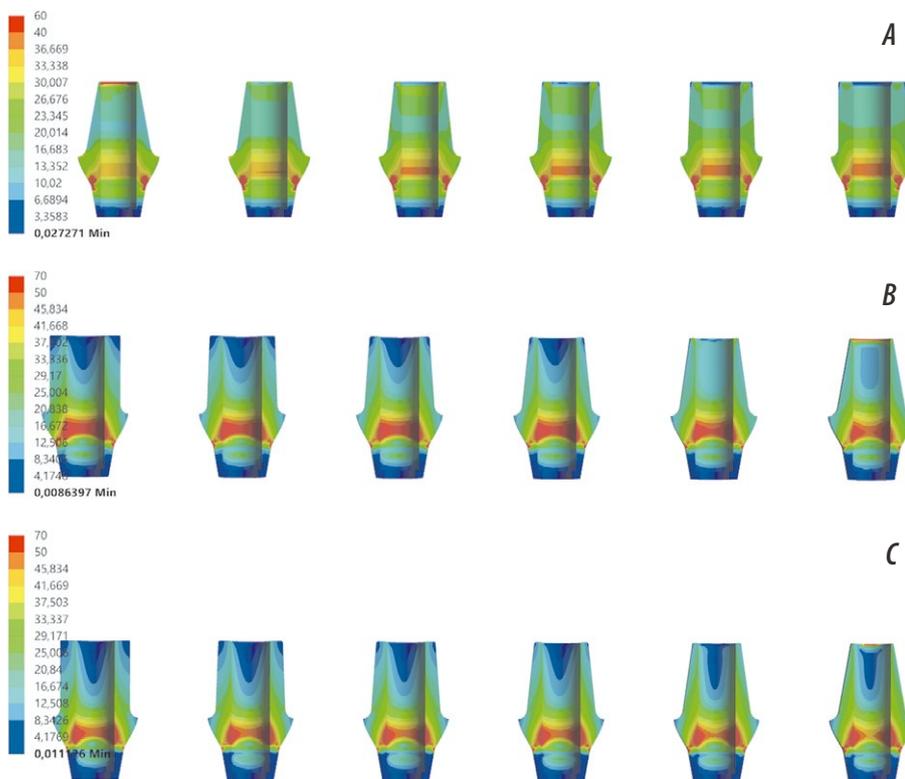


Рис. 15. Распределение напряженно-деформированного состояния абатмента высотой 5 мм несъемного протеза на одиночном абатменте с углами наклона стенки 10°, 8°, 6°, 4°, 2° и 0°: А — при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н, В — при жевательной нагрузке 200 Н под углом 30°, С — при поперечной жевательной нагрузке 100 Н

Fig. 15. Distribution of the stress-strain state of the abutment with a height of 5 mm of a fixed prosthesis on a single abutment and wall inclination angles of 10°, 8°, 6°, 4°, 2° and 0°: A — with a vertical chewing load of 400 N, B — with a chewing load of 200 N at an angle of 30°, C — with a transverse chewing load of 100 N

растягивающих напряжений при уменьшении угла наклона стенок абатмента, достигая 6,86 МПа при 0° (рис. 14).

При воздействии жевательной нагрузки под углом 30° возрастает касательное напряжение в цементном слое при увеличении угла наклона, достигая 20,5 МПа при 10°, а также отмечается незначительная разница значений растягивающих напряжений при углах наклона стенки от 0° до 10°.

При воздействии поперечной жевательной нагрузки в 100 Н отмечается увеличение значений касательных напряжений с увеличением угла наклона стенки абатмента, достигая 10,5 МПа при угле 10°, а также увеличиваются значения растягивающих напряжений с увеличением угла наклона стенки абатмента, достигая 9,54 МПа при угле 10°.

Различия значений напряжений при жевательных нагрузках в цементном слое между несъемными протезами на одиночной опоре, на двух и трех опорах абатментов равнозначной высотой 3, 5, 7 и 9 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2° не значимы ( $p \geq 0,05$ ). При увеличенном диаметре опоры абатмента 6 мм значения напряженно-деформированного состояния ниже при всех углах наклона стенок абатментов, в отличие от значений напряженно-деформированного состояния при абатменте с диаметром в пришеечной области 4,5 мм ( $p \geq 0,05$ ).

При изучении напряженно-деформированного состояния абатментов диаметром 4,5 мм всех изучаемых конструкций отмечался всплеск напряжений в области верхушки абатмента при угле наклона стенок 10° (рис. 15), что обусловлено истончением стенки в верхней части абатмента при создании конусности. Данная концентрация напряжений уменьшалась при угле наклона стенок абатмента 8° с увеличением диаметра абатмента ( $p \geq 0,05$ ).

Резкое увеличение уровня напряжений возникает в верхней части абатмента при угле наклона стенки 10°, достигая 54,76 МПа (рис. 16). Кроме того, наблюдается незначительное увеличение напряжения в области уступов абатментов при всех углах наклона, не превышающего 28 МПа.

Резкое увеличение уровня напряжений возникает в верхней части абатмента при угле наклона стенки 10° и достигает 53,56 МПа (рис. 17). При угле наклона 8° напряжение на верхушке абатмента уменьшается в 3,74 раза и достигает

14,3 МПа. Также наблюдается незначительное увеличение напряжения в области уступов абатментов при всех углах наклона стенки, не превышающего 21 МПа.

Как показано на рис. 18, при поперечной жевательной нагрузке 100 Н резкое увеличение уровня

напряжений возникает в верхней части абатмента при угле наклона стенки 10° и достигает 33,56 МПа. При угле наклона 8° напряжение на верхушке абатмента уменьшается в 2,33 раза и достигает 14,4 МПа. Также наблюдается незначительное увеличение напряжения

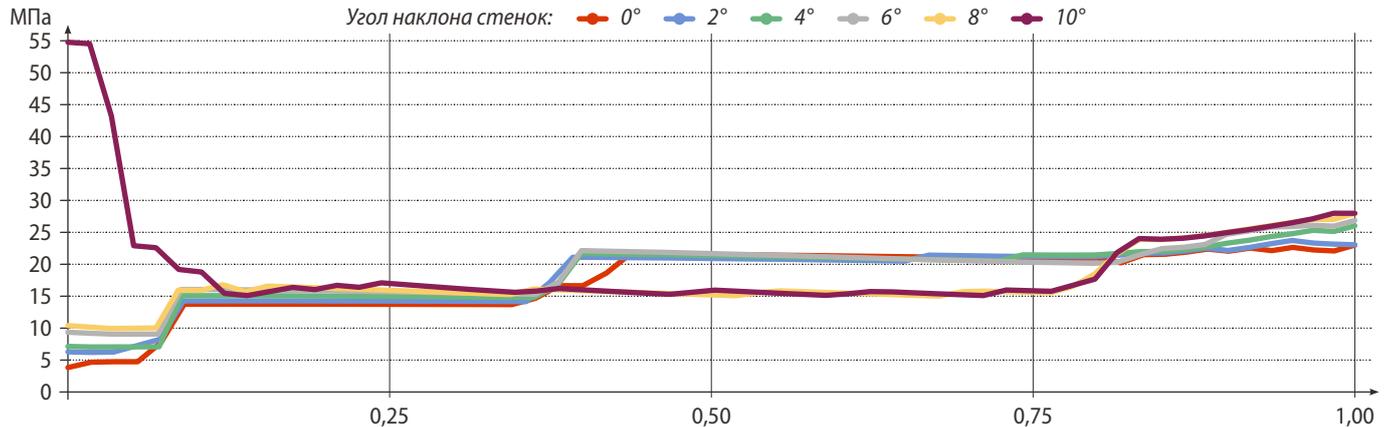


Рис. 16. График распределения максимально растягивающих напряжений в абатменте несъемного металлокерамического протеза с опорой на единственный абатмент с высотой 5 мм при вертикальной жевательной нагрузке 400 Н

Fig. 16. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the abutment of a fixed ceramic-metal prosthesis supported by a single abutment with a height of 5 mm at a vertical masticatory load of 400 N

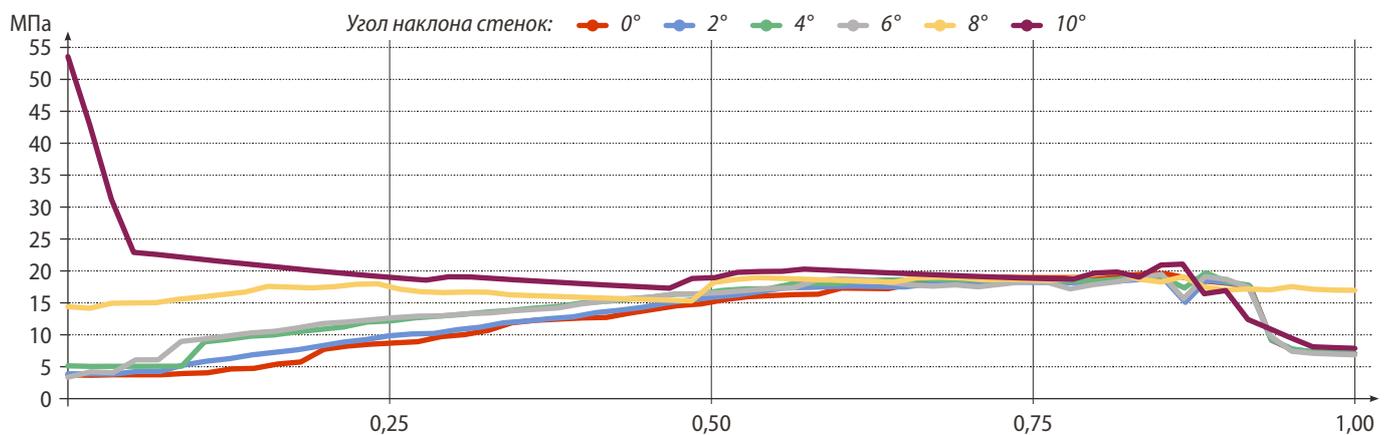


Рис. 17. График распределения максимально растягивающих напряжений в абатменте несъемного металлокерамического протеза с опорой на единственный абатмент с высотой 5 мм при жевательной нагрузке 200 Н под углом 30°

Fig. 17. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the abutment of a fixed ceramic-metal prosthesis supported by a single abutment with a height of 5 mm with a 200 N masticatory load at 30°

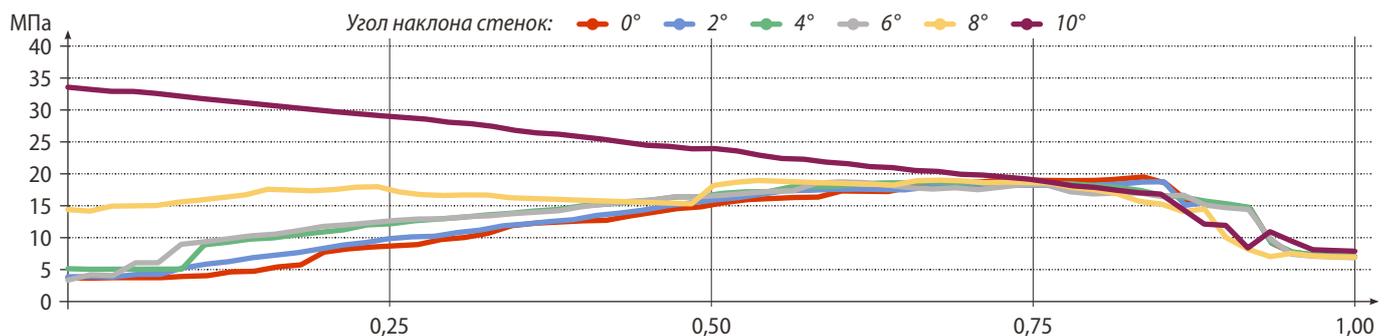


Рис. 18. График распределения максимально растягивающих напряжений в абатменте несъемного металлокерамического протеза с опорой на единственный абатмент высотой 5 мм при поперечной жевательной нагрузке 100 Н

Fig. 18. Graph of the distribution of maximum tensile stresses in the abutment of a fixed ceramic-metal prosthesis supported by a single abutment 5 mm high at a transverse masticatory load of 100 N

в области уступов абатментов при всех углах наклона стенки, не превышающего 20 МПа.

В абатменте диаметром 4,5 мм несъемных протезов при жевательных нагрузках (вертикальной нагрузке 400 Н, нагрузке 200 Н под углом 30° и поперечной нагрузке 100 Н) на одиночной опоре, на двух и трех опорах абатментов, при абатментах высотой 3, 5, 7 и 9 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2° показали, что при угле наклона стенки абатмента 10° резко возрастает значение напряженно-деформированного состояния в его верхней части, что обусловлено истончением стенки в верхней части абатмента при создании конусности. Данное напряжение снижается в несколько раз при уменьшении угла наклона стенки абатмента уже при угле 8°. При увеличенном диаметре опоры абатмента 6 мм не отмечается резких всплесков значения напряженно-деформированного состояния в верхней части абатмента при угле наклона стенки 10°, и оно не превышает значений 19 МПа.

Различия напряжений при жевательных нагрузках в абатменте между несъемными протезами на одиночной опоре, на двух и трех опорах абатментов равнозначной высотой 3, 5, 7 и 9 мм и углами наклона стенок от 0° до 10° с шагом в 2° не значимы ( $p \geq 0,05$ ).

При увеличенном диаметре опоры абатмента 6 мм значения напряженно-деформированного состояния ниже при угле наклона стенки абатмента 10°, в отличие от значений напряженно-деформированного состояния при абатменте с диаметром в пришеечной области 4,5 мм и углом наклона стенки 10° ( $p \leq 0,05$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При трех различно направленных жевательных нагрузках на несъемные протезы с увеличением угла наклона стенок абатмента уровень значений напряженно-деформированного состояния в керамической облицовке статистически достоверно ( $p \leq 0,05$ ) снижается по всей поверхности. Также при увеличении угла наклона стенок абатментов статистически достоверно ( $p \leq 0,05$ ) снижается уровень максимальных растягивающих напряжений по всему объему каркаса. При анализе

результатов исследования напряжений в цементном слое установлено, что с увеличением угла наклона стенок абатмента уровень касательных и растягивающих напряжений в цементном слое статистически достоверно ( $p \leq 0,05$ ) возрастает при жевательной нагрузке под углом 30° — 200 Н и поперечной жевательной нагрузке в 100 Н при увеличении угла наклона стенок абатмента в результате его чрезмерной конической поверхности. Данные напряжения могут привести к расцементировке несъемного протеза. Исследование напряженно-деформированного состояния абатментов при трех различно направленных жевательных нагрузках показало резкий всплеск напряжений в их верхней части при угле наклона 10° и диаметре 4,5 мм в несъемных металлокерамических протезах на одиночной опоре, на двух и на трех опорах, а также статистически достоверное ( $p \leq 0,05$ ) уменьшение в 3,7 раз значений напряжения при уменьшении угла наклона до 8°.

В целом, проведенное исследование показало, что в наибольшей степени на несъемные протезы влияют величины значений напряженно-деформированного состояния керамической облицовки и цементного слоя, а затем значения напряженно-деформированного состояния титанового сплава, так как критические значения разрушения керамической облицовки и цемента ниже, чем у титанового сплава. Тем не менее, как показало исследование, степень угла наклона стенок абатментов непосредственно влияет на величины значений напряженно-деформированного состояния всех элементов конструкции (керамическая облицовка, каркас, цемент, абатмент), т.е. при несоблюдении оптимальных значений углов наклона стенок абатментов при увеличенной жевательной нагрузке риск возникновения осложнений увеличивается.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

**Поступила:** 21.11.2022      **Принята в печать:** 14.02.2023

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.  
**Received:** 21.11.2022      **Accepted:** 14.02.2023

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Mosharraf R., Abbasi M., Givehchian P. The effect of abutment angulation and crown material compositions on stress distribution in 3-unit fixed implant-supported prostheses: A finite element analysis. — *Int J Dent.* — 2022; 2022: 4451810. [PMID: 36065400](#)
2. Strauss F.J., Siegenthaler M., Hämmerle C.H.F., Sailer I., Jung R.E., Thoma D.S. Restorative angle of zirconia restorations cemented on non-original titanium bases influences the initial marginal bone loss: 5-year results of a prospective cohort study. — *Clin Oral Implants Res.* — 2022; 33 (7): 745—756. [PMID: 35570366](#)
3. de Aguiar Vilela Júnior R., Aranha L.C., Elias C.N., Martinez E.F. In vitro analysis of prosthetic abutment and angulable frictional implant interface adaptation: Mechanical and microbiological study. — *J Biomech.* — 2021; 128: 110733. [PMID: 34530293](#)
4. López-Jarana P., Díaz-Castro C.M., Falcão A., Ríos-Carrasco B., Fernandez-Palacín A., Ríos-Santos J.V., Herrero-Climent M. Is it possible to monitor implant stability on a prosthetic abutment? An in vitro resonance frequency analysis. — *Int J Environ Res Public Health.* — 2020; 17 (11): 4073. [PMID: 32521612](#)
5. Lee M.Y., Heo S.J., Park E.J., Park J.M. Comparative study on stress distribution around internal tapered connection implants according to fit of cement- and screw-retained prostheses. — *J Adv Prosthodont.* — 2013; 5 (3): 312—8. [PMID: 24049573](#)

6. Абакаров С.И., Сорокин Д.В., Лапушко В.Ю., Никифорова К.И. Анализ качества прилегания металлических каркасов протезов на имплантатах в зависимости от конусности абатментов. — *Стоматология*. — 2021; 6: 56—60  
[Abakarov S.I., Sorokin D.V., Lapushko V.Y., Nikiforova K.I. Analysis of the fit quality of the metal frames on implants depending on the abutment taper. — *Stomatology*. — 2021; 6: 56—60 (In Russ.)]. [eLibrary ID: 47402457](#)
7. Rathod A., Jalaluddin M., Shrinivas, Devadiga T.J., Jha S., Alzaharani K.M. Geometry of implant abutment surface improving cement effectiveness: An in vitro study. — *J Pharm Bioallied Sci*. — 2021; 13 (Suppl 2): S1093-S1097. [PMID: 35017936](#)
8. Mishra K., Singh P., Noorani M.K., Adarsh K., Kalburgi M.N., Mallick M. Evaluation of change in implant abutment after teeth surface modifications. — *Bioinformation*. — 2021; 17 (1): 157—161. [PMID: 34393431](#)
9. Rosas J., Mayta-Tovalino F., Malpartida-Carrillo V., Degregori A.M., Mendoza R., Guerrero M.E. Effect of abutment geometry and luting agents on the vertical marginal discrepancy of cast copings on implant abutments: An in vitro study. — *Int J Dent*. — 2021; 2021: 9950972. [PMID: 34239569](#)
10. Safari S., Hosseini Ghavam F., Amini P., Yaghmaei K. Effects of abutment diameter, luting agent type, and re-cementation on the retention of implant-supported CAD/CAM metal copings over short abutments. — *J Adv Prosthodont*. — 2018; 10 (1): 1—7. [PMID: 29503708](#)
11. Chaar M.S., Att W., Strub J.R. Prosthetic outcome of cement-retained implant-supported fixed dental restorations: a systematic review. — *J Oral Rehabil*. — 2011; 38 (9): 697—711. [PMID: 21395638](#)
12. Ali A.O., Kelly J.R., Zandparsa R. The influence of different convergence angles and resin cements on the retention of zirconia copings. — *J Prosthodont*. — 2012; 21 (8): 614—21. [PMID: 22823334](#)
13. Rödiger M., Rinke S., Ehret-Kleinau F., Pohlmeier F., Lange K., Bürgers R., Gersdorff N. Evaluation of removal forces of implant-supported zirconia copings depending on abutment geometry, luting agent and cleaning method during re-cementation. — *J Adv Prosthodont*. — 2014; 6 (3): 233—40. [PMID: 25006388](#)
14. Yoon S.S., Cheong C., Preisser J. Jr, Jun S., Chang B.M., Wright R.F. Measurement of total occlusal convergence of 3 different tooth preparations in 4 different planes by dental students. — *J Prosthet Dent*. — 2014; 112 (2): 285—92. [PMID: 24726595](#)
15. Rodriguez L.C., Saba J.N., Meyer C.A., Chung K.H., Wadhvani C., Rodrigues D.C. A finite element analysis of novel vented dental abutment geometries for cement-retained crown restorations. — *Clin Exp Dent Res*. — 2016; 2 (2): 136—145. [PMID: 29744160](#)
16. Rödiger M., Kloß J., Gersdorff N., Bürgers R., Rinke S. Removal forces of adhesively and self-adhesively luted implant-supported zirconia copings depend on abutment geometry. — *J Mech Behav Biomed Mater*. — 2018; 87: 119—123. [PMID: 30056309](#)
17. Beuer F., Edelhoff D., Gernet W., Naumann M. Effect of preparation angles on the precision of zirconia crown copings fabricated by CAD/CAM system. — *Dent Mater J*. — 2008; 27 (6): 814—20. [PMID: 19241690](#)
18. Tiu J., Al-Amleh B., Waddell J.N., Duncan W.J. Clinical tooth preparations and associated measuring methods: a systematic review. — *J Prosthet Dent*. — 2015; 113 (3): 175—84. [PMID: 25449611](#)
19. Choi K.H., Son K., Lee D.H., Lee K.B. Influence of abutment height and convergence angle on the retrievability of cement-retained implant prostheses with a lingual slot. — *J Adv Prosthodont*. — 2018; 10 (5): 381—387. [PMID: 30370030](#)
20. Zhao L., Weigl P., Wu Y., Xu Y. In vitro study of bond strength between abutments with different degrees of convergence and crowns by pre-bonding method. — *Int J Oral Maxillofac Implants*. — 2019; 34 (1): 25—30. [PMID: 30695084](#)
21. Schriwer C., Gjerdet N.R., Arola D., Øilo M. The effect of preparation taper on the resistance to fracture of monolithic zirconia crowns. — *Dent Mater*. — 2021; 37 (8): e427-e434. [PMID: 33910755](#)
22. Zhang Y., Yu P., Yu H. Stress distribution and microgap formation in angulated zirconia abutments with a titanium base in narrow diameter implants: A 3D finite element analysis. — *Int J Numer Method Biomed Eng*. — 2022; 38 (7): e3610. [PMID: 35490303](#)
23. Huang Y.C., Ding S.J., Yuan C., Yan M. Biomechanical analysis of rigid and non-rigid connection with implant abutment designs for tooth-implant supported prosthesis: A finite element analysis. — *J Dent Sci*. — 2022; 17 (1): 490—499. [PMID: 35028075](#)
24. Ciccio M., Bramanti E., Matakana G., Guglielmino E., Risitano G. FEM evaluation of cemented-retained versus screw-retained dental implant single-tooth crown prosthesis. — *Int J Clin Exp Med*. — 2014; 7 (4): 817—25. [PMID: 24955150](#)
25. Sim B.K., Kim B., Kim M.J., Jeong G.H., Ju K.W., Shin Y.J., Kim M.Y., Lee J.H. Hollow abutment screw design for easy retrieval in case of screw fracture in dental implant system. — *J Healthc Eng*. — 2017; 2017: 4842072. [PMID: 29065610](#)
26. Олесова В.Н., Бронштейн Д.А., Узунян Н.А., Заславский Р.С., Лернер А.Я., Шматов К.В. Биомеханика несъемного протеза на имплантатах при полном отсутствии зубов на верхней челюсти. — *Стоматология*. — 2018; 6: 53—56  
[Olesova V.N., Bronstein D.A., Uzunyan N.A., Zaslavsky R.S., Lerner A.Ya., Shmatov K.V. Biomechanics of implant retained fixed prosthesis in patient with edentulous upper jaw. — *Stomatology*. — 2018; 6: 53—56 (In Russ.)]. [eLibrary ID: 36647244](#)
27. Singh N.K., Chalapathy S.B., Thota R.P., Chakravarthula K., Tirnati R., Yenugupalli K. Evaluation of stress distribution among two different pre-angled abutments of implants in two different densities of bone at different levels along the implant — in vitro study. — *J Contemp Dent Pract*. — 2018; 19 (11): 1370—1375. [PMID: 30602643](#)
28. Macedo J.P., Pereira J., Faria J., Souza J.C.M., Alves J.L., López-López J., Henriques B. Finite element analysis of peri-implant bone volume affected by stresses around Morse taper implants: effects of implant positioning to the bone crest. — *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. — 2018; 21 (12): 655—662. [PMID: 30693810](#)
29. Li Z., Gao S., Chen H., Ma R., Wu T., Yu H. Micromotion of implant-abutment interfaces (IAI) after loading: correlation of finite element analysis with in vitro performances. — *Med Biol Eng Comput*. — 2019; 57 (5): 1133—1144. [PMID: 30656596](#)
30. Cervino G., Romeo U., Lauritano F., Bramanti E., Fiorillo L., D'Amico C., Milone D., Laino L., Campolongo F., Rapisarda S., Ciccio M. FEM and von Mises analysis of OSSTEM® dental implant structural components: Evaluation of different direction dynamic loads. — *Open Dent J*. — 2018; 12: 219—229. [PMID: 29682092](#)
31. Поюровская И.Я. Стоматологическое материаловедение: учебное пособие. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. — 192 с.  
[Poyurovskaya I.Ya. Dental materials science: school-book. — Moscow: GEOTAR-Media, 2007. — 192 p. (In Russ.)]. [eLibrary ID: 19540163](#)