



<https://doi.org/10.34883/PI.2025.9.3.001>
УДК 616.314-089.843-77:539.4



Рубникович С.П.¹✉, Прялкин С.В.¹, Бусько В.Н.²

¹ Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

² Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Экспериментальное исследование прочностных характеристик цементно-винтовой фиксации ортопедических конструкций к дентальным имплантатам с плоскостным и коническим типом соединения

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Рубникович С.П. – научное руководство, рецензирование, консультативная аналитическая поддержка; Прялкин С.В. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста; Бусько В.Н. – обеспечение проведения экспериментального исследования.

Подана: 16.09.2025

Принята: 22.09.2025

Контакты: rubnikovichs@mail.ru

Резюме

Введение. В публикации приведены результаты исследования прочностных характеристик цементно-винтовой фиксации абатментов и дентальных имплантатов с плоскостным и коническим типом соединения в условиях эксперимента.

Цель. Разработать экспериментальную модель в системе «зубной протез – дентальный имплантат» и провести оценку прочностных характеристик цементно-винтовой фиксации абатментов к дентальным имплантатам с плоскостным и коническим типом соединения в экспериментальных условиях при циклических нагружениях, имитирующих функциональные нагрузки в ротовой полости.

Материалы и методы. Оценивали прочностные характеристики цементно-винтовой фиксации абатментов к дентальным имплантатам из сплава Ti-6Al-4V диаметром 3,75 мм и длиной 11,5 мм с коническим и плоскостным типом соединения. Всего в эксперимент было включено 48 дентальных имплантатов – 24 с плоскостным и 24 с коническим типом соединения. В свою очередь каждые 24 имплантата были распределены на шесть групп в зависимости от экспериментальных условий: три группы при угле нагружения 22,5° и силе воздействия 100 Н с количеством циклов нагружения 100 000, 150 000 и 200 000; три группы при угле нагружения 45° и силе воздействия 100 Н с количеством циклов нагружения 100 000, 150 000 и 200 000.

Результаты. При сравнительном анализе прочности экспериментальных образцов в условиях максимальной нагрузки (угол нагружения 45° и 200 000 циклов нагружения) во 2-м положении импланта, наиболее слабом элементе всей конструкции, выявлено, что при коническом типе глубина ЦВС снижается на 15%, а степень зажатия винтов – на 54% от изначального уровня до нагрузки, в то время как при плоскостном типе аналогичные параметры снижаются на 39% и 60% соответственно.

Выводы. Установлено, что конический тип соединения является наиболее надежным, его использование позволяет значительно повысить величину сопротивления нагрузкам, так как накопление усталости ортопедических конструкций при коническом типе соединения возрастает лишь в 1,2 раза, в то время как при плоскостном – в 1,7 раза. Новая цементно-винтовая ортопедическая конструкция с коническим типом соединения позволяет снизить величину эквивалентных жевательной нагрузке напряжений (по изменению глубины 2-го соединения, имитирующего проекцию 2-го премоляра) на 24% по сравнению с плоскостным типом соединения.

Ключевые слова: дентальный имплантат, циклические нагружения, цементно-винтовое соединение, ортопедическая конструкция, экспериментальная модель

Rubnikovich S.¹ ✉, Pryalkin S.¹, Busco V.²

¹ Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

² Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Experimental Study of the Strength Characteristics of Cement-Screw Fixation of Orthopedic Structures to Dental Implants with Planar and Conical Type of Connection

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Rubnikovich S. – scientific guidance, peer review, advisory analytical support; Pryalkin S. – study concept and design, data collection and processing, text writing; Busco V. – provision of experimental research.

Submitted: 16.09.2025

Accepted: 22.09.2025

Contacts: rubnikovichs@mail.ru

Abstract

Introduction. The publication presents the results of a study of the strength characteristics of cement-screw fixation of abutments and dental implants with a planar and conical type of connection under experimental conditions.

Purpose. To develop an experimental model in the "dental prosthesis-dental implant" system and evaluate the strength characteristics of cement-screw fixation of abutments to dental implants with a planar and conical type of connection under experimental conditions with cyclic loads simulating functional loads in the oral cavity.

Materials and methods. The strength characteristics of the cement-screw fixation of abutments to dental implants made of Ti-6Al-4V alloy with a diameter of 3.75 mm and a length of 11.5 mm with a conical and planar type of connection were evaluated. A total of 48 dental implants were included in the experiment – 24 with a planar and 24 with a conical type of connection. In turn, every 24 implants were divided into six groups depending on the experimental conditions: three groups with a loading angle of 22.50 and a force of 100 N with a number of loading cycles of 100,000, 150,000 and 200,000;



three groups at loading angle of 45° and impact force of 100 N with number of loading cycles of 100,000, 150,000 and 200,000.

Results. In comparative analysis of the strength of experimental samples under maximum load conditions (loading angle 45° and 200,000 loading cycles) in the 2nd position of the implant, as the weakest element of the entire structure, it was revealed that with a conical type, the depth of the CVS decreases by 15%, and the degree of screw clamping – by 54% from the initial level to the load, while with a planar type, similar parameters decrease by 39% and 60%, respectively.

Conclusion. It has been established that the conical type of connection is the most reliable, its use allows you to significantly increase the amount of resistance to loads, since the accumulation of fatigue of orthopedic structures with the conical type of connection increases only 1.2 times, while with the planar – 1.7 times. The new cement-screw orthopedic design with a conical type of connection allows reducing the value of stresses equivalent to chewing load (by changing the depth of the 2nd connection simulating the projection of the 2nd premolar) by 24% compared to the planar type of connection.

Keywords: dental implant, cyclic loadings, cement-screw joint, orthopedic construction, experimental model

■ ВВЕДЕНИЕ

В стоматологической практике конструктивно выделяют два основных типа винтового соединения абатмента и дентального имплантата: плоскостное и коническое. Как при плоскостном, так и при коническом типе соединения зубной протез к дентальному имплантату фиксируется при помощи винта с контролируемым механическим усилием, которое составляет от 20 до 40 Н/см [1]. При функционировании зубочелюстной системы происходит накопление биомеханической усталости ортопедических конструкций вследствие постоянного воздействия циклических нагрузок. Циклические нагрузки на ортопедические конструкции с опорой на дентальные имплантаты возникают при глотании, пережевывании пищи и при парафункциональной активности зубочелюстной системы. Так, при жевании у взрослого человека сила воздействия на пищевой комок составляет порядка 100–150 Н, а при возникновении парафункции величина нагрузки может увеличиваться в 10 раз [1].

Биомеханическая стабильность соединения ортопедических компонентов имплантационной системы является условием успешного протезирования на дентальных имплантатах [2]. Нестабильность винтового соединения и микроподвижность компонентов друг относительно друга могут быть связаны с неадекватной предварительной нагрузкой, неоптимальной геометрией винта, неплотной посадкой одного компонента на другом, микрошероховатостью сочленяющихся поверхностей, чрезмерной нагрузкой и/или эластичностью кости [3, 4]. Кроме того, к постоянным раскручиваниям и/или поломкам винта абатмента может приводить усталость, возникающая при циклической жевательной нагрузке, величина которой ниже предела прочности соединения на разрыв. При цементном методе фиксации зубных протезов также имеются определенные недостатки, оказывающие влияние на стабильность ортопедической конструкции, такие как высокая степень риска развития периимплантита с последующей рецессией десны, сложность

удаления остатков цемента при субгингивальном расположении цементного шва, а также риск нарушения герметичности ортопедической конструкции при использовании силиконового цемента с возможной расцементировкой и выпадением коронки [5].

В связи с вышеизложенным авторы приняли решение создать новую ортопедическую конструкцию несъемных зубных протезов с опорой на дентальные имплантаты, которая объединяет преимущества двух типов фиксации. На экспериментальном этапе работы была разработана и апробирована новая модель ортопедической конструкции с гибридным цементно-винтовым соединением (ЦВС).

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработать экспериментальную модель в системе «зубной протез – дентальный имплантат» и провести оценку прочностных характеристик цементно-винтовой фиксации абатментов к дентальным имплантатам с плоскостным и коническим типом соединения в экспериментальных условиях при циклических нагружениях, имитирующих функциональные нагрузки в ротовой полости.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное исследование ЦВС в системе «зубной протез – дентальный имплантат» проводили на компактной лабораторной установке для изучения прочностных характеристик испытуемых образцов при механических циклических воздействиях в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси [6].

Величину воздействуемой силовой нагрузки установки на испытуемый образец определяли при помощи метода грузиков. По данной методике измеряли величину общего прогиба дистально конца консоли металлического основания, закрепленного в горизонтальных пластинах под действием закрепленного груза величиной 10 кг, что соответствует силе в 100 Н и величине прогиба консоли в 100 мкм. Прогиб дистального конца консоли измеряли цифровым глубиномером, который закрепляли на штативе перпендикулярно испытуемой конструкции. Количество циклов нагружения конструкции определяли при помощи электронного счетчика частоты вращения вала электродвигателя.

В экспериментальных условиях оценивали прочностные характеристики цементно-винтовой фиксации абатментов к дентальным имплантатам из сплава Ti-6Al-4V диаметром 3,75 мм и длиной 11,5 мм с коническим и плоскостным типом соединения. Всего в эксперимент было включено 48 дентальных имплантатов – 24 с плоскостным и 24 с коническим типом соединения. В свою очередь каждые 24 имплантата были распределены на шесть групп в зависимости от экспериментальных условий (угла нагружения и длительности воздействия): три группы при угле нагружения 22,5° и силе воздействия 100 Н с количеством циклов нагружения 100 000, 150 000 и 200 000; три группы при угле нагружения 45° и силе воздействия 100 Н с количеством циклов нагружения 100 000, 150 000 и 200 000. В каждой группе испытуемый образец состоял из 4 имплантов, нумерацию которых проводили от начала свободного торца металлического основания с 1-го до 4-го номера соответственно (номер винтового соединения). Силовое воздействие осуществляли на середину



ортопедической конструкции между 2-м и 3-м винтовым соединением, что соответствует проекции области 2-го премоляра и 1-го моляра как функционального центра жевания человека. Проводили по 5 экспериментальных серий ($n=5$) во всех соединениях каждой группы.

Осуществляли анализ следующих прочностных параметров ортопедической конструкции экспериментальной модели: момент зажатия и последующего ослабления фиксирующих винтов, который контролировали динамометрическим ключом типа MT-R1040 (в Н/см) с точно заданным крутящим моментом зажатия M (сила первоначального зажатия винтов составила 35 Н/см для абатментов цементируемых конструкций); глубину винтового соединения. Глубину винтового соединения определяли по расстоянию от основания шестигранника фиксирующего винта до окклюзионной поверхности ортопедической конструкции испытуемого образца, измеренного при помощи модифицированного цифрового глубиномера.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ

Конструкция экспериментальной модели в форме шестнадцатигранника и ортопедической конструкции овальной формы, а также направление действия нагрузки P на ортопедическую конструкцию представлены в двух проекциях на рис. 1А, В. При этом форма жевательной поверхности ортопедической конструкции (испытуемого образца), на которую воздействует под углом нагрузка P , имеет вид овала в сечении.

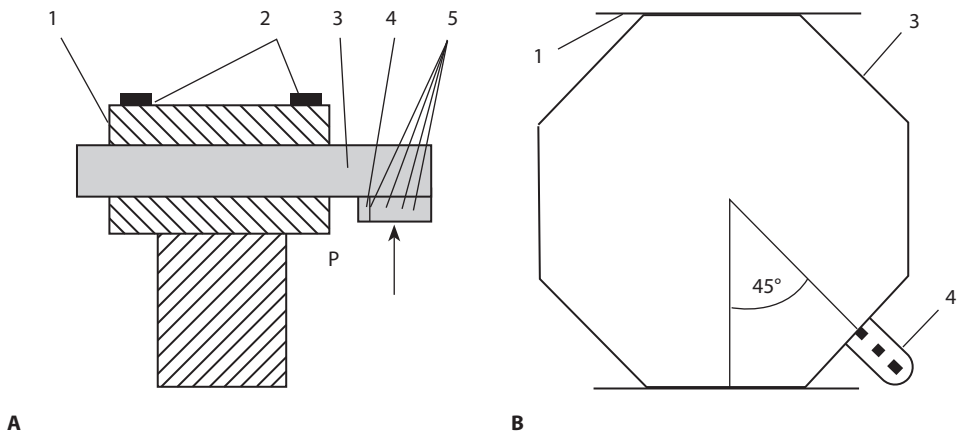
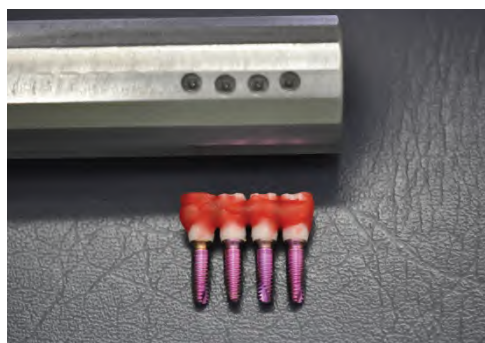


Рис. 1. Конструкция экспериментальной модели (схема строения узла закрепления (А): 1 – горизонтальные металлические пластины узла закрепления, 2 – болты крепления горизонтальных пластин, 3 – металлическое основание с дентальными имплантами, 4 и 5 – ортопедическая конструкция овальной формы (испытуемый образец), P – направление действия нагрузки силового возбуждателя установки на испытуемый образец (ортопедическую конструкцию); схема восьмигранного металлического основания с закрепленной на металлическом основании ортопедической конструкцией (В) (испытуемый образец))
Fig. 1. Experimental model design (structure diagram of the fastening unit (A): 1 – horizontal metal plates of the fastening unit, 2 – bolts for fastening horizontal plates, 3 – metal base with dental implants, 4 and 5 – oval orthopedic structure (test sample), P – direction of action of the force exciter load on the test sample (orthopedic structure); diagram of an octagonal metal base with an orthopedic structure (B) fixed on the metal base (test sample))

Этапы разработки новой экспериментальной модели:

1. Изготовление металлических оснований экспериментальной модели, имеющих в сечении форму шестнадцатигранника. Длина оснований составила 120 мм, а ширина каждой грани составила 15 мм соответственно. На одной из граней основания с одного торца были сделаны глухие отверстия при помощи фрезерного станка с целью размещения дентальных имплантатов.
2. Помещение в сформированные ложа четырех дентальных имплантатов размера 3,75×11,5 мм с коническим или плоскостным типом соединения абатментов. Расстояние между шейками дентальных имплантатов составляло 4 мм (рис. 2А).
3. Фиксация дентальных имплантатов в металлическом основании при помощи композитного цемента химического отверждения (рис. 2В). После фиксации дентальных имплантатов в основании с уровня платформы имплантатов получали оттиски с трансферами для открытой ложки.
4. В зуботехнической лаборатории к имплантатам экспериментальной модели фиксировали абатменты с высотой шейки 1 мм (рис. 3А). Далее проводили фрезерование абатментов и изготавливали металлическую ортопедическую конструкцию с жевательной (окклюзионной) поверхностью овальной формы размером 25×10×12 мм из кобальт-хромовой стали с отверстиями на окклюзионной поверхности, которая имитировала несъемный цементируемый зубной протез, состоящий из 4 жевательных зубов (рис. 3В).
5. После припасовки, пескоструйной обработки и полировки ортопедическую конструкцию фиксировали к абатментам на полимерный цемент после предварительного закрытия винтовых шахт тефлоновым уплотнителем. Затем после отверждения цемента уплотнитель извлекался из винтовых шахт для доступа к фиксирующим винтам абатментов (рис. 4А). Данная особенность изготовленной ортопедической конструкции давала возможность беспрепятственного доступа к шахтам фиксирующих винтов без необходимости снятия самой конструкции с абатментов (рис. 4В).

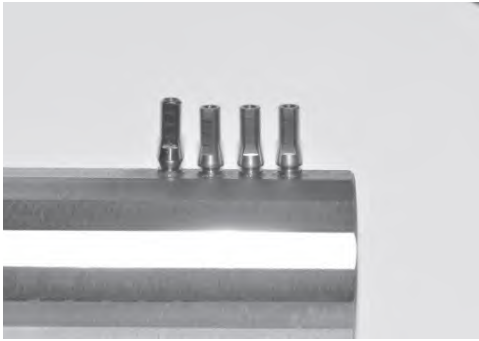


А

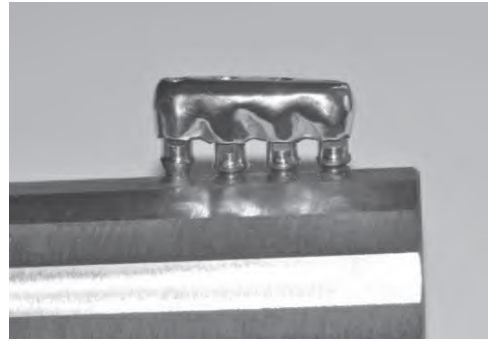


В

Рис. 2. Металлический носитель и дентальные имплантаты на пластмассовом позиционере (А). Этап фиксации дентальных имплантатов на композитный цемент в металлическом носителе (В)
Fig. 2. Metal carrier and dental implants on a plastic positioner (A). Stage of fixation of dental implants on composite cement in a metal carrier (B)



A



B

Рис. 3. Этап установки прямых абатментов для цементируемых конструкций на экспериментальную модель (А). Этап припасовки ортопедической конструкции на отфрезерованных абатментах экспериментальной модели (В)

Fig. 3. Stage of installation of straight abutments for cemented structures on the experimental model (A). Stage of fitting the orthopedic structure on milled abutments of the experimental model (B)



A



B

Рис. 4. Вид ортопедической конструкции экспериментальной модели с окклюзионной поверхностью (А). Этап контроля затяжки винтов абатментов экспериментальной модели (В)

Fig. 4. View of the orthopedic structure of the experimental model from the occlusal surface (A). Stage of control of tightening of the screws of the abutments of the experimental model (B)

В результате циклического воздействия силовозбудителя на ортопедическую конструкцию экспериментальной модели возникает прогиб Δ (в мкм), измерив который с помощью индикатора, можно рассчитать величину нагрузки P , соответствующей необходимому усилию, равному 100 Н. Конструкционные особенности изготовленной экспериментальной модели позволили нам изменять угол нагрузки ортопедической конструкции подшипником качения от прямого угла действия силы (действие силы параллельно длинной оси имплантата) до воздействия силы под острым углом к длинной оси имплантата (воздействие силы по касательной при боковых нагрузках). При этом угол нагрузки на ортопедическую конструкцию составлял $22,5^\circ$ или 45° .

Проведена серия экспериментов с различными количеством циклов и силой нагружения, а также с разными углами действия нагрузки на испытуемые ортопедические конструкции с плоскостным типом ЦВС, результаты которых приведены в табл. 1–4. До и после нагружения оценивали глубину ЦВС и степень зажатия винтов. В ходе эксперимента при испытании плоскостного соединения с углом нагружения 45°, силой воздействия 100 Н и количеством циклов нагружения 100 000 установлено достоверное снижение среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции 2-го ($p=0,034$) и 3-го ($p=0,037$) испытуемых образцов после нагружения (табл. 1). Также после нагружения отмечалось уменьшение степени зажатия винтов до $27,0\pm0,26$ Н/см, которое наиболее значимо было выражено во 2-м и 3-м соединениях – в 1,3 раза ниже ($p=0,011$) по сравнению с аналогичными показателями до нагружения, а также отличалось от значений 1-го и 4-го ЦВС в 1,0 ($p=0,044$) и 1,1 ($p=0,039$) раза соответственно.

При испытании плоскостного соединения с углом нагружения 45°, силой воздействия 100 Н и количеством циклов нагружения 150 000 установлены достоверные изменения среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции испытуемых образцов под номером 2 и 3 после нагружения в сторону снижения, аналогично изменялись уровни степени зажатия винтов – во 2-м и 3-м соединениях выявлено снижение в 1,4 раза ($p=0,013$) и 1,75 раза ($p=0,001$) соответственно по сравнению с уровнями до нагружения. С увеличением количества циклов нагружения до 200 000 наблюдалось снижение среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции испытуемых образцов после нагружения во всех номерах, однако достоверно этот показатель изменялся во 2-м, 3-м и 4-м положении (табл. 2). Наиболее выраженное снижение этого показателя отмечалось во 2-м положении – в 1,65 раза ниже в сравнении с аналогичным уровнем до нагрузки ($p=0,001$). Также отмечалось значимое снижение степени зажатия винтов после нагружения, наиболее выраженное во 2-м и 3-м соединениях, что было ниже аналогичных значений до нагружения в 2,5 раза ($p=0,001$) и в 2,3 раза ($p=0,001$) соответственно. В 1-м и 4-м винтовых соединениях установлено достоверное снижение показателя степени зажатия винтов после нагружения в 1,6 раза ($p=0,014$) и в 1,8 раза ($p=0,030$) соответственно по сравнению с

Таблица 1
Плоскостное соединение, угол нагружения 45°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 100 000, $M\pm SD$
Table 1
Plane connection, loading angle 45°, impact force 100 Н, number of loading cycles 100 000, $M\pm SD$

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения, n=5	до нагружения, n=5	после нагружения, n=5
1	5,67 $\pm$ 0,09	5,65 $\pm$ 0,06	35,0 $\pm$ 0,10	29,50 $\pm$ 0,43
2	5,70 $\pm$ 0,11	5,69 $\pm$ 0,05 $p=0,034$	35,0 $\pm$ 0,10	27,0 $\pm$ 0,26 $p=0,011$
3	5,62 $\pm$ 0,08	5,52 $\pm$ 0,02 $p=0,037$	35,0 $\pm$ 0,10	27,0 $\pm$ 0,36 $p=0,011$
4	5,78 $\pm$ 0,04	5,72 $\pm$ 0,04	35,0 $\pm$ 0,10	30,0 $\pm$ 0,25

Примечание: здесь и далее: p – статистически значимые различия между показателями до и после нагружения при $p<0,05$ по t -критерию Стьюдента.



Таблица 2

Плоскостное соединение, угол нагружения 45°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 200 000, M±SD

Table 2

Plane connection, loading angle 45°, impact force 100 Н, number of loading cycles 200 000, M±SD

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	5,67±0,07	5,42±0,07	35,0±0,10	22,0±0,28 p=0,014
2	5,63±0,04	3,41±0,09 p=0,001	35,0±0,10	14,0±0,36 p=0,001
3	5,69±0,06	4,46±0,10 p=0,011	35,0±0,10	15,0±0,41 p=0,011
4	5,72±0,03	5,34±0,05 p=0,032	35,0±0,10	20,0±0,29 p=0,030

аналогичными уровнями до нагружения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением количества циклов нагружения сохраняется перераспределение основной нагрузки на 2-й и 3-й элементы ортопедической конструкции испытуемых образцов с эпицентром во 2-м соединении.

В табл. 3 представлены данные по изучению влияния постоянного воздействия циклических нагрузок с углом нагружения 22,5°, силой воздействия 100 Н и количеством циклов нагружения 100 000. После нагружения обнаружены значимые изменения среднего значения глубины и степени зажатия винтов 2-го соединения ортопедической конструкции испытуемых образцов в сторону снижения по сравнению с соответствующими уровнями до нагружения: в 1,0 раза (p=0,034) и в 1,5 раза (p=0,031) соответственно.

Полученные в эксперименте данные при увеличении количества циклов нагружения до 150 000 указывают на значимые изменения как среднего значения глубины, так и степени зажатия винтов ортопедической конструкции 2-го и 3-го номеров соединения испытуемых образцов после нагружения в сторону снижения по сравнению с аналогичными уровнями до нагружения. С увеличением количества циклов нагружения до 200 000 происходит достоверно значимое снижение среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции испытуемых образцов с 1-го по 3-й номер соединения (табл. 4). В то время как снижение степени зажатия винтов после

Таблица 3

Плоскостное соединение, угол нагружения 22,5°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 100 000, M±SD

Table 3

Plane connection, loading angle 22,5°, impact force 100 Н, number of loading cycles 100000, M±SD

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	8,54±0,07	8,49±0,08	35,0±0,10	27,0±0,26
2	8,61±0,06	8,51±0,10 p=0,034	35,0±0,10	23,0±0,35 p=0,031
3	8,72±0,04	8,71±0,09	35,0±0,10	25,0±0,31
4	8,41±0,08	8,39±0,09	35,0±0,10	28,0±0,29

Таблица 4

Плоскостное соединение, угол нагружения 22,5°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 200 000, М±SD

Table 4

Plane connection, loading angle 22,5°, impact force 100 Н, number of loading cycles 200 000, М±SD

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	8,62±0,07	8,52±0,08 p=0,029	35,0±0,10	23,0±0,32
2	8,63±0,02	8,50±0,11 p=0,024	35,0±0,10	21,0±0,38 p=0,013
3	8,75±0,05	8,61±0,08 p=0,015	35,0±0,10	19,0±0,40 p=0,018
4	8,39±0,04	8,30±0,07	35,0±0,10	24,5±0,36

нагружения наблюдается только во 2-м и 3-м винтовых соединениях – в 1,7 раза (p=0,013) и в 1,8 раза (p=0,018) соответственно по сравнению с данными до нагружения, что связано с максимальным приложением силы воздействия в этих положениях.

Необходимо отметить, что при угле 45° с увеличением количества циклов нагружения до 200 000 во 2-м соединении накопление усталости ортопедических конструкций с плоскостным типом соединения максимально возрастает, что проявляется снижением степени зажатия винтов и глубины ЦВС в 2,5 раза (p=0,001) и в 1,65 (p=0,001) раза соответственно по сравнению с донагрузочным уровнем.

Проведен корреляционный анализ взаимосвязей между накоплением усталости ортопедических конструкций и углом нагружения, а также количеством нагрузочных циклов при плоскостном типе соединения во 2-м, наиболее уязвимом положении, что представлено на рис. 5 и 6. Наиболее выраженная зависимость установлена при угле нагружения 45° (r=0,73, p=0,021) и 200 000 циклов нагружения (r=0,91, p=0,001), когда глубина ЦВС снижается в 1,7 раза в сравнении с аналогичным значением до нагрузки (p=0,001) и в 1,7 раза при 100 000 циклов нагружения (p=0,000), что отражает выраженное накопление усталости ортопедической конструкции.

Проведена серия экспериментов с различным количеством циклов и силой нагружения, а также с разными углами действия нагрузки на испытываемые ортопедические конструкции с коническим типом ЦВС, результаты которых приведены в табл. 5–8. В процессе эксперимента при испытании конического соединения с углом нагружения 45°, силой воздействия 100 Н и количеством циклов нагружения 100 000 установлено достоверное снижение среднего значения степени зажатия винтов в испытываемых образцах с 1-го по 4-й номер соединения, что представлено в табл. 5. Причем наиболее значимые изменения данного показателя отмечались во 2-м и 3-м соединениях: снизился в 1,7 раза (p=0,014) и в 1,8 раза (p=0,011) соответственно по сравнению с таковым до нагружения. При этом изменения уровней глубины ЦВС после нагружения были незначительны.

В экспериментальных условиях увеличения циклической нагрузки выявлены значимые изменения среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции испытываемых образцов в 3-м номере, а именно ее снижение до 8,90±0,06 мм, что было меньше в 1,0 раза (p=0,029) по сравнению с исходным уровнем до нагрузки. Степень

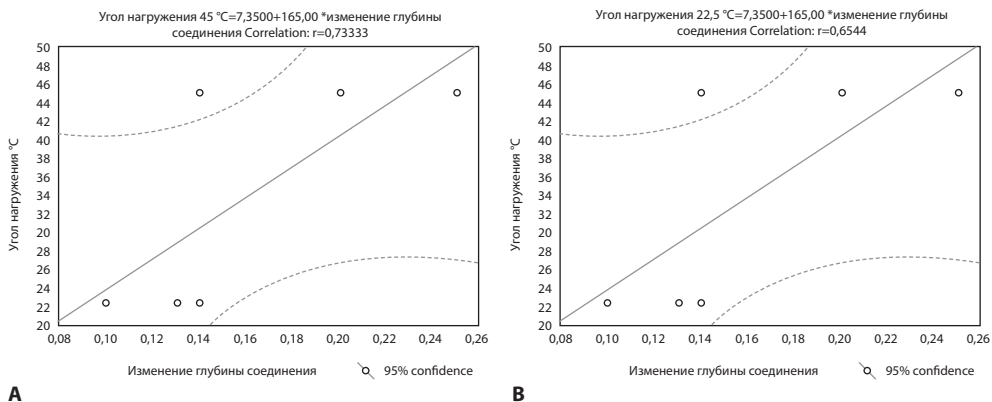


Рис. 5. Корреляционная зависимость между изменением глубины ЦВС и углом нагружения 45° (А), 22,5° (В) при плоскостном типе соединения
Fig. 5. Correlation between variation of CVS depth and loading angle of 45° (A), 22.5° (B) at planar type of connection

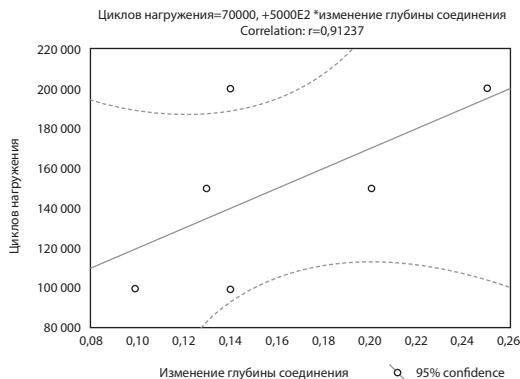


Рис. 6. Корреляционная зависимость между количеством циклов нагружения и изменением глубины ЦВС при плоскостном типе соединения
Fig. 6. Correlation between the number of loading cycles and the change in the depth of the CVS with a planar type of connection

Таблица 5
Коническое соединение, угол нагружения 45°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 100 000, M±SD
Table 5
Conical joint, loading angle 450, impact force 100 Н, number of loading cycles 100 000, M±SD

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	8,99±0,11	8,96±0,07	35,0±0,10	25,0±0,21 p=0,029
2	9,10±0,12	9,00±0,13	35,0±0,10	21,0±0,58 p=0,014
3	9,03±0,10	8,92±0,12	35,0±0,10	20,2±0,62 p=0,011
4	8,91±0,09	8,87±0,10	35,0±0,10	26,0±0,15 p=0,032

зажатия винтов значимо снижалась во всех номерах ЦВС, причем максимально это проявлялось также в 3-м номере, где разница уровня до и после нагрузки составила 18 Н/см ($p=0,001$). С увеличением количества циклов нагружения до 200 000 происходит выраженное снижение среднего значения глубины ЦВС ортопедической конструкции испытуемых образцов во 2-м и 3-м номерах соединений, что приведено в табл. 6. Максимальное снижение глубины ЦВС зафиксировано во 2-м положении – в 1,2 раза в сравнении с донагрузочным уровнем ($p=0,001$). Отмечается снижение степени зажатия винтов после нагружения, наиболее выраженное во 2-м и 3-м соединениях, что было ниже аналогичных значений до нагружения в 2,2 раза ($p=0,001$) и в 2,1 раза ($p=0,001$) соответственно. С увеличением количества циклов нагружения происходит распределение основной нагрузки на все элементы ортопедической конструкции испытуемых образцов с коническим типом соединения, однако 2-е ЦВС испытывает максимальную нагрузку.

Полученные результаты экспериментального исследования влияния постоянно-го воздействия циклических нагрузок при угле нагружения $22,5^\circ$ указывают на значимое снижение степени зажатия 2-го и 3-го соединения ортопедической конструкции испытуемых образцов (табл. 7). Однако изменения при угле нагружения $22,5^\circ$ выражены в меньшей степени, чем при аналогичных условиях (сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 100 000), но при угле нагружения в 45° .

С увеличением количества циклов нагружения до 150 000 происходит снижение показателей степени зажатия винтов ортопедической конструкции испытуемых образцов уже с 1-го по 3-й номер, наиболее значимо оно выражено во 2-м соединении – в 1,6 раза ($p=0,013$) ниже по сравнению с таковым до нагружения. В этом же соединении установлено значимое снижение среднего значения глубины винтового соединения, разница которого с исходным уровнем составила 0,11 мм ($p=0,047$). При достижении в эксперименте максимального количества циклов нагружения до 200 000 установлены значительные изменения степени зажатия винтов и глубины их соединения, что представлено в табл. 8. Происходит более выраженное снижение степени зажатия винтов ортопедической конструкции испытуемых образцов уже во всех номерах, причем наиболее значимо оно выражено во 2-м и 3-м соединениях – 1,8 раза ($p=0,001$) и в 1,6 раза ($p=0,014$) соответственно ниже по сравнению с

Таблица 6
Коническое соединение, угол нагружения 45° , сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 200 000, $M\pm SD$
Table 6
Conical joint, loading angle 45° , impact force 100 Н, number of loading cycles 200 000, $M\pm SD$

№ п/п ЦВС, n= 5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	9,02 $\pm$ 0,07	8,96 $\pm$ 0,06	35,0 $\pm$ 0,10	23,0 $\pm$ 0,28 $p=0,011$
2	9,10 $\pm$ 0,10	7,68 $\pm$ 0,09 $p=0,001$	35,0 $\pm$ 0,10	16,0 $\pm$ 0,79 $p=0,001$
3	9,07 $\pm$ 0,09	8,92 $\pm$ 0,10 $p=0,002$	35,0 $\pm$ 0,10	17,0 $\pm$ 0,58 $p=0,001$
4	9,01 $\pm$ 0,12	8,95 $\pm$ 0,13	35,0 $\pm$ 0,10	24,0 $\pm$ 0,57 $p=0,016$



Таблица 7

Коническое соединение, угол нагружения 22,5°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 100 000, М±SD

Table 7

Conical joint, loading angle 22,5°, impact force 100 Н, number of loading cycles 100 000, М±SD

№ п/п ЦВС, n= 5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	8,86±0,08	8,84±0,07	35,0±0,10	27,0±0,31
2	9,18±0,11	9,09±0,12	35,0±0,10	24,0±0,37 p=0,031
3	8,74±0,07	8,66±0,10	35,0±0,10	25,0±0,44 p=0,029
4	8,63±0,09	8,62±0,10	35,0±0,10	29,0±0,25

такowymi до нагружения. Также в этих соединениях значимо снижается их глубина, что объясняется расположением в зоне максимального приложения силы и, соответственно, уменьшением прочности соединения.

Проведен корреляционный анализ взаимосвязей между накоплением усталости ортопедических конструкций и углом нагружения, а также количеством нагрузочных циклов при коническом типе соединения во 2-м положении, что представлено на рис. 7. Наиболее выраженная прямая зависимость установлена при угле нагружения 45° ($r=0,98$, $p=0,000$) и 200 000 циклов нагружения ($r=0,94$, $p=0,001$), когда глубина ЦВС снижается в 1,2 раза в сравнении с аналогичным значением до нагрузки ($p=0,001$) и в 1,2 раза при 100 000 циклов нагружения ($p=0,000$), что отражает определенное накопление усталости ортопедической конструкции.

Таким образом, можно заключить, что конический тип соединения является наиболее надежным, его использование позволяет значительно повысить величину сопротивления нагрузкам, так как накопление усталости ортопедических конструкций при коническом типе соединения возрастает лишь в 1,2 раза, в то время как при плоскостном – в 1,7 раза. Кроме того, при сравнительном анализе прочности экспериментальных образцов в условиях максимальной нагрузки (угол нагружения 45° и 200 000 циклов нагружения) во 2-м положении импланта, наиболее слабым элементе

Таблица 8

Коническое соединение, угол нагружения 22,5°, сила воздействия 100 Н, количество циклов нагружения 200 000, М±SD

Table 8

Conical joint, loading angle 22,5°, impact force 100 Н, number of loading cycles 200 000, М±SD

№ п/п ЦВС, n=5	Глубина ЦВС, мм		Степень зажатия винтов, Н/см	
	до нагружения	после нагружения	до нагружения	после нагружения
1	8,89±0,10	8,84±0,08	35,0±0,10	23,0±0,28 p=0,035
2	9,21±0,07	9,08±0,07 p=0,029	35,0±0,10	20,0±0,44 p=0,001
3	8,79±0,11	8,68±0,06 p=0,033	35,0±0,10	22,0±0,48 p=0,014
4	8,67±0,09	8,63±0,10	35,0±0,10	24,0±0,26 p=0,037

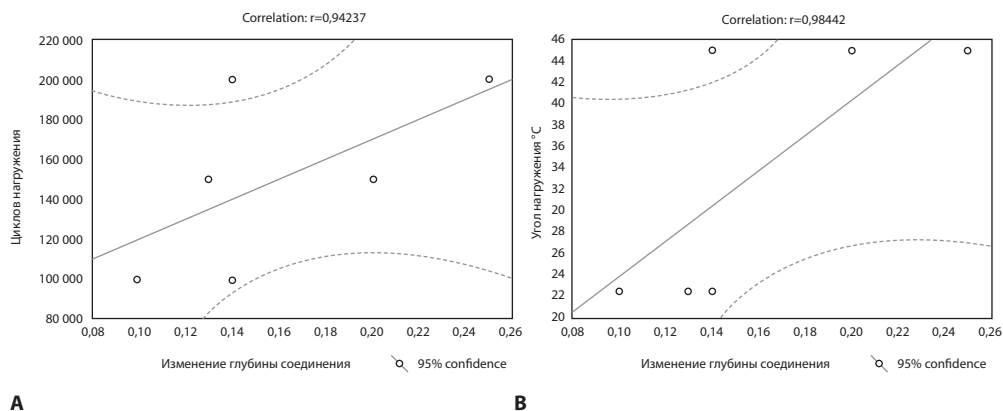


Рис. 7. Корреляционная зависимость между изменением глубины ЦВС и количеством циклов нагружения (А) и увеличением угла нагружения (В) при коническом типе соединения
Fig. 7. Correlation between the change in the CVS depth and the number of loading cycles (A) and the increase in the loading angle (B) with a conical type of connection

всей конструкции, выявлено, что при коническом типе глубина ЦВС снижается на 15%, а степень зажатия винтов – на 54% от изначального уровня до нагрузки, в то время как при плоскостном типе аналогичные параметры снижаются на 39% и 60% соответственно. Следовательно, использование ЦВС конического типа позволяет снизить величину эквивалентных жевательной нагрузке напряжений (по изменению глубины 2-го соединения, имитирующего проекцию 2-го премоляра) на 24% по сравнению с плоскостным типом соединения.

■ ВЫВОДЫ

1. Разработана, изготовлена и апробирована новая экспериментальная модель в системе «зубной протез – дентальный имплантат» для оценки распределения напряжения величиной 100 Н, возникающего под действием разнонаправленных нагрузок по углу нагружения (22,5° и 45°) и количеству циклов нагружения (от 100 000 до 200 000) в четырех соединениях ортопедической конструкции, имитирующих проекции области 1-го и 2-го премоляров, 1-го и 2-го моляров. Проведены испытания на усталостную прочность экспериментальной модели ортопедической конструкции, и установлена взаимосвязь между прочностными характеристиками цементно-винтовой фиксации ортопедических компонентов к дентальным имплантатам (глубина соединения и степень зажатия ортопедических винтов) и углом, а также количеством циклов нагружения. Установлено, что прочностные характеристики соединения зубного протеза и дентального имплантата являются объективными маркерами полноценного функционирования ортопедической конструкции в ротовой полости, с увеличением количества циклов нагружения происходит перераспределение нагрузки преимущественно на 2-й и 3-й элементы ортопедической конструкции с максимальным напряжением во 2-м соединении.



2. При плоскостном типе присоединения абатментов к денальным имплантам изменения прочностных характеристик ортопедической конструкции при угле нагружения $22,5^\circ$ выражены в меньшей степени, чем при 45° и аналогичных условиях по силе воздействия и количеству циклов нагружения. Выявлено значимое снижение глубины ЦВС и степени зажатия ортопедических винтов после экспериментального нагружения с максимальным уменьшением во 2-м и 3-м соединениях экспериментальной модели при 45° и 200 000 циклов нагружения. Установлена прямая корреляционная взаимосвязь между глубиной соединения и углом нагружения ($r=0,73$, $p=0,021$), а также количеством циклов нагружения ($r=0,91$, $p=0,001$). При увеличении угла до 45° и количества циклов нагружения до 200 000 накопление усталости ортопедических конструкций при плоскостном типе соединения по глубине ЦВС возрастает в 1,7 раза во 2-м соединении экспериментальной модели.
3. При коническом типе присоединения абатментов к денальным имплантам изменения прочностных характеристик ортопедической конструкции при угле нагружения $22,5^\circ$ выражены в меньшей степени, чем при 45° и аналогичных условиях по силе воздействия и количеству циклов нагружения. Установлено значимое снижение степени зажатия ортопедических винтов и глубины их соединения после экспериментального нагружения, с увеличением количества циклов нагружения оно постепенно возрастает и наиболее значимо выражено во 2-м и 3-м соединениях экспериментальной модели. Выявлена прямая корреляционная зависимость между глубиной соединения и увеличением угла нагружения ($r=0,98$, $p=0,000$), а также количеством циклов нагружения ($r=0,94$, $p=0,001$). При увеличении угла нагружения до 45° и количества циклов нагружения до 200 000 накопление усталости ортопедических конструкций при коническом типе соединения по глубине ЦВС возрастает в 1,2 раза во 2-м соединении экспериментальной модели.
4. Установлено, что цементно-винтовая ортопедическая конструкция с коническим типом соединения позволяет снизить величину эквивалентных жевательной нагрузке напряжений (по изменению глубины 2-го соединения, имитирующего прорезию 2-го премоляра) на 24% по сравнению с плоскостным типом соединения.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Rubnikov S., Fisyunov A., Busko V. Methods of fatigue tests of composite-reinforced stump pin tabs with a different number of reinforcing elements. *Dentist*. 2017;2(25):14–18. (in Russian)
2. Rozhnov S., Lomakin M. The teeth and implant consistence: the morphometric characteristics in comparison with design features. *Russian Journal of Stomatology*. 2015;8(2):49–57. (in Russian)
3. Warreth A., Ibieyou N., O'Leary R.B. et al. Dental implants: an overview. *Dent Update*. 2017;44:596–620.
4. Renvert S., Persson G.R., Pirih F.Q., Camargo P.M. Peri-implant health, peri-implant mucositis and peri-implantitis: case definitions and diagnostic considerations. *Journal Periodontol*. 2018;89(1):304–312.
5. Ravidà A., Tattan M., Askar H. et al. Comparison of three different types of implant-supported fixed dental prostheses: A long-term retrospective study of clinical outcomes and cost-effectiveness. *Clinical Oral Implants Res*. 2019;30(4):295–305. doi: 10.1111/clr.13415
6. Busko V. Laboratory installation for the study of fatigue damage of flat ferromagnetic samples. *Instruments and experimental techniques*. 2011;1:165–167. (in Russian)