

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/uds697917>

EDN: QZJZSU

# Изучение методом конечных элементов влияния ортодонтической силы на микроимплантат и структуры верхней челюсти: исследование случай — контроль

Р.А. Фадеев, И.К. Шевченко

Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Широкое клиническое применение получают ортодонтические микроимплантаты, установленные в подскуловую область. Нами не обнаружено систематизированных исследований, характеризующих анатомию области и величину сил, воздействующих на микроимплантат в подскуловой области.

**Цель исследования.** Изучить влияние ортодонтической силы, воздействующей на микроимплантат и структуры верхней челюсти, с помощью метода конечных элементов.

**Методы.** Построена цифровая модель верхней челюсти пациента, проходящего ортодонтическое лечение с применением брекет-системы и микроимплантата, установленного в подскуловую область. С помощью метода конечных элементов проанализировано влияние ортодонтической силы, воздействующей на микроимплантат и структуры верхней челюсти (подвижную слизистую оболочку полости рта, компактную пластинку и губчатую ткань альвеолярного отростка).

**Результаты.** Под воздействием нагрузки модель демонстрировала изменения физических характеристик. Установлено, что общие деформационные изменения микроимплантата составили 0,0002 мм, что можно быть интерпретировано как минимальные значения, не оказывающие влияния на его стабильность. Эквивалентное напряжение в модели концентрировалось в области компактной пластинки верхней челюсти, при этом предел значений составил 0,021 МПа. За счёт высокой плотности компактной пластинки в губчатой ткани эквивалентное напряжение уменьшалось в несколько раз.

**Заключение.** Деформационные процессы носят локализованный характер и находятся в пределах физиологической нормы, что подтверждает корректность распределения нагрузки между имплантатом и окружающими тканями.

**Ключевые слова:** ортодонтический микроимплантат; метод конечных элементов; ортодонтическое лечение.

## Как цитировать

Фадеев Р.А., Шевченко И.К. Изучение методом конечных элементов влияния ортодонтической силы на микроимплантат и структуры верхней челюсти: исследование случай — контроль // Университетская стоматология и челюстно-лицевая хирургия. 2025. Т. 3, № 4. С. 150–155. DOI: 10.17816/uds697917 EDN: QZJZSU

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/uds697917>

EDN: QZJZSU

# Finite Element Analysis of the Effects of Orthodontic Force on a Microimplant and Maxillary Structures: A Case-Control Study

Roman A. Fadeev, Irina K. Shevchenko

North-Western State Medical University named after. I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Orthodontic microimplants placed in the infrazygomatic region are increasingly used in clinical practice. However, no systematic studies have been identified that comprehensively characterize the anatomy of this region and the magnitude of forces acting on a microimplant placed in the infrazygomatic region.

**AIM:** To evaluate the effects of orthodontic force applied to a microimplant and the surrounding maxillary structures using finite element analysis.

**METHODS:** A digital model of the maxilla was constructed for a patient undergoing orthodontic treatment with a fixed appliance system and a microimplant placed in the infrazygomatic region. Finite element analysis was performed to assess the influence of orthodontic force on the microimplant and adjacent maxillary structures (including the movable oral mucosa, the cortical plate, and the cancellous bone of the alveolar process).

**RESULTS:** Under applied loading, the model demonstrated changes in physical parameters. The total deformation of the microimplant was 0.0002 mm, which may be interpreted as minimal and not affecting its stability. Equivalent stress in the model was concentrated in the cortical plate of the maxilla, with the limit reaching 0.021 MPa. Due to the high density of the cortical bone, equivalent stress values in the cancellous bone were several times lower.

**CONCLUSION:** The deformation processes were localized and remained within physiological limits, confirming appropriate load distribution between the implant and surrounding tissues.

**Keywords:** orthodontic microimplant; finite element analysis; orthodontic treatment.

## To cite this article

Fadeev RA, Shevchenko IK. Finite Element Analysis of the Effects of Orthodontic Force on a Microimplant and Maxillary Structures: A Case-Control Study. *Acta Universitatis Dentistriae et Chirurgiae Maxillofacialis*. 2025;3(4):150–155. DOI: 10.17816/uds697917 EDN: QZJZSU

Submitted: 05.12.2025

Accepted: 22.12.2025

Published online: 30.12.2025

## ОБОСНОВАНИЕ

Ортодонтическое лечение с применением микроимплантатов сегодня становится рядовой практикой врача-ортодонта. Основная задача применения микроимплантатов — это создание опоры для перемещения зубов [1, 2]. В зависимости от выбранного места установки, микроимплантаты могут различаться формой и размером. Одним из самых больших микроимплантатов считается подскуловой. Его диаметр составляет 2,0 мм, длина от 14,0 до 18,0 мм. Несмотря на большие размеры, он достаточно часто применяется в ортодонтической практике. Опираясь на него, можно перемещать целую группу зубов, а также менять наклон окклюзионной плоскости [3–5].

Нами не обнаружено систематизированных данных, показывающих, какие физические изменения происходят под воздействием ортодонтической силы в микроимплантатах и окружающих структурах челюсти. Для успешного применения микроимплантата, установленного в подскуловую область, важно подробно изучить анатомию области установки и рассчитать плотность костных структур.

### Цель

Изучить влияние ортодонтической силы, воздействующей на микроимплантат и структуры верхней челюсти, методом конечных элементов.

## МЕТОДЫ

### Дизайн исследования

Выполнено наблюдательное исследование по типу случай — контроль. При формировании исследуемой выборки имела место случайная выборка, сформированная по усмотрению исследователя.

### Условия проведения исследования

Использованы данные компьютерной томографии и внутриротового сканирования пациентов, проходящих

ортодонтическое лечение с применением брекет-системы и установленным в подскуловую область микроимплантатом (рис. 1). Применён микроимплантат диаметром 2,0 мм и длиной 17,0 мм.

### Исследуемый диагностический метод

В рамках исследования в программе ANSYS Multiphysics (США) разработана трёхмерная твёрдотельная модель верхней челюсти с установленным микроимплантатом. Затем модель «имплантат – структуры верхней челюсти» была проанализирована с помощью метода конечных элементов для оценки влияния ортодонтической силы, воздействующей на микроимплантат и структуры верхней челюсти (подвижную слизистую оболочку полости рта, компактную пластинку и губчатую ткань альвеолярного отростка в подскуловой области). Определены уровни распределения напряжений и деформаций в костной ткани и в самом микроимплантате.

Для проведения расчётов использовали диаграмму прочности, на которой нанесены соответствующие значения механических напряжений и деформации (рис. 2). Кривая позволяет оценить взаимосвязь между напряжением и деформацией, определить зависимость свойств материалов, основываясь на средних значениях показателей, опубликованных в доступных источниках литературы и приведённых в табл. 1 [6–8].

В нашем исследовании на микроимплантат воздействовала сила в 180 г. Основными показателями стали измерения деформационных характеристик, эквивалентного напряжения и эквивалентная деформация.

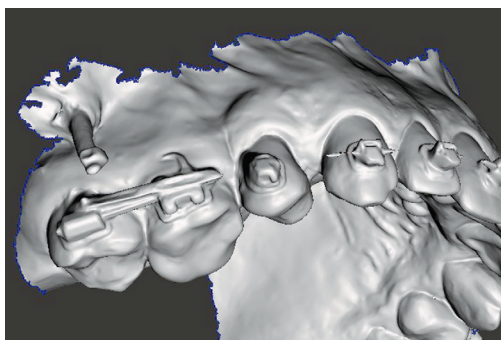
### Критерии отбора

Исследование проводили на кафедре ортопедической стоматологии, ортодонтии и гнатологии ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова». В исследование включены пациенты с диагнозом K07.6 — аномалия соотношения зубных рядов, дистальное соотношение зубных рядов.

**Таблица 1.** Данные о материалах, включённых в расчётную модель

**Table 1.** Material properties included in the computational model

| Обозначение сборочной единицы/узла/детали | Материал  | Механические характеристики  |
|---|---|--|
| Микроимплантат                            | Сплав стали   | Плотность — 8,3 г/см <sup>3</sup><br>Модуль Юнга — 200 ГПа<br>Коэффициент Пуассона — 0,3 |
| Анатомический объект исследования         | Компактная пластинка альвеолярного отростка верхней челюсти | Плотность — 2 г/см <sup>3</sup><br>Модуль Юнга — 20 ГПа<br>Коэффициент Пуассона — 0,35   |
| Анатомический объект исследования         | Слизистая оболочка полости рта                              | Плотность — 1 г/см <sup>3</sup><br>Модуль Юнга — 10 МПа<br>Коэффициент Пуассона — 0,49   |
| Анатомический объект исследования         | Губчатая ткань альвеолярного отростка верхней челюсти       | Плотность — 1,1 г/см <sup>3</sup><br>Модуль Юнга — 50 МПа<br>Коэффициент Пуассона — 0,33 |



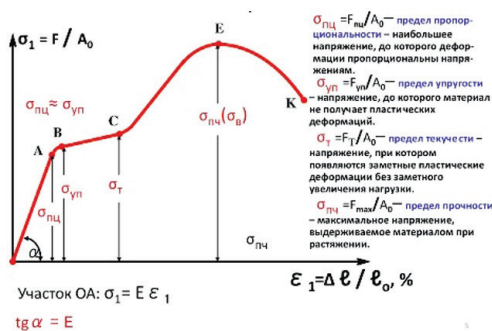
**Рис. 1.** Цифровая модель верхней челюсти с установленным микроимплантатом.

**Fig. 1.** Digital model of the maxilla with the microimplant *in situ*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При исследовании деформационных характеристик имплантата выявлены следующие закономерности: максимальные перемещения наблюдаются в зоне нагрузки (шейке имплантата) с величиной 0,0002 мм для верхней части изделия, при этом в зоне резьбы микроимплантата деформаций не возникает. Перемещения узлов системы костной ткани не происходит (рис. 3).

Эквивалентное напряжение — это величина, используемая для оценки прочности материала при сложном напряжённом состоянии. Оно позволяет свести сложное напряжённое состояние к эквивалентному одноосному напряжению, вызывающему ту же степень деформации или разрушения. Микроимплантат демонстрирует устойчивую реакцию на воздействие нагрузки: возникающие деформации носят упругий характер (возвратная деформация), без перехода в пластическую область. Анализ напряжённого состояния общей модели «микроимплантат — структуры верхней челюсти» показывает, что максимальные нагрузки концентрируются в области компактной пластинки верхней челюсти, где формируется давление, сопоставимое с 0,021 МПа, а в губчатой ткани из-за меньшей жёсткости эквивалентное напряжение

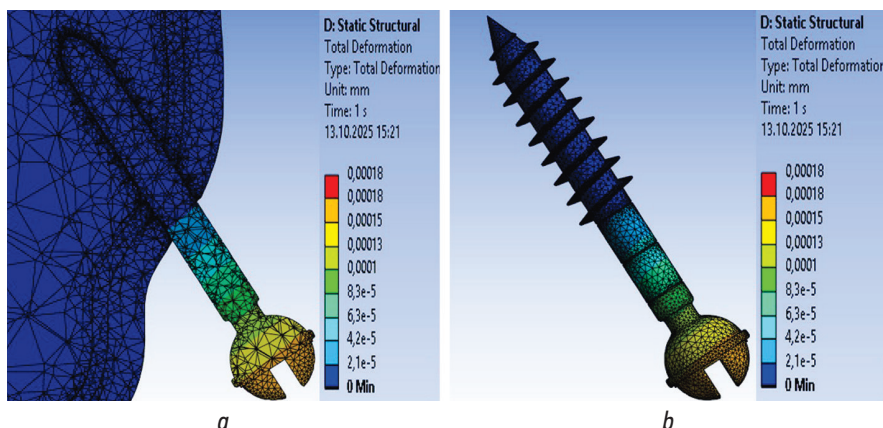


**Рис. 2.** Диаграмма прочности.

**Fig. 2.** Strength diagram.

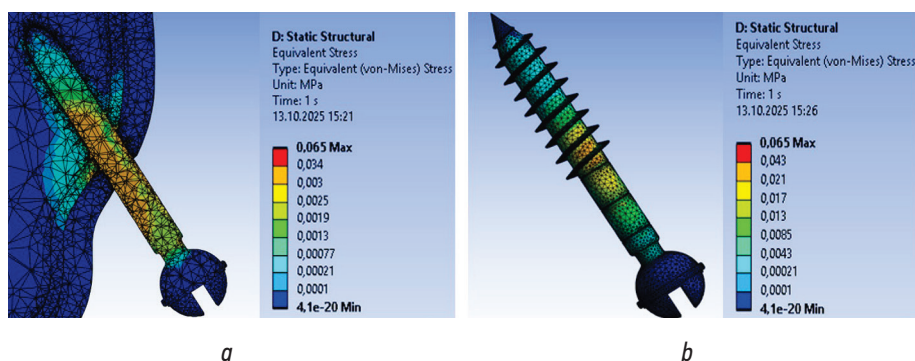
резко падает, достигая значений 0,00077 МПа. Уровень напряжений в местах непосредственного контакта микроимплантата с костной тканью под действием нагрузки возрастает до 0,64 МПа (рис. 4).

Эквивалентная деформация — это мера общей деформации материала, учитывающая как упругую, так и пластическую деформацию. Эквивалентная упругая деформация при воздействии приложенной нагрузки составила 0,000008 мм/мм. При воздействии имплантата на структуры верхней челюсти упругая деформация локализовалась преимущественно в области мягких тканей, что обусловлено характеристиками структур и большей податливостью. Компактная пластинка и губчатая кость демонстрировали нормальное распределение деформаций в соответствии с приложенной нагрузкой, при этом значения достигали  $1,6817e^{-7}$  мм/мм. Имплантат проявлял адекватную реакцию на деформационные нагрузки в зоне контакта с костными структурами челюстно-лицевой системы; максимальные значения составили  $1,3914e^{-7}$  мм/мм. Деформационные процессы носили локализованный характер и находились в пределах физиологической нормы, что подтверждает корректность распределения нагрузки между имплантатом и тканями (рис. 5).



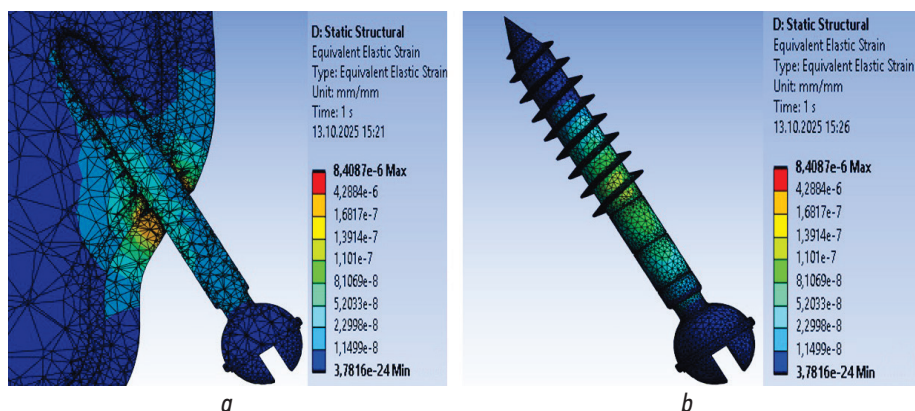
**Рис. 3.** Деформационные характеристики имплантата: *a* — общие перемещения модели «имплантат — структуры верхней челюсти», мм; *b* — общие перемещения микроимплантата, мм.

**Fig. 3.** Deformation characteristics of the implant: *a*—total displacement of the implant–maxillary structures model, mm; *b*—total displacement of the microimplant, mm.



**Рис. 4.** Эквивалентные напряжения в модели «имплантат — структуры верхней челюсти»: *a* — в структуре верхней челюсти, МПа; *b* — в микроимплантате, МПа.

**Fig. 4.** Equivalent stresses in the implant-maxillary structures model: *a*, in the maxillary structures, MPa; *b*, in the microimplant, MPa.



**Рис. 5.** Эквивалентная деформация в модели «имплантат — структуры верхней челюсти»: *a* — в структуре верхней челюсти, мм/мм; *b* — в микроимплантате, мм/мм.

**Fig. 5.** Equivalent strain in the implant-maxillary structures model: *a*, in the maxillary structures, mm/mm; *b*, in the microimplant, mm/mm.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, какие физические изменения происходят в модели под воздействием ортодонтической силы, приложенной к микроимплантату и структурам верхней челюсти. Установлено, что в микроимплантате происходят перемещения 0,0002 мм в точке воздействия, при этом в костной ткани перемещений не выявлено. За счёт высокой плотности компактной пластинки, в губчатой ткани эквивалентное напряжение резко падает, достигая минимальных значений. Полученный результат важно учитывать при низких значениях плотности и тонком слое компактной пластинки. В этом случае напряжение будет концентрироваться в губчатой ткани, вызывая её резорбцию и преждевременную подвижность самого имплантата. Упругая деформация локализуется в области мягких тканей. Компактная пластинка и губчатая кость демонстрируют нормальное распределение деформаций. Все показатели — перемещения элементов конструкции микроимплантата, эквивалентные напряжения и эквивалентные деформации — находятся в пределах допустимых значений. Нагрузка 180 г не оказывает влияния на функциональность микроимплантата и структур верхней челюсти. Полученные данные позволяют расширить

возможности использования микроимплантатов в подскуловой области.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Р.А. Фадеев — определение концепции, руководство исследованием, валидация; И.К. Шевченко — анализ данных, проведение исследования, написание черновика рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты настоящей работы, гарантируют надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Этическая экспертиза.** Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом СЗГМУ им. И.И. Мечникова (протокол № 10 от 11.10.2023). Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

**Согласие на публикацию.** Авторы получили письменное информированное добровольное согласие пациентов.

**Источники финансирования.** Отсутствуют.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

**Доступ к данным.** Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** R.A. Fadeev: conceptualization, supervision, validation; I.K. Shevchenko: formal analysis, investigation, writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Ethics approval:** The study was approved by the Local Ethics Committee of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov (Minutes No. 10 dated October 11, 2023). All participants provided written informed consent to participate in the study.

**Consent for publication:** Written informed consent was obtained from the patients for publication of personal data, including photographs, in a scientific journal.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously published material (text, images, or data) was used in this article.

**Data availability statement:** The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

**Provenance and peer-review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one external reviewer, a member of the Editorial Board, and the in-house science editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Shevchenko IK, Fadeev RA. Use of orthodontic miniscrews to correct the distal malocclusion. *Acta Universitatis Dentistriae et Chirurgiae Maxillofacialis*. 2024;2(2):57–65. doi: 10.17816/uds631887 EDN: YELYRH
2. Du B, Zhu J, Li L, et al. Bone depth and thickness of different infra-zygomatic crest miniscrew insertion paths between the first and second maxillary molars for distal tooth movement: A 3-dimensional assessment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2021;160(1):113–123. doi: 10.1016/j.ajodo.2020.03.036 EDN: GAOYZO
3. Murugesan A, Sivakumar A. Comparison of bone thickness in infra-zygomatic crest area at various miniscrew insertion angles in Dravidian population — A cone beam computed tomography study. *Int Orthod*. 2020;18(1):105–114. doi: 10.1016/j.ortho.2019.12.001 EDN: FLVUJP
4. Carano A, Velo S, Incurvati C, Poggio P. Clinical applications of the Mini-Screw-Anchorage-System (M.A.S.) in the maxillary alveolar bone. *Prog Orthod*. 2004;5(2):212–235.
5. Jia X, Chen X, Huang X. Influence of orthodontic mini-implant penetration of the maxillary sinus in the infrazygomatic crest region. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2018;153(5):656–661. doi: 10.1016/j.ajodo.2017.08.021
6. Rogozhnikov GI, Konyukhova SG, Nyashin Yul, Chernopazov SA. The influence of the elastic modulus of spongy and cortical bone on the stress state in the area of a plate implant under occlusal load. *Russian journal of biomechanics*. 2004;8(1):58–60. (In Russ.) EDN: JWSHCL
7. Perelmuter MN. Analysis of stress-strain state of dental implants by the boundary integral equations method. *PNRPU mechanics bulletin*. 2018;(2):83–95. doi: 10.15593/perm.mech/2018.2.08 EDN: XUGGCL
8. Perelmuter MN. Stress concentration in bone tissues and screw dental implants. *Russian journal of biomechanics*. 2023;(2):18–29. doi: 10.15593/RZhBiomech/2023.2.02 EDN: CXBTIB

## ОБ АВТОРАХ

**\*Фадеев Роман Александрович**, д-р мед. наук, профессор; адрес: Россия, 195196, Санкт-Петербург, Заневский пр-кт, д. 1/82; ORCID: 0000-0003-3467-4479; eLibrary SPIN: 4556-5177; e-mail: sobol.rf@yandex.ru

**Шевченко Ирина Константиновна**; ORCID: 0009-0000-0602-2508; eLibrary SPIN: 5631-2274; e-mail: irinash88@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**\*Roman A. Fadeev**, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; address: 1/82 Zanevsky ave, Saint Petersburg, Russia, 195196; ORCID: 0000-0003-3467-4479; eLibrary SPIN: 4556-5177; e-mail: sobol.rf@yandex.ru

**Irina K. Shevchenko**; ORCID: 0009-0000-0602-2508; eLibrary SPIN: 5631-2274; e-mail: irinash88@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author