УДК 616.314-77:004.8

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОДИНОЧНЫХ КОРОНОК ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ЗНАЧЕНИЕ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОГО ПРОТОКОЛА

Раджапов Т.А
Ургенчский государственный медицинский институт
Нуралиев Н.А
Ургенчский государственный медицинский институт здоровья и стратегического развития
Иноятов А.Ш
Ургенчский РАНЧ технологический университет.
г. Ургенч, Республика Узбекистан,
e-mail: chemypro@mail.ru ,
тел.: +998907389969.
https://doi.org/10.5281/zenodo.24247715

Аннотация. В обзоре проанализированы публикации, преимущественно 2020–2026 годов, о проектировании одиночных коронок с помощью искусственного интеллекта (ИИ) и о точности коронок из диоксида циркония при разных способах получения цифровых данных. Поиск проведён в базе PubMed, в анализ включены 20 публикаций, в основном систематические обзоры, метаанализы и сравнительные исследования. Программы с ИИ проектируют жевательные коронки быстрее зубного техника и строят форму, сопоставимую с ручным дизайном, но хуже справляются с передними зубами и функциональными фасетками стирания. Почти все сравнения выполнены на моделях и внутриротовых сканах, а единственное зарегистрированное клиническое исследование ещё не начало набор пациентов. Коронки из диоксида циркония, изготовленные по традиционным оттискам, имеют клинически приемлемое прилегание, хотя цифровое сканирование даёт меньший краевой зазор. Точность ИИ-проектирования по лабораторным сканам гипсовых моделей и клинические результаты таких коронок остаются неизученными.

Ключевые слова: искусственный интеллект, глубокое обучение, компьютерное проектирование, коронка, диоксид циркония, краевое прилегание, аналогово-цифровой протокол.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DESIGN OF SINGLE ZIRCONIA CROWNS: CAPABILITIES, LIMITATIONS AND THE ROLE OF THE ANALOG-DIGITAL WORKFLOW (LITERATURE REVIEW)

Abstract. This review summarizes publications, mainly from 2020–2026, on artificial intelligence (AI) in the design of single crowns and on the fit of zirconia crowns made from digital and conventional impressions. PubMed was searched, and 20 publications, mostly systematic reviews, meta-analyses and comparative studies, were analyzed. AI software designs posterior crowns faster than dental technicians and produces comparable morphology, but performs worse for anterior teeth and functional wear facets. Almost all comparisons were

carried out on models and intraoral scans, and the only registered clinical trial has not yet started recruitment. Zirconia crowns made from conventional impressions show clinically acceptable fit, although digital scanning yields smaller marginal gaps. The accuracy of AI design based on laboratory scans of stone casts and the clinical outcomes of such crowns remain unstudied.

Keywords: artificial intelligence, deep learning, computer-aided design, crown, zirconia, marginal fit, analog-digital workflow.

Введение

Монолитные коронки из диоксида циркония по надёжности не уступают металлокерамике. По данным метаанализа 64 клинических исследований, пятилетняя выживаемость монолитных циркониевых коронок на естественных зубах составляет 96,8%, металлокерамических 97,1%, а сколов и переломов керамики у монолитных коронок значительно меньше, чем у облицованных [11].

Такую коронку фрезеруют по цифровой модели, поэтому её форму, толщину стенок и цементный зазор задаёт компьютерное проектирование (CAD). Его выполняет зубной техник, и результат зависит от опыта. Когда пять техников проектировали одни и те же коронки в обычной CAD-программе, отклонение окклюзионной поверхности составило 275,5 ± 116,8 мкм, а в программе с искусственным интеллектом (ИИ) 25,7 ± 13 мкм, причём с ИИ коронки получались одинаковыми независимо от опыта техника [10].

Программы с ИИ уже вошли в работу лабораторий. В систематическом обзоре Revilla-León M. и соавт. из 36 работ по ИИ в ортопедической стоматологии 14 посвящены автоматическому проектированию реставраций [13], а генеративный ИИ для проектирования протезов относят к главным новым направлениям специальности [16]. По данным компании 3Shape, её сервис автоматического проектирования за три года обработал около 2,5 млн случаев, и 94% предложенных дизайнов были приняты пользователями [22].

Большинство моделей ИИ обучали и проверяли на данных внутриротовых сканеров [14]. Клиники без внутриротового сканера получают цифровую модель по аналогово-цифровому протоколу: врач снимает силиконовый оттиск, по нему отливают гипсовую модель, и её сканируют в зуботехнической лаборатории. Насколько выводы о точности ИИ-проектирования переносятся на такие данные, почти не изучено.

Цель обзора состоит в том, чтобы обобщить данные о точности и эффективности проектирования одиночных коронок с помощью ИИ и оценить, насколько они применимы к коронкам из диоксида циркония, изготовленным по аналогово-цифровому протоколу.

Материал и методы

Поиск выполнен в базе PubMed с января 2020 по ноябрь 2026 года по сочетаниям терминов artificial intelligence, deep learning, machine learning с терминами prosthodontics, crown design, dental crown, а также по терминам zirconia crown, marginal fit, digital impression, conventional impression, intraoral scanner и extraoral scanner. Отбирали систематические обзоры, метаанализы и сравнительные исследования. Дополнительно просмотрены реестр ClinicalTrials.gov и материалы производителей CAD/CAM-систем. Для порога клинически допустимого краевого зазора использована классическая работа McLean J.W. и von Fraunhofer J.A. В анализ вошли 20 публикаций.

Требования к точности коронок из диоксида циркония

Клинически допустимым обычно считают краевой зазор до 120 мкм [9, 15]. На прилегание циркониевых коронок влияют форма уступа, способ получения оттиска и величина цементного пространства: прямой уступ (shoulder) даёт несколько лучшее краевое прилегание, чем желобообразный (chamfer), увеличение цементного пространства улучшает посадку, а цементирование и облицовка увеличивают краевой и внутренний

зазоры [1]. Цементный зазор и толщину края техник задаёт при проектировании, поэтому эти параметры одинаково важны и для ручного, и для ИИ-дизайна.

Клинические данные о монолитных циркониевых коронках, изготовленных по технологии CAD/CAM, пока охватывают короткие сроки. В систематическом обзоре Leitão C.I.M.B. и соавт. 1657 коронок наблюдали от 0,3 до 2,1 года, выживаемость составила от 91 до 100%. Исключением стало исследование с участием пациентов с бруксизмом, где успешность по краевой целостности составила лишь 31,6% [8]. Это обосновывает исключение пациентов с бруксизмом из клинических исследований коронок.

Цифровое и аналоговое получение данных

Способ получения оттиска влияет на прилегание коронки, но в пределах клинической нормы. По метаанализу 17 исследований, цифровое сканирование препарированных зубов даёт лучшее краевое прилегание одиночных циркониевых коронок, чем традиционные оттиски эластомерными материалами [18]. Метаанализ 10 клинических исследований 2026 года показал, что при цифровом сканировании краевой зазор меньше в среднем на 15,42 мкм (95% ДИ от −29,75 до −1,08), а внутренний на 21,22 мкм, при этом оба способа дают клинически приемлемый результат [3].

Обзор 18 систематических обзоров подтверждает эту тенденцию для диоксида циркония: цифровые методы оказались лучше традиционных в 4 из 5 обзоров клинических исследований и во всех обзорах лабораторных, тогда как для дисиликата лития и кобальт-хромового сплава различий не было [12]. Во всех группах материалов и способов получения оттиска краевое прилегание оставалось в пределах 120 мкм [15]. Внутриротовые и лабораторные сканеры дают клинически приемлемую точность, хотя для частичной дуги внутриротовые сканеры точнее [17].

Таким образом, аналогово-цифровой протокол позволяет изготовить циркониевую коронку с приемлемым прилеганием, но исходная модель при нём отличается от внутриротового скана. Граница препарирования на гипсовой модели видна после её обработки техником, а поверхность модели и погрешность оттиска добавляются к погрешности сканирования. Модели ИИ чаще всего обучали на внутриротовых сканах [14], и их точность на лабораторных сканах гипсовых моделей изучена мало.

Искусственный интеллект в ортопедической стоматологии

Revilla-León M. и соавт. выделили шесть направлений применения ИИ в ортопедической стоматологии: подбор цвета, автоматическое проектирование реставраций, определение границы препарирования, оптимизация литья, прогноз изменений лица у пациентов со съёмными протезами и проектирование бюгельных протезов. Модель ИИ размечала границу препарирования без участия человека с точностью 90,6–97,4%, однако авторы заключили, что все модели находятся в стадии разработки [13].

Обзор Rokhshad R. и соавт., посвящённый глубокому обучению, включил 31 исследование из 3359 найденных. Чаще всего изучали проектирование и изготовление протезов (13 работ), а среди конструкций лидировали коронки с опорой на зубы (14 работ). Исходными данными в 16 работах служили внутриротовые сканы, наиболее частыми моделями были свёрточные (11 работ) и генеративно-состязательные сети (7 работ). Низкий риск систематической ошибки по всем доменам имели 10 исследований [14]. В обзоре Aljulayfi I.S. и соавт. низкий риск систематической ошибки имели 18,3% из 30 работ, высокий 52,6% [2]. Среди препятствий для внедрения ИИ называют этические и регуляторные вопросы [16].

Автоматическое проектирование коронок

Основные сравнительные исследования ИИ-проектирования коронок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные исследования проектирования коронок с помощью ИИ

Исследование	Материал	Что сравнивали	Основной результат
Ding H. и соавт., 2023 [6]	600 цифровых моделей для обучения, 12 тестовых случаев (второй премоляр нижней челюсти)	Генеративная сеть 3D-DCGAN, CEREC Biogeneric, техник в CAD	Коронки ИИ ближе всего к естественному зубу по форме и распределению напряжений
Çakmak G. и соавт., 2024 [4]	25 сканов пациентов, центральные резцы верхней челюсти	ИИ без правок, ИИ с правкой техника, обычный CAD	Форма и эстетика приемлемы; отклонение резцового пути 290 мкм, после правки техником 132 мкм
Choi J. и соавт., 2024 [5]	182 скана: лабораторные сканы моделей и внутриротовые сканы	Определение границы препарирования: Dentbird, 3Shape, exocad, MEDIT	ИИ не хуже конкурентов, точнее на вогнутой границе жевательных зубов
Wu Z. и соавт., 2025 [20]	33 жевательные коронки	3Shape Automate, Dentbird, опытный и начинающий техник в Exocad	ИИ в 4 раза быстрее начинающего техника, по точности формы не превзошёл опытного
Nagata K. и соавт., 2025 [10]	Премоляр и моляр верхней челюсти, 5 техников	Обычный CAD и CAD с ИИ	Отклонение окклюзионной поверхности 275,5 мкм против 25,7 мкм; с ИИ быстрее и без зависимости от опыта техника
Wang Y. и соавт., 2025 [19]	12 случаев на 3D-печатных моделях	ИИ и опытный техник	Размеры коронок ИИ ближе к естественным зубам; фасетки стирания ИИ не воспроизводит
Hlaing N.H.M.M. и соавт., 2026 [7]	Типодонты с 5 типами окклюзии	Dentbird и автоматический режим 3Shape	Dentbird лучше по критериям FDI для жевательных зубов, хуже для передних при диастемах

Первые работы показали, что ИИ способен воспроизводить анатомию зуба. Трёхмерная генеративная сеть, обученная на 600 цифровых моделях, строила коронки

вторых премоляров, по форме более близкие к естественным зубам, чем коронки CEREC Biogeneric и техника. Распределение напряжений при моделировании методом конечных элементов почти совпало с естественным зубом [6].

Коммерческие программы выигрывают прежде всего во времени. Программы 3Shape Automate и Dentbird спроектировали жевательные коронки в четыре раза быстрее начинающего техника, но по точности формы не превзошли опытного: у Dentbird точность окклюзионной поверхности была ниже, чем в остальных группах, а на краевой линии различий не было [20]. Программа с ИИ сократила время проектирования и устранила разброс между техниками разного опыта [10].

Слабые места ИИ проявляются в функциональных деталях. На передних коронках отклонение резцового пути составило в среднем 290 мкм и снизилось до 132 мкм после доработки техником, что может нарушить переднее ведение [4]. ИИ не воспроизводит функциональные фасетки стирания, хотя вестибулооральный и мезиодистальный размеры его коронок ближе к естественным зубам, чем у коронок техника [19]. На типодонтах с разными типами окклюзии программа глубокого обучения дала лучшие по критериям FDI коронки для жевательных зубов, но хуже справилась с передними зубами при диастемах [7].

Определение границы препарирования ИИ выполняет не хуже традиционных программ. На 182 сканах метод Dentbird оказался не хуже автоматических функций 3Shape, exocad и MEDIT, а на жевательных зубах с вогнутой границей точнее их. В работу входили и лабораторные сканы обработанных гипсовых моделей; порог клинически приемлемого расстояния Хаусдорфа для них составил 0,366 мм, для внутриротовых сканов 0,566 мм [5]. В отличие от большинства работ, здесь отдельно оценивали лабораторные сканы моделей, но исследование касалось только границы препарирования, а не проектирования всей коронки.

Ограничения и нерешённые вопросы

Сравнения ИИ-проектирования выполнены в основном на моделях и типодонтах, выборки составляют от 12 до 33 случаев [7, 19, 20]. Качество доказательств невысокое: низкий риск систематической ошибки имеет меньшинство работ [2, 14].

Клинических данных о коронках, спроектированных ИИ, практически нет. В реестре ClinicalTrials.gov найдено одно исследование: оно рассчитано на 10 пациентов, сравниваемые коронки фрезеруют из полиметилметакрилата, результаты оценивают только в день фиксации, а набор пациентов ещё не начат [21]. Сведений о том, как коронки из диоксида циркония, спроектированные ИИ, ведут себя у пациентов через 6–12 месяцев и более, в доступной литературе нет.

Не изучена точность проектирования всей коронки по лабораторным сканам гипсовых моделей, то есть при аналогово-цифровом протоколе. Не определены клинические ситуации, в которых ИИ-дизайн можно применять без доработки. Работ по этой теме из Узбекистана и Центральной Азии в базе PubMed не найдено.

Заключение

Программы с ИИ сокращают время проектирования одиночных коронок и дают форму жевательных коронок, сопоставимую с работой техника, но передние зубы и функциональные детали окклюзии пока требуют его участия. Монолитные коронки из диоксида циркония надёжны в клинике, а аналогово-цифровой протокол обеспечивает их приемлемое прилегание. Для клиник без внутриротового сканера нужны клинические исследования, в которых коронки из диоксида циркония, спроектированные ИИ по лабораторным сканам гипсовых моделей, сравниваются с ручным проектированием техником по краевому прилеганию, окклюзии и состоянию коронок в динамике.

Список литературы

1. Ahmed W.M., Shariati B., Gazzaz A.Z., Sayed M.E., Carvalho R.M. Fit of tooth-supported zirconia single crowns – a systematic review of the literature // Clin Exp Dent Res. 2020;6(6):700–716. doi:10.1002/cre2.323
2. Aljulayfi I.S., Almatrafi A.H., Althubaitiy R.O., Alnafisah F., Alshehri K., Alzahrani B., Gufran K. The potential of artificial intelligence in prosthodontics: a comprehensive review // Med Sci Monit. 2024;30:e944310. doi:10.12659/MSM.944310
3. Al-Odinee N.M., Al-Haddad A., Alshammari A.F., Madfa A.A. Marginal and internal fit of zirconia CAD-CAM fabricated with conventional impression and digital scanning techniques: a systematic review and meta-analysis // J Prosthet Dent. 2026;136(3):681–690. doi:10.1016/j.prosdent.2026.06.014
4. Çakmak G., Cho J.H., Choi J., Yoon H.I., Yilmaz B., Schimmel M. Can deep learning-designed anterior tooth-borne crown fulfill morphologic, aesthetic, and functional criteria in clinical practice? // J Dent. 2024;150:105368. doi:10.1016/j.jdent.2024.105368
5. Choi J., Ahn J., Park J.M. Deep learning-based automated detection of the dental crown finish line: an accuracy study // J Prosthet Dent. 2024;132(6):1286.e1–1286.e9. doi:10.1016/j.prosdent.2023.11.018
6. Ding H., Cui Z., Maghami E., Chen Y., Matinlinna J.P., Pow E.H.N., Fok A.S.L., Burrow M.F., Wang W., Tsoi J.K.H. Morphology and mechanical performance of dental crown designed by 3D-DCGAN // Dent Mater. 2023;39(3):320–332. doi:10.1016/j.dental.2023.02.001
7. Hlaing N.H.M.M., Çakmak G., Karasan D., Kim S.J., Sailer I., Lee J.H. Artificial intelligence-driven automated design of anterior and posterior crowns under diverse occlusal scenarios // J Esthet Restor Dent. 2026;38(1):129–142. doi:10.1111/jerd.70029
8. Leitão C.I.M.B., Fernandes G.V.O., Azevedo L.P.P., Araújo F.M., Donato H., Correia A.R.M. Clinical performance of monolithic CAD/CAM tooth-supported zirconia restorations: systematic review and meta-analysis // J Prosthodont Res. 2022;66(3):374–384. doi:10.2186/jpr.JPR_D_21_00081
9. McLean J.W., von Fraunhofer J.A. The estimation of cement film thickness by an in vivo technique // Br Dent J. 1971;131(3):107–111. doi:10.1038/sj.bdj.4802708
10. Nagata K., Inoue E., Nakashizu T., Seimiya K., Atsumi M., Kimoto K., Kuroda S., Hoshi N. Verification of the accuracy and design time of crowns designed with artificial intelligence // J Adv Prosthodont. 2025;17(1):1–10. doi:10.4047/jap.2025.17.1.1
11. Pjetursson B.E., Pitta J., Balet A., Bjarnadottir G.R., Sailer I., Romandini P. A systematic review and meta-analysis evaluating the survival, failure, and complication rates of metal-ceramic, veneered, and monolithic all-ceramic tooth-supported single crowns – Part 1 // Int J Prosthodont. 2026;39(3):308–324. doi:10.11607/ijp.9633
12. Porto A.M., Nascimento M.V., Garcia B.A., de Freitas Pontes K.M., Costa F.W.G., de Negreiros W.A. Marginal adaptation of tooth-supported fixed restorations fabricated using digital scanning versus conventional impression techniques: an overview of systematic reviews // J Prosthet Dent. 2025;134(3):629.e1–629.e13. doi:10.1016/j.prosdent.2025.05.044
13. Revilla-León M., Gómez-Polo M., Vyas S., Barmak A.B., Gallucci G.O., Att W., Özcan M., Krishnamurthy V.R. Artificial intelligence models for tooth-supported fixed and removable prosthodontics: a systematic review // J Prosthet Dent. 2023;129(2):276–292. doi:10.1016/j.prosdent.2021.06.001
14. Rokhshad R., Khosravi K., Motie P., Sadeghi T.S., Tehrani A.M., Zarbakhsh A., Revilla-León M. Deep learning applications in prosthodontics: a systematic review // J Prosthet Dent. 2026;135(3):539–551. doi:10.1016/j.prosdent.2025.04.009

15. Sarafidou K., Chatziparaskeva M., Chatzikamagiannis D., Mpotskaris V., Tortopidis D., Bakopoulou A., Kokoti M. Evaluation of marginal/internal fit of fixed dental prostheses after digital, conventional, and combination impression techniques: a systematic review // Eur J Oral Sci. 2022;130(6):e12902. doi:10.1111/eos.12902
16. Schwendicke F., Mohammad Rahimi H., Tichy A. Artificial intelligence in prosthodontics // Dent Clin North Am. 2025;69(2):315–326. doi:10.1016/j.cden.2024.11.009
17. Shah N., Thakur M., Gill S., Shetty O., Alqahtani N.M., Al-Qarni M.A., Alqahtani S.M., Elagib M.F.A., Chaturvedi S. Validation of digital impressions' accuracy obtained using intraoral and extraoral scanners: a systematic review // J Clin Med. 2023;12(18):5833. doi:10.3390/jcm12185833
18. Tabesh M., Nejatidanesh F., Savabi G., Davoudi A., Savabi O., Mirmohammadi H. Marginal adaptation of zirconia complete-coverage fixed dental restorations made from digital scans or conventional impressions: a systematic review and meta-analysis // J Prosthet Dent. 2021;125(4):603–610. doi:10.1016/j.prosdent.2020.01.035
19. Wang Y., Li Y., Xu M., Liu F. Comparative analysis of full crown morphology designed by artificial intelligence and dental technicians // J Dent. 2025;163:106131. doi:10.1016/j.jdent.2025.106131
20. Wu Z., Zhang C., Ye X., Dai Y., Zhao J., Zhao W., Zheng Y. Comparison of the efficacy of artificial intelligence-powered software in crown design: an in vitro study // Int Dent J. 2025;75(1):127–134. doi:10.1016/j.identj.2024.06.023
21. ClinicalTrials.gov. NCT07099261. A comparative clinical study to evaluate crowns designed by artificial intelligence versus crowns designed traditional design software. URL: https://clinicaltrials.gov/study/NCT07099261
22. Harnessing the power of AI in digital dentistry // 3Shape. URL: https://www.3shape.com/en/blog/inspiration-on-dentistry/artificial-intelligence-in-dentistry