

КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ технологии обработки сложной рабочей поверхности зубных протезов на имплантатах CAD/CAM для пациентов с частичной адентией

А.В.Ефимин

• аспирант, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный национальный исследовательский университет" (НИУ "БелГУ");
Стоматология ООО "Дента Люкс"
Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
Тел.: +7 (4722) 30-12-11
E-mail: dlux73@mail.ru

Key words: dental surface processing technologies, CAD/CAM models, automation of dental prosthesis manufacturing, shaping of dental prostheses.

В настоящее время полные зубные протезы в основном проектируются и изготавливаются с использованием традиционных методов, которые включают широкий ряд клинических и лабораторных процедур [5]. Эти клинические и лабораторные процедуры в основном выполняются вручную.

Компьютерное проектирование и автоматизированное производство (CAD/CAM) стали новым подходом к проектированию и изготовлению полных зубных протезов [2, 7]. Использование технологии CAD/CAM в области стоматологии восходит к началу 1980-х годов [5]. Однако, в отличие от широкого использования этой новой технологии в других разделах стоматологии, использование CAD/CAM было ограничено при производстве полных зубных протезов из-за отсутствия подходящего программного обеспечения CAD до недавнего времени [1, 4, 5]. Несколько коммерческих программных систем САПР, в том числе 3Shape Dental System и цифровые зубные протезы AvaDent [12], недавно стали доступны для проектирования полных зубных протезов.

Однако сообщения об использовании технологии CAD/CAM для изготовления полных зубных протезов в литературе по-прежнему ограничены [6]. В этом исследовании мы сообщаем о наших усилиях по проектированию и изготовлению полного протеза с использованием коммерчески доступного программного обеспечения CAD и фрезерного станка с САМ-управлением. Например, технология искусственного интеллекта продемонстрировала свой потенциал в программируемой установке зубов для зубных протезов, помогая установить правильный прикус и обеспечить оптимальное функционирование зубного протеза [4]. Кроме того, алгоритмы искусственного интеллекта "обещают" повысить точность и индивидуализацию зубных протезов, что в конечном итоге приведет к улучшению результатов лечения пациентов. Анализируя данные пациентов, автоматические системы проектирования могут облегчить проектирование и изготовление съемных частичных зубных протезов с учетом индивидуальных требований пациента и его анатомических особенностей [9].

Maeda et al. [12] сообщили о новаторской работе по проектированию и изготовлению полных зубных протезов с использованием CAD/CAM. Они разработали компьютерную систему, включающую рабочую станцию для определения расположения зубных протезов, окклюзии, контура полированной поверхности и расположения границ протеза, с использованием базы данных знаний. После этой новаторской работы были предприняты усилия по разработке компьютерных программ или программного обеспечения САПР, способного проектировать полные зубные протезы [3]. Однако прогресс в широком использовании этой CAD/CAM технологии для изготовления полных зубных протезов для пациентов с полной потерей зубов был медленным из-за сложной конструкции полных зубных протезов, что значительно затрудняло разработку программного обеспечения или вычислительных программ. По заключению вы-

шеприведенных исследований, однако, выявлено, что между некоторыми зубами и соответствующими базами протезов определялись зазоры. Это можно объяснить тем фактом, что десна была спроектирована так, чтобы достигать высоких точек лабиальной/щечной поверхности коронок для лучшей морфологии, что приводило к появлению некоторых подрезанных участков. Кроме того, на точность обрабатывающего инструмента повлияла длительная обработка, в результате которой выделялось слишком много тепла. Данная проблема по-прежнему решается путем ручной шлифовки соответствующих участков.

В связи с вышесказанным, целью данной работы является проектирование управляющей программы обработки математической модели формообразования зубного протеза. Характерной особенностью предложенной модели 3D обработки является наличие неравномерного распределения припуска вдоль обрабатываемой поверхности. Повышение производительности операции 3D обработки можно достичь за счет рационального использования возможностей инструмента, то есть назначения соответствующих режимов, в том числе подач, что для соответствующих участков обрабатываемой поверхности в комплексе позволит обеспечить относительную стабильность напряжений в режущем инструменте и погрешность обработки. На рис. 1 представлено геометрическое взаимодействие инструмента 1 с заготовкой 2 при движении по формообразующей траектории 3, в плоскостях XOZ, YOZ.

В решении задачи геометрического взаимодействия определяющим является расчет координат указанных выше точек и формирование на каждом шаге моделирования нового контура заготовки. Точность определения координат зависит от заданной (или выбранной) дискретности геометрических моделей. При дискретности числовых массивов 0,1 мм, для ускорения работы алгоритма можно, при достаточном гладких контурах, как контуры рабочей поверхности протеза, рекомендовать каждый новый шаг начинать, сдвигая точку начала сравнения контура в сторону формообразования.

Представленная методика применяется при решении задачи геометрического взаимодействия 3D поверхностей. Для создания математической модели процесса срезания припуска можно воспользоваться схемой, представляющей взаимодействие инструмента и заготовки с равномерно расположенным припуском в двух взаимно перпендикулярных сечениях (рис. 2).

Для каждого такого круга по соответствующей схеме взаимодействия в сечении (рис. 2, б) определяются точки пересечения с поверхностью заготовки и рассчитывается длина дуги Li контакта CiDi. Дуга АВ контакта на каждом проходе определяется как дуга окружности радиусом R округления шлифовального круга с припуском, образовавшимся на предыдущем проходе шлифовального круга (положение шлифовального круга на предыдущем проходе показано пунктирной линией на рис. 2, а).

Аналог Q скорости снятия припуска определяется по формуле:

$$Q(\phi, n) = \sum_{i=1}^k 0.5bL(n)_i^2,$$

где n — номер прохода; $k = B_i / b$ — количество цилиндрических кругов, заменяют шлифовальный круг; B_i — ширина шлифовального

Резюме. В рамках данного исследования предлагается новый способ проектирования управляющей программы для модели CAD/CAM, в том числе специальной кинематики формообразования зубных протезов для пациентов как с полной, так и частичной адентией, который заключается в моделировании геометрического взаимодействия рабочей поверхности с инструментом численными методами с использованием преобразованной в трехмерные числовые массивы 3D формы, обрабатываемой в заданной системе координат.

Учитывается форма рабочей поверхности зубного протеза, которая занимает полярный угол около 270° и многопроходность самого процесса шлифования, в котором по технологическим траекториям обязательно будут присутствовать участки холостого движения. По таким траекториям шлифовальный круг (в обратной схеме) должен перейти на соседнюю траекторию формообразования, то есть соседнюю эквидистанту. Обязательным является применение предельного закона управления скоростью срезания припуска для всего цикла шлифования. Поэтому в рамках данного исследования определен и введен алгоритм проектирования для создания автоматической системы контроля точности в программном обеспечении обработки сложной рабочей поверхности зубных протезов.

Ключевые слова: технологии обработки поверхности зубных протезов, модели CAD/CAM, автоматизация изготовления зубных протезов, формообразование зубных протезов.

Concept of CAD/CAM software for processing complex work surfaces of dental prostheses on implants for patients with partial adentia (A.V.Efimin).

Summary. This study proposes a new approach to designing control software for CAD/CAM models, including a special kinematics for shaping the dental prostheses work surfaces for patients with both complete and partial adentia. The approach involves modeling the geometric interaction of the work surface with the tool using numerical methods, utilizing the transformed three-dimensional numerical arrays of the 3D shape processed in a specified coordinate system.

Considering the shape of the dental prosthesis work surface, which occupies a polar angle of about 270° and the multi-pass nature of the grinding process, areas of idle motion will inevitably be present along the technological trajectories. Along such trajectories, the grinding wheel (in reverse mode) must transition to the adjacent shaping trajectory, i.e., the adjacent equidistant. The application of the limit law of cutting speed allowance for the entire grinding cycle is mandatory. Therefore, this study defines and introduces into the design algorithm to create an automatic accuracy control system in the software for processing complex work surfaces of dental prostheses.

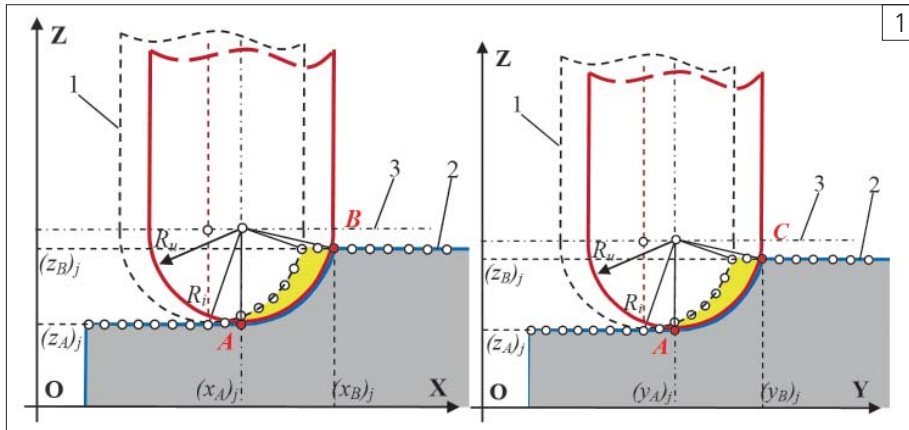


Рис. 1. Геометрическое взаимодействие инструмента с заготовкой в плоскостях XOZ, YOZ

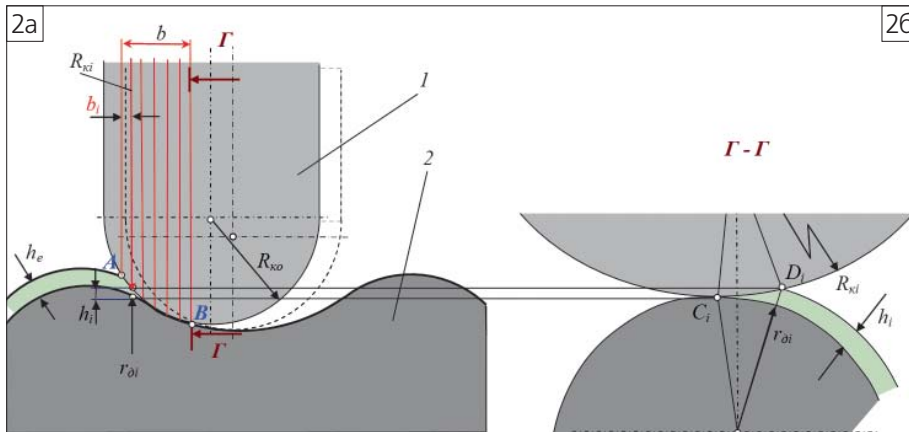


Рис. 2. К определению слоя припуска среза

круга на линии контакта. Остальные обозначения были объяснены выше.

Основной задачей управления процесса фрезерования сложных 3D поверхностей является снятие равномерного объема материала за равные промежутки времени — $MRR = const$ (MRR — *Material Removal Rate*). Это прежде всего позволит:

- стабилизировать процесс резки;
- повысить производительность и уменьшить основное время обработки.

MRR — рассчитывается по следующей зависимости, mm^3 / c :

$$MRR = \omega_c \cdot Q,$$

где ω_c — подача, задающий (рад / с), Q — аналог скорости съема припуска ($mm^2 / рад$), который рассчитывается по формуле (2.8).

В качестве воздействия, которым необходимо управлять для достижения поставленной цели, избрана подача, которая будет функцией от аналога скорости срезания припуска $f_c = f(Q)$ и которая определяется так:

$$f_c = f_{зад} \cdot \frac{[F]}{F},$$

где $f_{зад}$ — заданная подача, $mm / мин$; $[F]$ — допустимая сила резания, которая избирается минимальной из следующих сил резания: допускаемых по мощности станка (F_N), допустимой силы подачи (F_P) и силы, которая ограничивается по прочностью инструмента (F_T):

$$[F] \Rightarrow \min \{F_N, F_P, F_T\}.$$

Сила F резки в зависимости (2.10) может быть определена по следующей формуле:

$$F = \frac{K \cdot Q}{V},$$

где K — удельная сила резания, V — скорость резания, которая рассчитывается по эмпирической зависимости по теории резания с учетом параметров инструмента:

$$V = \frac{C_v D^{q_v} k_v}{T^m H^{p_v} S_z^{b_v} B^{u_v} z^{p_v}}.$$

В зависимости (5) частота вращения — n (об / мин), подача — S_z (мм/зуб), глубина резания — H (мм), период устойчивости — T (мин), диаметр инструмента — D (мм), ширина фрезерования — B (мм), количество зубцов фрезы — z , коэффициенты и показатели эмпирической зависимости скорости резки от режима обработки — $C_v, k_v, x_v, y_v, u_v, q_v, m, p_v$.

Сила резания, которая ограничивается мощностью станка, рассчитывается по следующей формуле (H):

$$F_N = \frac{N \cdot \eta \cdot 6 \cdot 10^4}{V},$$

где N — эффективная мощность станка в кВт, η — коэффициент полезного действия, V — скорость резания, м/мин.

Сила резания, которая ограничивается по прочности инструмента, рассчитывается по формуле:

$$F_{T, P, R_z} = \frac{10 \cdot C_p \cdot H^x \cdot [S_z]^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{мп},$$

где B, H — ширина и глубина фрезерования (мм); D, z — диаметр и количество зубцов фрезы; n — частота вращения фрезы (об/мин); $C_p, x, y, n, q, w, K_{мп}$ — коэффициенты и показатели эмпирической зависимости силы резания от режима обработки.

В свою очередь $[S_z]$ — подача, которая допускается по прочности инструмента, допустимой силы подачи станка и требуемой шероховатости поверхностей, (мм/зуб) рассчитываются по следующим зависимостям:

- подача, что допускается по прочности инструмента:

$$[S_z]_T = C \frac{D^{5.21}}{(Bz\sqrt{kl^2 + D^2})^{1.35} H^{1.16}}.$$

где D, l, z — диаметр; длина вылета и количество зубцов фрезы; B, H — ширина и глубина фрезерования; C, k — эмпирические коэффициенты;

- подача, которая допускается при допустимой силе поводов станка:

$$[S_p]_{доп} = \left(\frac{P_n D^q p_z n^{w_{pz}}}{1.2 C_{pz} H^{x_{pz}} B^{u_{pz}} z^{p_{pz}} k_{pz}} \right)^{\frac{1}{p_z}},$$

где P_n — допустимая сила поводов станка; $x_{pz}, y_{pz}, u_{pz}, v_{pz}, q_{pz}, w_{pz}, C_{pz}, k_{pz}$ — эмпирические коэффициенты.

Моделирование процесса срезания припуска производится по цикловым алгоритмам, укрупненная блок-схема которого показана на рис. 3.

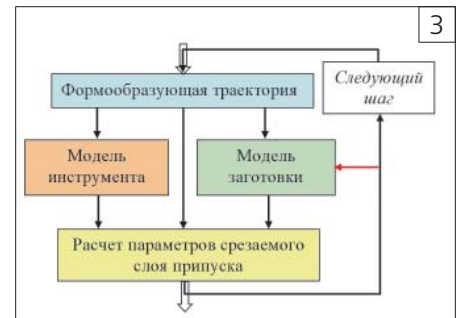


Рис. 3. Алгоритм моделирования срезания припуска при 3D обработке

По представленным математическим зависимостям составляют ядро приложения САМ модуля автоматизированного проектирования управляющих программ для модели CAD/CAM при обработке зубных протезов. В САМ модуле предусмотрено проектирование управляющих программ для следующих операций: фрезерование конечной сферической фрезой, фрезерование конечной цилиндрической фрезой, шлифование кругом, в форме тора. В результате автоматически создается промежуточный файл управления, который обрабатывается модулем постпроцессора. Все процедуры алгоритма построены на использовании численных методов, что делает его универсальным, способным проектировать управляющие программы для любых форм зубных протезов — для пациентов как с полной, так и частичной адентией. Разработанные численные процедуры могут быть встроены в приложение проектирования траекторий формообразующих движений, интерфейс которых показан на рис. 4. Для визуализации полученных результатов была разработана специальная программа, интерфейс которой показан на рис. 5.

Таким образом, доказано, что для формообразования рабочей поверхности зубных протезов для пациентов как с полной, так и частичной адентией достаточно использовать всего три управляющие координаты. Для предварительной обработки, при наличии значительных припусков, следует применять фрезерование, а в случае окончательной обработки и когда зубной протез изготовлен из сверхтвердых материалов, которые не обрабатываются резанием, следует

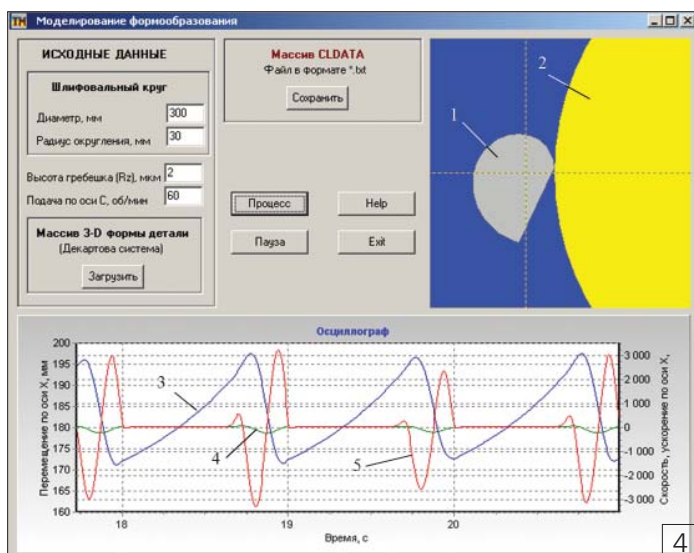


Рис. 4. Интерфейс приложения

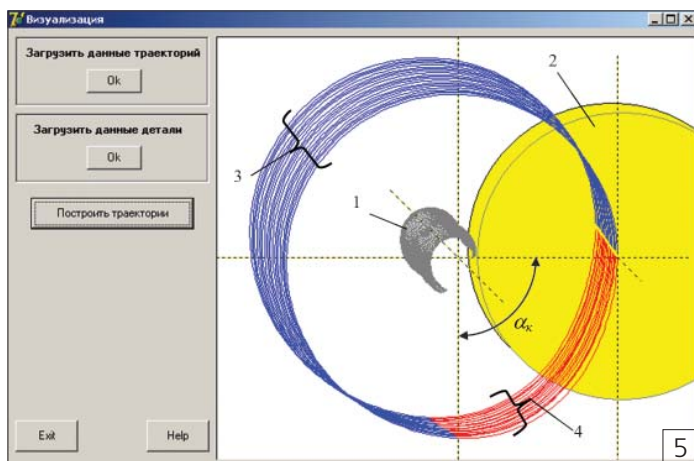


Рис. 5. Траектории формообразующих и холостых движений: 1 - рабочая поверхность зубного протеза; 2 - шлифовальный круг; 3 - траектории формообразующих движений; 4 - траектории холостых движений

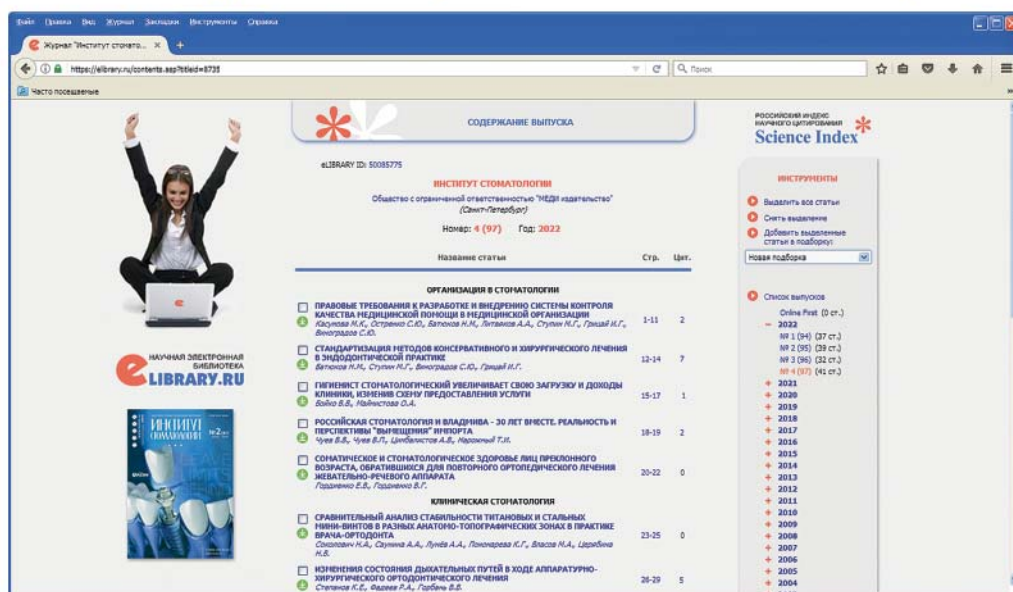
применять шлифование. При фрезеровании необходимо применять новую схему обработки цилиндрической фрезой, которая характеризуется максимальной производительностью обработки.

При преобразовании математической модели рабочей поверхности зубных протезов на имплантатах CAD/CAM, заданной в декартовых координатах, в полярную систему координат в соответствии с технологической схемой формообразования, необходимо включать разработанную методику. Разработана прикладная программа автоматического поиска оптимального положения технологической оси, она доказала, что диапазон изменения угла давления в паре «инструмент—заготовка» может быть снижен более чем в 4 раза за счет его коррекции непосредственно при изготовлении. Использование предложенной методики определения режима бездефектного шлифования позволяет получить одновременно как математическую модель, связывающую глубину дефектного слоя с составными режимами резания, так и связь с комплексным показателем интенсивности процесса шлифования — скоростью срезания припуска — объективно отражает реальный процесс резания при шлифовании сложных поверхностей, к которым относится рабочая поверхность зубных протезов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Bi Y, Wu S, Zhao Y, et al. A new method for fabricating orbital prosthesis with a CAD/CAM negative mold. J Prosthet Dentistry 2013;110:424-8.
2. Bidra AS, Taylor TD, Agar JR. Computer-aided technology for fabricating complete dentures: systematic review of historical background, current status, and future perspectives. J Prosthet Dentistry 2013;109:361-6.
3. Cantu AG, et al. Detecting caries lesions of different radiographic extension on bitewing images using deep learning. J Dent. 2020;100:103425.
4. Grischke J, Johannsmeier L, Eich L, Griga L, Haddadin S. Dentronics: towards robotics and artificial intelligence in dentistry. Dent Mater. 2020;36:765-78.
5. Han, Wei L. Metal. Design and fabrication of complete dentures using CAD/CAM technology. Medicine 96(1):p e5435, January 2017.
6. Harb, Islam et al. (2023). Applications and performance of artificial intelligence models in removable prosthodontics: Journal of Prosthetic Research. 10.2186/jpr.JPR_D_23_00073.
7. Infante L, Yilmaz B, McGlumphy E, et al. Fabricating complete dentures with CAD/CAM technology. J Prosthet Dentistry 2014;111:351-5.
8. Kositbowornchai S, Plermkamom S, Tangkosal T. Performance of an artificial neural network for vertical root fracture detection: an ex vivo study. Dent Traumatol. 2013;29:151-5.
9. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Commun ACM. 2017;60:84-90.
10. Li S, Liu J, Zhou Z, Zhou Z, Wu X, Li Y, et al. Artificial intelligence for caries and periapical periodontitis detection. J Dent. 2022;122:104107.
11. Mertens S, Krois J, Cantu AG, Arsiwalla LT, Schwendicke F. Artificial intelligence for caries detection: randomized trial. J Dent. 2021;115:103849.
12. Tian S, Wang M, Dai N, Ma H, Li L, Fiorenza L, et al. DCPR-GAN: dental crown prostheses restoration using two-stage generative adversarial networks. IEEE J Biomed Health Inform. 2022;26:151-60.

Научно-практический журнал "Институт Стоматологии" на сайте <https://elibrary.ru/>



Электронные версии статей журнала "Институт Стоматологии": <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=8735>