

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
МАШИННО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра: "Технология на машиностроенето и металоорежещи
машини"

маг. инж. Виктор Крумов Митов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА БЪРЗО
ИЗГРАЖДАНЕ НА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ

АВТОРЕФЕРАТ

НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И НАУЧНА
СТЕПЕН "ДОКТОР"

Професионално
направление:

5.1 "Машинно инженерство"

Научна
специалност:

**"Динамика, якост и надеждност на
машините, уредите, апаратите и
системите"**

Научен
ръководител:

проф. доц. д-р Георги Димитров Тодоров
доц. д.т.н. инж. мат. Николай Николов

Рецензенти:

проф. д-р инж. Петър Иванов Хаджийски
проф. д-р инж. Веселин Илиев Павлов

СОФИЯ, 2015 г.

Дисертационния труд е обсъден и насочен за защита от катедра "Теория на механизмите и машините" при Технически Университет – София на заседание на катедрен съвет, състоял се на 16.12.2014 г. с протокол № 3.

Изследванията от дисертационния труд са извършени в лаборатория „CAD/CAM/CAE в Индустрията“ при ТУ-София.

Номерата на формулите, фигурите, таблиците и цитираната литература в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

Дисертационният труд е в общ обем от 247 страници от които 209 страници основен текст, съдържащ 120 фигури, 14 таблици и списък на използваните 119 литературни източници и 38 страници в 1 приложение.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 13.05.2015 г. от 17,30 ч. в зала 2140 на Технически Университет – София на открито заседание на журито, определено със Заповед на Ректора на ТУ-София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно-технологичен факултет на Технически Университет – София, стая 3230.

Автор: Виктор Крумов Митов

Заглавие: Изследване на технологиите за бързо изграждане на дентални импланти

Тираж: 50 бр.

Печатна база на ТУ-София

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Направен е задълбочен исторически преглед на развитието на денталните технологии до настоящия момент, като са изтъкнати и техните специфични проблеми, обяснена е необходимостта от възникването на новите иновативни подходи – използването на специализирани CAD/CAM софтуерни системи. С тяхна помощ конструирането и производството на импланти, са поставени на функционално ново ниво, което няма аналог в сравнение със съществуващите до настоящия момент способности. Направен е обобщен преглед на по-известните дентални CAD/CAM пакети. Представено въведение в индустриалните технологии за бързо изграждане на дентални импланти, работещи с добавяне на материал. Разгледани са основните технологични подходи, обяснен е техният принцип на работа, посочени са техните технологични предимства и недостатъци. Формиран избор на типа технология, който се използва за целите на изследването, а именно технологията селективно лазерно разтопяване. Проектирани са и са създадени различни по тип зъбни импланти, като е използван специализиран дентален CAD пакет EXOCAD. Представена е методиката при изграждане на зъбен имплант тип тричленна мостова конструкция и носеща вложка тип „кепе“. Подробно са описани отделните етапи в технологията. В CAD системата е извършено сложно тримерно моделиране на постъпилата от 3D скенер информация, с цел създаването на дентални импланти „мост“ и „кепе“. След това, с помощта на софтуерния продукт AutoFab, е формирана управляваща програма за тяхното изработване на машина работеща по технология за бързо изграждане с добавяне на материал.

Разработена е методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти, която доказва синхронизирания подход за работа чрез използването на различни технологии: 3D сканиране, формиране на виртуално копие на сканирания обект, създаване на негова база в специализиран дентален CAD пакет на 3D модел на импланта, създаване на управляваща програма и изработване с прототипираща машина по технологията SLM. Подробно показан технологичния подход и е формирана методиката за алтернативно създаване на дентални импланти посредством технология работеща с отнемане на материал (фрезозване). По моделираната тримерна структура на дентални импланти в CAD пакет са създадени в специализиран CAM пакет SUM3Dental цифрови програми за фрезозване. Процесът е верифициран за грешки и колизии, извършено е постпроцесиране и денталните импланти са произведени на 5 осна цифрова фреза от различни типове материали – цирконий, техническо восък и хром-кобалт.

Направен е подробен анализ на три и пет осните стратегии за цифрова обработка. Изтъкнати са предимствата и недостатъците им. Формиран е обоснован избор на използвания в това изследване начин на работа. Направен подробен анализ на дентални импланти получени чрез различни технологии, като са извършени точни замервания за геометрична точност и отклонения от формата. Разработената методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти е апробирана за проектиране и изработване на стоматологични импланти за различни типове технологии с добавяне на материал и с отнемане на материал, посредством използването на различни специализирани дентални CAD/CAM софтуерни системи.

АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА

Дисертационният труд е насочен към областта на проектиране и изграждане на дентални импланти посредством прилагането на машиностроителни способности и технологии с цел получаването на високоточни стоматологични импланти с морфологична форма.

Към настоящия момент състоянието на пазара на дентални технологии (в България) е незадоволително. Болшинството от фирмите работещи в сферата на зъботехниката използват морално остаряли, ниско производителни, слабо ефективни методи, предимно свързани с почти изцяло ръчна работа, а в повечето случаи ръчният труд е скъп и не особено точен. Когато се поръчва корона/мост обикновено се чакат повече от десетина дни за изпълнение, пациента изпитва естетически проблеми до като чака, след това отново се отива при стоматолог за проба, обикновено корона/мост се връщат за доработка, после има доста ръчна работа на стоматолога по напасване и монтаж.

Целта е да се създаде и развитие иновативна гъвкаво конфигурируема технология за създаване на дентални импланти изградена от сканираща системи, тримерна CAD система за подготовка на геометрията на имплантите на база на сканираните отпечатъци от пациента, САМ обработка и подготовка на имплантите за обработване, обработващ център за високоскоростно обработване на различни специализирани материали, и други компоненти, които ще позволяват бързо проектиране и изработване на специфични за пациента зъбни импланти, което ще подобри съществено качеството на имплантите в сравнение с конвенционалните способи на производство и ще повиши достъпа на пациентите до тази услуга поради намалената себестойност спрямо пазарната към момента.

НАУЧНА НОВОСТ

1) Анализирани са съществуващите индустриални технологии за бързо изграждане на дентални импланти работещи с добавяне на материал. Направен е обоснован избор на две алтернативни иновативни технологии (извън конвенционалната) за изграждане на зъбни импланти.

2) Разработена е методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти чрез използването на различни технологии: 3D сканиране, формиране на виртуално копие на сканирания обект, създаване на негова база в специализиран дентален CAD пакет 3D модел на импланта, създаване на управляваща програма и изработване с прототипираща машина по технологията SLM.

ПРАКТИЧЕСКА ПРИЛОЖИМОСТ

1) Направен е подробен анализ на иновативната технология селективно лазерно разтопяване - selective laser melting (SLM), като същата е пригодена за практическите цели и нужди на дентологията. С нея са създадени дентални импланти с добри физико-механични и точносни показатели.

2) Разработената методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти е апробирана за проектиране и изработване на стоматологични импланти за различни типове технологии с добавяне на материал и с отнемане на материал, посредством използването на различни специализирани дентални CAD/CAM софтуерни системи.

3) Доказано е експериментално, че с помощта на 5 основно фрезозване се получава по-добро качество на обработените повърхнини, защото се избягва недостатъка на три-осните машини с невъзможността за динамично поддържане на ъгъла между оста на инструмента и нормалата към повърхнината в точката на контакта, което е особено значимо при комплексните форми на имплантите. Именно с помощта на 5 основно фрезозване са изработени денталните импланти посредством метода на отнемане на материал.

4) Чрез проведените експерименти е доказано, че мостовите конструкции, които са създадени с помощта на прототипирани дуближни модели, са със значително по-висока точност по отношение на форма и размери в сравнение с мостовете, изработени по конвенционалните методи посредством направата на восъчни модели от силиконов ключ.

5) Адекватността и приложимостта за практически цели на създадената методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти е апробирана и валидирана в множество от реално изградени модели на дентални импланти.

РЕАЛИЗИРАНЕ НА РАБОТАТА

Изследванията по дисертацията са извършени в лаборатория "CAD/CAM/CAE в индустрията" към МТФ на ТУ-София, като част от изследванията са осъществени със съдействието на Фраухофер Институт Германия, Чим Систем Италия, Роланд Япония, Атлас Диджитал Гърция и Циркон Център - София България.

ОДОБРЯВАНЕ НА РАБОТАТА

Дисертационната работа е докладвана частично и цялостно пред катедра " Теория на механизмите и машините".

ПУБЛИКУВАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Съществените резултати получени при разработване на дисертацията са докладвани на следните конференции и семинари:

- Международна научна конференция AMTEX 2012 г., 27-ма;
- Международна конференция по роботика, автоматизация и мехатроника, РАМ 2012 г. 15 октомври;

СТРУКТУРА И ОБЕМ

Дисертационният труд е в общ обем от 247 страници от които 209 страници основен текст, съдържащ 120 фигури, 14 таблици и списък на използваните 119 литературни източници и 38 страници в 1 приложение. Работата е разделена на 5 глави, в които се изпълняват формулираните задачи.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Глава1. ЛИТЕРАТУРНО ПРОУЧВАНЕ / СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Глава 1, озаглавена „Литературно проучване. Състояние на проблема“ започва с формулиране на целта на дисертацията и задачите, които са решени за постигането ѝ. Направен е задълбочен исторически преглед на развитието на денталните технологии до настоящия момент. Последните са разгледани в дълбочина, като са изтъкнати и техните специфични проблеми, обяснена е необходимостта от възникването на новите иновативни подходи – използването на специализирани CAD/CAM софтуерни системи. С тяхна помощ конструирането и производството на импланти, са поставени на функционално ново ниво, което няма аналог в сравнение със съществуващите до настоящия момент способности. Направен е обобщен преглед на по-известните дентални CAD/CAM пакети.

Формиран е обоснован избор на CAD и CAM системи, с чиято помощ е извършено настоящето изследване. Това са Exocad за CAD и SUM3Dental за CAM.

Разгледани са и новите материали, от които се изработват дентални импланти. Особено внимание е обърнато на новите прогресивни материали, сред които се откроява циркониевия оксид, а така също хром-кобалтовите и титаниеви сплави.

Изводи

1. *Към настоящия момент има добро развитие на класическите технологии за конструиране и изработване на дентални импланти. Те са ниско производителни и слабо ефективни, свързани са с почти изцяло ръчна работа, а в повечето случаи ръчният труд е скъп и не особено точен. Поради факта, че те се основават изключително на занаятчийски способности и зависят от субективния фактор, са свързани с консумирането на много време и отклонения от желаната форма и геометрична точност.*

2. *В последните години се използват нови, биосъвместими материали, сред които се откроява циркония.*

3. *Забелязва се навлизане на нови прогресивни технологии базирани на CAD/CAM. Има широк набор от специализирани стоматологични софтуерни системи за тримерно конструиране и производство. Налице са и специализирани 3D скенери и машини за SLM. Възможно е постигане на голяма бързина на изпълнение, на анатомична уникалност на всеки елемент, на отлична геометрична точност.*

4. *В рамките на направеното литературно проучване не беше намерено в ясен вид приложимо изследване на технологиите за бързо изграждане на дентални импланти.*

5. Не са установени начини за използване на машината за бързо изграждане на модели, работеща посредством технологията селективно лазерно разтопяване – SLM 125, за дентални цели.

6. Не бяха открити ясно формулирани количествени сравнения между 3 и 5 осните фрезови обработки и защо последните са предпочитан избор за изработването на дентални импланти.

7. Съществуват три технологични подхода за създаване на дентални импланти:

- чрез добавяне на материал (бързо изграждане);
- чрез отнемане на материал (фрезование);
- чрез леене по стопяеми модели;

Цел и задачи на разработката

Въз основа на направеният анализ на състоянието на разглежданият проблем и на така описаните по-горе изводи, е формулирана следната цел на дисертационната работа:

ДА СЕ ИЗСЛЕДВАТ ПРОЦЕСИТЕ СВЪРЗАНИ С ИЗГОТВЯНЕ НА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ (ПРОТЕЗИ, МОСТОВЕ, НОСЕЩИ ВЛОЖКИ) ЧРЕЗ ИНОВАТИВНИ ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ И ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ИЗРАБОТВАНЕ С CAD/CAM РЕШЕНИЯ.

От така определената цел произтичат следните основни задачи:

Задача № 1: Да се анализират съществуващите индустриални технологии за бързо изграждане на дентални импланти работещи с добавяне на материал. Да се направи избор на технология за изграждане на зъбни импланти.

Задача № 2: Да се проектират и създадат зъбни импланти по технология за бързо изграждане с добавяне на материал с помощта на специализиран дентален CAD пакет.

Задача № 3: Да се изработят проектираните зъбни импланти алтернативно по технология с отнемане на материал с помощта на специализиран дентален CAM пакет. Да се направи паралел между 3 и 5 осните стратегии за цифрова обработка.

Задача № 4: Да се направи сравнителен анализ на получените по различни технологии тестови образци на дентални импланти.

Глава 2. ДА СЕ АНАЛИЗИРАТ СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА БЪРЗО ИЗГРАЖДАНЕ НА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ РАБОТЕЩИ С ДОБАВЯНЕ НА МАТЕРИАЛ. ДА СЕ НАПРАВИ ИЗБОР НА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ЗЪБНИ ИМПЛАНТИ.

Въведение в индустриалните технологии за бързо изграждане работещи с добавяне на материал

Съществуват различни технологии за бързо прототипиране чрез добавяне на материал като при всички тях се използва следната обща методика:

Наличие на тримерен компютърен модел на бъдещия детайл (от специализиран CAD пакет);

- Трансфер на този файл в. STL формат;
- Обработване на геометрията на повърхнината на модела до получаване на желаната форма;
- Въвеждане на модела в специализиран софтуер за съответната машина;
- Определяне на ориентацията на модела в пространството на машината;
- Генериране на поддържаща структура, ако е необходимо;
- Разделяне на модела на слоеве с определена дебелина;
- Изграждане на модела;
- Процес на „изграждане“;

Описание на основните индустриални технологии за бързо изграждане работещи с добавяне на материал:

Съществуват много технологии, повечето от които ще бъдат изброени по-долу:
Селективно лазерно разтопяване (SLM – Selective Laser Melting, DMLS – Direct Metal Laser Sintering);
Стереолитография (SLA – Stereo Lithography);
Тримерно отпечатване (3D принтиране);
Многоструйна технология;
Наслявяване на листов материал (LOM – Laminated Object Manufacturing);
Повърхностно втвърдяване (Solid Ground Curing);
Мастилено-струйна технология (Inkjet);
Отлагане на разтопен материал. (FDM - Fused Deposition Modeling);
Получаване на „оребрени“, напълно функционални детайли чрез лазерно обработване – (L.E.N.S. – Laser Engineered Net Shaping);

Селективно лазерно разтопяване

Селективно лазерно разтопяване (SLM – Selective Laser Melting), е метод, при който се използва разтопяване на прахообразен материал от лазерен лъч, с цел получаване на метален детайл с практически неограничено сложна форма. Представлява сложен термо-физически процес и определянето на неговите параметри е от особена важност за постигането на висока прецизност. Това е адитивен производствен процес разработен от Fraunhofer Institute ILT, Аахен, Германия - през 1995 г., при който от виртуален тримерен цифров модел се създава физически прототип - еквивалент, чрез топене на метален прах от високо енергиен лазерен лъч (най-често това е итербиев лазер). Плътността и интензитета на лазерния лъч са различни за всеки различен вид прахообразен материал, който ще се използва и правилността на тази настройка определя до голяма степен качеството на получения имплант. Това е енергията, която лазерния лъч упражнява върху единица обем от материала. Други параметри, от които зависи (освен от типа на материала), са и дебелината на изграждания слой (той е равен на диаметралния конгуларен размер на зърната, формиращи прахообразния материал; те са стандартизирани: 20, 30, 40, 50 микрона), скоростта на сканиране на лъча по контура на слоя, времето за сканиране на контура на слоя; скоростта на топене на материала:

$$E_{\text{density}} = \frac{P_{\text{laser}}}{V_{\text{scan}} * S_{\text{hatching}} * t_{\text{layer}}}, \quad \text{където}$$

E_{density} – енергийна плътност;
 P_{laser} – енергията на лазера;
 V_{scan} - скорост на сканиране на лъча по контура на слоя;
 S_{hatching} – площта на слоя;
 t_{layer} – времето за обхождане дължината на контура на слоя;

Принципна компоновка на машината е представена на Фиг. 1. Първоначално валакът 4 разпределя равномерно слой прахообразен материал 2 върху работната маса на бункера 6. Дебелината на слоя е равна на дебелината на един слой от изграждания модел 1. След това лазерният лъч 5 разтапя първото напречно сечение на модела, като бива позициониран в равнината XY от огледалото 10. Когато отпечатването на първото напречно сечение приключи, работната маса на бункер 6 се премества надолу на стъпка, равна на дебелината на един слой от модела.

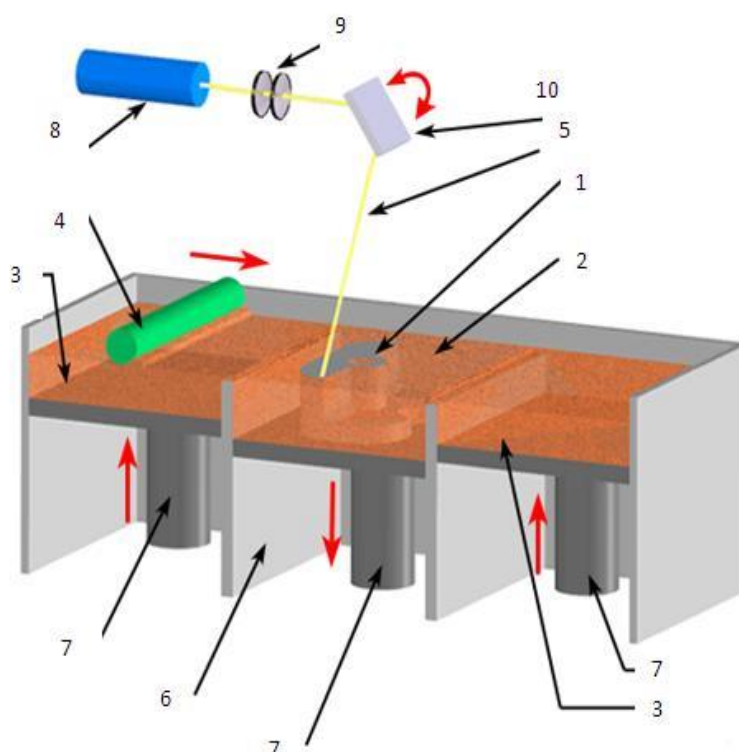
В същото време масата на един от бункерите за съхранение на прахообразен материал се издига нагоре на същата стъпка. След това валакът разпределя нов слой материал от захранващия бункер към този, в който се изгражда модела. Следва

разтапяне на ново напречно сечение. Така процесът се повтаря до завършване на модела.

Предимствата и недостатъците на процеса са представени в Таблица 1.

Таблица 1 Предимства и недостатъци на селективното лазерно разтопяване

Предимства	Недостатъци
Поддържащата структура е от същия материал; Без необходимост от следващо довърдяване на модела; Работа с разнообразие от материали; Висока точност по X и Y; Възможност за изработване на напълно функционални детайли;	Висока грапавост на повърхнините на модела в сравнение със стереолитографията;



Фиг. 1 Работна зона на машините, работещи по този метод: 1 – Изграждан модел; 2 – Прахообразен материал; 3 – Бункери за хранване с прахообразен материал; 4 – Валяк, разпределящ равномерно прахообразния материал; 5 – Лазерен лъч; 6 – Бункер, в който се изгражда модела; 7 – Бутала, движещи се по Z; 8 – Лазерен източник; 9 – Леци; 10 – Огледало, направляващо лъча по X и Y.

Със селективното лазерно разтопяване се получават импланти с най-точна форма и с най-близки физически характеристики до тези, получени по конвенционалните методи. Като най-точна и прогресивна за дентални цели е технологията селективно лазерно разтопяване.

Изводи

1. Единствено технологията селективно лазерно разтопяване от съществуващите индустриални технологии за бързо изграждане, работи с метали и сплави, което я прави особено подходяща за дентални цели. При останалите технологични подходи се постига усъвършенстване на традиционните методи, а именно на леенето чрез стопяеми модели, защото самият стопяем модел може да бъде изработен чрез методите на директно изграждане от технически восък.

2. Като най-точна и прогресивна за дентални цели е технологията селективно лазерно разтопяване, защото се получават крайни изделия – дентални импланти, с комплексна морфологична геометрия.

Глава3. ПРОЕКТИРАНЕ И СЪЗДАВАНЕ НА ЗЪБНИ ИМПЛАНТИ ПО ТЕХНОЛОГИЯ ЗА БЪРЗО ИЗГРАЖДАНЕ С ДОБАВЯНЕ НА МАТЕРИАЛ С ПОМОЩТА НА СПЕЦИАЛИЗИРАН ДЕНТАЛЕН CAD ПАКЕТ.

Методика при изграждане на зъбен имплант тип „мост“

Представеното изграждане на зъбен имплант тип „мост“ чрез селективно лазерно разтопяване е разделено на следните стъпки:

1. Наличие на тримерен компютърен модел (от специализиран дентален CAD софтуерен пакет);
2. Създаване на управляваща програма за машина SLM 125 HL, работеща по метода „Селективно лазерно разтопяване“;
3. Създаване на експериментална серия с промяна на параметрите на изграждане на детайла, с цел получаване на качествен имплант;
4. Установяване на оптималните параметри за получаване на висококачествени импланти.

За да се създаде удачна технология за изготвяне на управляваща програма и режими да машината, с цел изработване на денталните импланти, се формира експериментална серия от опитни образци. Променливите параметри в експерименталната серия са:

- Скорост на обхождане на външния контур на слоя от лазерния лъч, означена с v ;
- Време за нагряване на слоя, означено с t ;

Моделът бива преобразуван във формат STL (Standard Tessellation Language).

За да се създаде управляваща програма за SLM машината, работеща по метода на добавяне на материал, а именно - директно метално разтопяване, е необходимо да се конструира във виртуален тримерен вид модел на съответния стоматологичен имплант. Това се осъществява в средата на специализирания CAD дентал софтуерен инструментариум, наречен EXOCAD.

Създаване на тримерна геометрия на зъбен имплант тип „мост“ в EXOCAD

Работата започва с формиране на задание за изпълнение в работната среда на EXOCAD, при което се указва какъв тип дентален имплант ще се конструира (мост, корона, инлеи и т.н.) и с какъв материал ще бъде изработен после физическия имплант. Следва вмъкване на виртуалния модел получен от 3D скенера. В конкретния случай това е тричленна мостова конструкция на премодуларни зъби, показани на изображение **Error! Reference source not found.**, която ще се поставя на мандибулата. Импортира се сканирания модел, който идва във вид на STL файл. Това зарежда съответния готов шаблон за работа.

CAD софтуера използва база данни, основаващи се на хиляди естествени зъби. Основните структури на един зъб, като върхове на туберкули, склонове на туберкули, маргинални гребени и фисури, дават схема за компютърно определяне на средностатистическия зъб. Разликата между него и сканираните референтни зъби е

началото за компютърното изчисление. Извършените анализи показват, че са нужни 20 точки, за да се опише 83% от вариантноста на естествените зъбни повърхнини. Тези математически изчисления на зъбната морфология предсказват как изглежда зъба в интактно състояние. Задават се точните позиции и граници от съответните части на моста като двата крайни премодуларни импланта ще се захванат посредством абатменти, а те самите са хванати директно с по един винт, който е монтиран в костта. Започва се с имплант за позиция № 36, а след това и за позиция № 34.

С избора на номер на зъб, се уточнява коя база от данни ще се използва за изчисленията. С правилния избор се генерира зъб, с необходимата анатомия.

Избран е материал цирконий. Системата автоматично зарежда библиотеката с материали и дава точни указания за най-важните параметри на посочения материал: в случая това са свиване 0,8 mm, минимално допустима дебелина на формата от 0,6 mm и ниша оставена за последващо циментиране с дебелина от 0,08 mm. Всички тези стойности подлежат на манипулация, но тя се налага в редки специализирани случаи. Оставят се препоръчаните стойности. Следват логически подредени стъпки, в зависимост от заредения за работа шаблон. При използването на керамика, както в случая с циркония, е показано ясно, че промените извършени в конструкцията на модела, намаляват физическите напрежения и увеличават издръжливостта на импланта. Ето защо правилното моделиране на импланта се явява от особена важност.

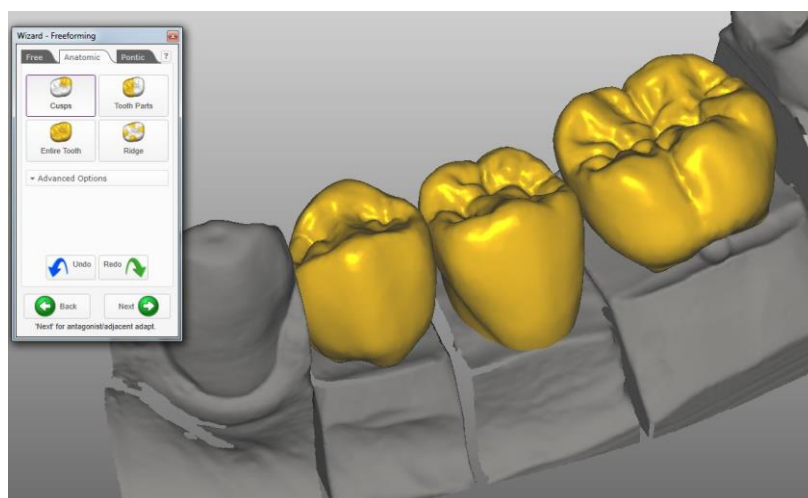
Задава се разстояние от 0,08 mm между импланта и гингивата. Има много публикации, които проучват и описват методите за измерване на точността на импланта и нивата на маргинално отстояние. Задават се, ако е необходимо, и толерансите по границата на контура, както и подрязванията (undercuts). Последните имат отношение само, ако елементът ще бъде изработен чрез отнемане на материал – фрезозане - **Error! Reference source not found.**

Постигането на правилната форма, която е уникална за всеки един подобен елемент, е от ключова важност за постигането на правилна препарация.

Извършват се следните настройки съобразно зъботехническите указания за изработване на мост, които се отнасят до формирането на границата на конструкцията с мандибуларната гингива. Хоризонтално отстояние 0,2 mm, катет 0,3 mm наклонен под ъгъл от 60°.

Автоматично се извършва настройка на адаптирането на формата на конструкцията към гингивата.

При следващата стъпка се генерира автоматичен тримерен модел на мостовата конструкция с анатомична форма. В случай на не-добра геометрия, то последната може да се моделира, така че да се получи геометрична форма без остри ръбове, без надвесени участъци и т.н, както е показано на Фиг. 2.



Фиг. 2 Дооформяне на геометричната форма

Следва указване за оклузалното разстояние до съседните зъби на конструкцията. В случая се избира стойността по подразбиране - нула, т.е. те да са в контакт. Това ще придаде здравина на конструкцията, която ще бъде допълнително подсилена. Може да се укаже и разстоянието до антагонистите, ако последните също са сканирани. Тук разстояние не се задава, защото липсва информация за последните (антагонистите). На следваща стъпка се създава контакта между трите отделни елемента, за да се формира денталната мостова конструкция (т. нар. пинове). Подбира се формата на образуващите, включително динамично чрез ръчно манипулиране и настройване. Ако в някоя зона се получи по-голямо изтъняване, от заложеното за този материал, продукта автоматично дава информация за проблемния участък, като го оцветява в червено.

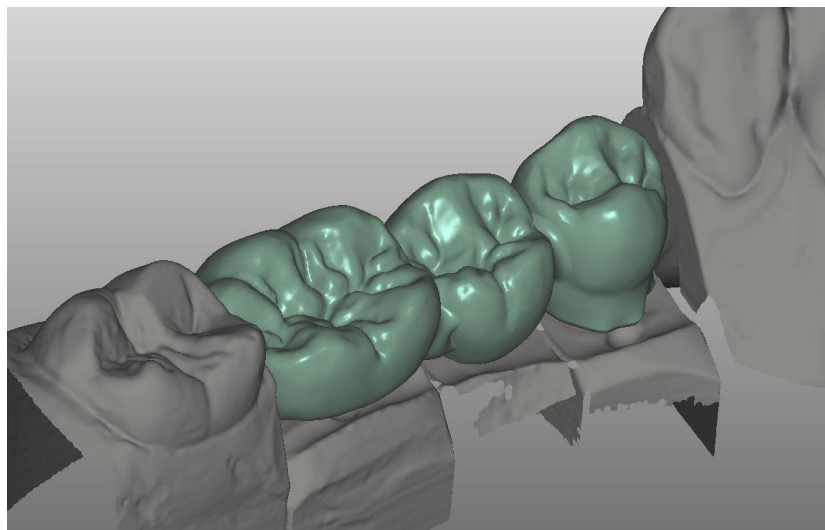
По нататък се извършва свиването на геометрията на основата на подбрания в стъпка 1 материал, ако конструкцията ще послужи за последващо обличане с керамика. Процента на свиване е математически заложен в програмата и е в пряка зависимост от типа на материал на денталния имплант, както и от неговите габаритни размери. EXOCAD автоматично го мащабира така, че модела да послужи за точна основа, при последваща работа с керамика върху него. В конкретно разглеждания случай модела няма да бъде обличан с керамика, поради което се избира да не се прилага коефициент на свиване. Следва избор за пресмятане на финалния вид на денталния модел, в зависимост от начина, по който ще бъде изработена физически – на фрезова машина с ЦПУ или на SLM машина. Оптимизация се налага, защото при използване на директно лазерно топене омреженият виртуален модел трябва да бъде добре построен, което ще рече да избягва следните дефекти:

- ✓ Обърнати нормали;
- ✓ Несъвпадащи ръбове;
- ✓ Разделяне на черупката;
- ✓ Препокриващи се триъгълници;
- ✓ Пресичащи се триъгълници;
- ✓ Да няма отвори;
- ✓ Да няма отворени ръбове по геометричната форма;

Моделът е с материал цирконий и за това се избира оптимизация за фрезоване. Това ще послужи за целите и нуждите на Глава № 4.

Тук, за да може модела да се използва за SLM цели, се започва с връщане в стъпка 1 и промяна на материала и крайна оптимизация за директно метално изграждане.

На Фиг. 3 е показан финалния вид на конструкцията. С това завършва работата в специализирания CAD дентален софтуерен пакет EXOCAD. Следващите етапи са свързани с механизма на изработване на физически прототипи на тази дентална конструкция тип „мост“ чрез различни технологични подходи, описани в следващите глави.



Фиг. 3 Готова дентална конструкция тип „мост“

Подготовка на модела за изграждане. Операции в AutoFab

В тази стъпка започва подготовката на модела за създаване на неговия материален еквивалент. Използва се софтуерът AutoFab 1.6 на компанията „Marcam Engineering”.

AutoFab представлява софтуерен продукт, специализиран за производството на метални изделия чрез лазерно синтероване и разтапяне. Тук, по геометрията на модела, се генерира управляваща програма, като се спазва последователността, описана в следващите подглави.

Проверка и поправяне на геометрията

Преди да бъде „нарязан” на слоеве, CAD моделът трябва да бъде във вид на затворен обем и да няма налични дефекти по геометрията. Ето защо първо се извършва проверка на наличната 3D геометрия. Дори най-малките пролуки в модела, могат да причинят дефект в геометрията на слоя по време на обработка, от машината.

След зареждане на STL-файла, софтуерът проверява за дефекти в геометрията и при необходимост предлага автоматично поправяне на същите. Ако дефектите не могат да бъдат поправени автоматично, то следва да се отиде в група „поправяне на дефектите (repair defects)” и същите да бъдат отстранени ръчно.

След направената проверка на геометрията се вижда, че единственият открит дефект е разделяне на черупковите елементи. В настоящите случаи този дефект е допустим и не оказва влияние на по-нататъшната работа. При наличие на дефекти от по-горе изброените е необходимо, те да бъдат премахнати с командите от менюто „Премахване на дефекти (repair defects)”, където са налице инструментариум и методики, според конкретната ситуация. В софтуера има готови алгоритми с последователност от математични модели за ускоряване и автоматично поправяне на недостатъците в геометрията. В повечето случаи те се оказват напълно достатъчни. При наличие на годин модел се преминава към следващия етап. Стартира се разделът „Детайл” (part).

Ориентиране посоката на слоевете на модела

Тук моделът се ориентира спрямо работната платформа.

При SLM техниката горните повърхнини имат малка грапавост и висока точност. Долните повърхнини, както и засенчените участъци, се характеризират с не добро качество, защото лазерният лъч прониква по-дълбоко в прахообразния материал и не успява да стопи така добре. Ето защо, за постигането на високи резултати на изграждания имплант, от особена важност се явява неговата правилна ориентация, нещо, на което е обърнато специално внимание. Избира се спрямо коя равнина моделът да бъде разположен. Посочва се долната повърхнина, защото тя ще представлява равнината на работната платформа на машината. Ориентирането на посоката на слоевете на модела може да стане автоматично или ръчно. Избира се автоматично ориентиране. Модела се разполага по ос Z така, че той да е с най-малка височина и без да е спазено изискването за това, най-тежката половина - да е отдолу. При този вариант ще са необходими най-малко слоеве и съответно прахообразен материал, за да се изгради детайлът. Тук ще е нужна повече поддържаща структура, която след края на работния процес, ще трябва да се отстрани.

Най-важното преимущество на този вариант е, че долната половина от модела е разположена така, че тя да бъде и долната част на зъба. А тя е с най-проста геометрия. Представлява равнинна повърхнина, по която импланта се установява за венеца. При бъдещото отстраняване на поддържащата структура, тази равнина може лесно да се възстанови. С настоящия експеримент се цели да се изработи качествен зъбен имплант по отношение на неговата геометрия. Поради тази причина най-подходящ вариант за разположението на модела спрямо работната платформа, респективно разположението на слоевете е Вариант 3. В главното меню, показано на **Error! Reference source not found.** и **Error! Reference source not found.** се вижда възможността моделът да се завърти на

някакъв ъгъл спрямо осите X или Y. В настоящия случай това не се прави, защото моделът е построен така, че долната равнинна повърхнина да е перпендикулярна на оста Z.

При това ориентиране мостът ще се изгради в работно положение, перпендикулярно на оста Z.

Основната геометрия на зъбите ще бъде запазена, защото върху нея няма да има поддържаща структура и границите на слоевете ще са перпендикулярни на оста Z.

Отпечатъкът върху работната платформа ще е сравнително голям, но геометрията на зъба ще бъде запазена, защото няма да се налага да се изгражда поддържаща структура върху повърхнините със сложна форма.

Моделът бива превърнат от повърхнинен в плътен. Има възможност, да се избере дебелина на външната или на вътрешната черупка. Избира се, външна черупка с дебелина 1 mm.

Съществува възможност вътрешността на модела да бъде също разтопена, но това би довело до повишаване времето за изграждане на детайла и нарастване вероятността за грешки от термични деформации. За целите на настоящето изследване е по-важно да се следи за качеството на външната геометрия като вътрешността на зъбния мост няма да бъде обработена.

За вътрешността на модела, се избира същата да бъде куха. По този начин, само дебелината на черупката ще бъде разтопена, а вътрешността необработена. Това става като в падащото меню на „тип на вътрешността (core type)“ се избере „кух (Hollow)“.

За настоящия случай се избира средна точност с отклонение ± 0.8 mm;

За целта от падащото меню „точност (Accuracy)“ се избира „средна (Average)“.

След като всички настройки са завършени се натиска бутон „изчисли (calculate)“. Моделът вече е преобразуван от повърхнинен в твърдотелен черупков.

Има възможност за създаване на структури в кухата част на детайла. Това се прави, с цел намаляване на теглото при плътни детайли.

В конкретния случай моделът се състои от черупка с плътна стена. Отвътре моделът е кух и съответно там ще остане прахообразен материал, който няма да бъде разтопен или синтерован.

Тази стратегия се предприема, когато бъдещият детайл има нужда от механична обработка след отпечатване. Задачата на настоящия експеримент цели да се доближи максимално до оригиналната геометрия на модела, само чрез послойно лазерно разтапяне, и на този етап не се предвижда технологична прибавка.

Когато моделът бива ориентиран спрямо изграждащата платформа, идва ред и на генерирането на поддържащата структура. Както е споменато по-горе, тя зависи от разположението на детайла и може да се генерира както автоматично, така и ръчно.

Поддържащата структура в SLM – технологията има следните основни функции:

- Поддържане на надвисналите засенчени части на модела;
- Закрепване на модела върху работната платформа;
- Топлоудвеждане от модела към платформата. Това спомага за по-бързото охлаждане на модела и съответно намаляване на термичните деформации;

Избрано е разположение в зона със следните параметри:

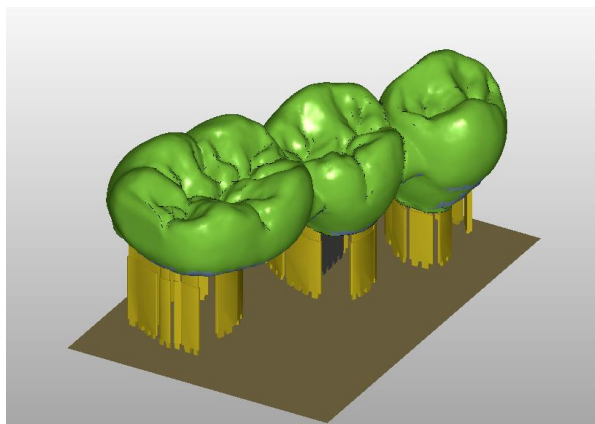
Ъгъл спрямо оста X: $\alpha = 0^\circ$;

Разстояние между стените на опорите: $y = 4$ mm;

Стените са разположени от вътрешната страна на дъното на зъба, т.е. навътре спрямо граничната линия. За разлика от останалите методи за производство с добавяне на материал, тук моделът се намира постоянно в съгъснена прахообразна стена и няма такава нужда от поддържане на провисналите части. При SLM методът, поддържащата структура играе ролята на отвеждане на топлината от модела към работната платформа, с цел намаляване грешките от топлинни деформации.

След задаването на желаните параметри се натиска бутон „приложи“ (Apply) и се натиска с мишката върху синята повърхнина на зъба (**Error! Reference source not found.**).

На Фиг. 4 се вижда готовият модел в аксонометрична проекция с изградена поддържаща структура:



Фиг. 4 Структура тип „Стена“ с разположени елементи по повърхнината на дъното на зъба

Преди започване на същинското изграждане на модела, същият трябва да бъде разделен на слоеве с определена дебелина.

Софтуерния пакет предлага библиотека от материали, в чиито характеристики е заложена и дебелината на слоя. При някои материали съществува повече от един размер за дебелина на слоя.

Дебелината зависи най-вече от състава на самия прахообразен материал. Колкото по-мака е дебелината, толкова разделителната способност на детайла е по-голяма.

Използваният материал е неръждаема стомана AISI 304L. Дебелина на слоя: $\delta = 30 \mu\text{m}$.

След въвеждане на горепосочените параметри се натиска бутон „Създай“ (Generate). Така софтуерният пакет изчислява слоевете и времето за изграждането им. При по-висока скорост на обработване на външния контур на детайла, се понижава времето за неговото изграждане. Това води до по-крехка структура, вследствие на недоброто разтопяване на слоевете. Процесът започва да се доближава до лазерното синтероване. При по-продължително време на излагане на прахообразния материал на лазерно лъчение, се получава структура с по-висока якост. Така е поради разтапянето и напълното свързване между слоевете.

Този подход води до по-продължително време за обработване на модела, което намалява производителността и също може да оскъпи крайното изделие.

Необходимо е намирането на оптимални параметри на работа, при които ще получи необходимото качество на модела за разумно време и себестойност. За целта се изработва не един детайл, а експериментална серия от детайли. Всеки детайл се изгражда с различни параметри. Детайлите се подреждат в серията, така че параметрите да нарастват във възходящ ред, както следва:

По редовете от ляво надясно нараства скоростта на обработка на контура на слоя v ;

По колоните нараства от горе надолу времето на нагряване на слоя t .

Серията е от девет детайла разположени в поле 3×3 .

Горепосочените параметри нарастват със сравнително голяма стъпка с цел получаване на по-явни резултати. Детайлът е със сложна форма и не подлежи на параметрично моделиране, няма възможност да се следи някакъв точен размер и поради това не се прави измерване на големина или грапавост.

Натиска се бутона „Създай експериментална серия“ (Create test series). Появява се меню с брой и подредба на детайлите. Серията се състои от девет на брой детайли. Три броя по ос X и 3 по ос Y . Разстоянието между тях е 3 mm по двете оси. Следва задаването на променливите параметри, които ще се следят. В менюто „Дефиниране на правила (Define rules)“ се въвеждат търсените параметри. По ос X се дефинира скоростта на обхождане на

лъча, а по Y – времето за излагане на лъчение. Начална стойност на скоростта: $v_1 = 400$ m/s; Крайна стойност на скоростта: $v_3 = 660$ m/s; Начална стойност на времето за облъчване: $t_1 = 1\mu s$; Крайна стойност на времето за облъчване: $t_3 = 20\mu s$.

Следователно детайл с пореден номер A1 ще бъде облъчен със скорост 400 m/s за 1 μs , а детайл C3 – със скорост 660 m/s за 20 μs .

Използваната машина е модел SLM 125^{HL}. Апаратурата се помещава в лаборатория „CAD/CAM/CAE в индустрията“ към Машинно-Технологичния Факултет на Технически Университет – София. Моделите се внасят в машината посредством преносима памет. Следват настройки на самата машина. Следи се налягането на газа и нивото на прахообразния материал. След като е направено всичко това, започва процесът на изграждане.



Фиг. 5 Готовите модели, почистени от необработения материал

След като процесът по отпечатването е завършен, моделите се почистват внимателно от необработения материал. От получената експериментална серия става ясно, че модел A1 има, най-високо качество на повърхнините. Забелязва се също, че останалите детайли не отстъпват по отношение на точност на най-добрия модел, но имат дефекти по отношение геометрията на макро грапавините.

Вижда се, че при всеки следващ модел започва влошаване на геометрията, в следствие получаване на прегар.



Фиг. 6 Модел A1

Изграждане на зъбна метална конструкция тип носеща вложка чрез технологията „селективно лазерно разтопяване“ в Технически Университет - София

Методиката на изграждане е аналогична на вече описаната по-горе.

Целта на настоящето изследване е да развие комплексна иновативна технология за изработване на зъбни импланти (в настоящата конкретика това са носещи вложки), използвайки съчетаване на традиционни с нови, чисто машиностроителни подходи, посредством високоточен 3D скенер, специализиран 3D CAD софтуерен пакет и машина за селективно лазерно разтопяване.

Класическият ръчен метод е базиран главно на леярски технологии и се състои основно в следното:

- вземане на мярка по челюстта и околните зъби (осъществява се в зъболекарския кабинет) – силиконов/полиетеров отпечатък;
- изпраща се в зъботехническа работилница;
- по взетата мярка ръчно се изгражда формата на импланта (носеци вложки или др. като корони, мостове,) от технически восък;
- създаденият ръчно модел се използва за отливане на импланта (като стопяем модел за еднократно прилагане);
- след получаване на отливката следва ръчно почистване, дооформяне и изпращане обратно до зъболекарския кабинет за поставяне на пациента.

Технологията е бавна и е в голяма зависимост от опита и моментната кондиция на зъботехника.

Предлаганата иновативна CAD високопроизводителна технология е в голямата си част, компютризирана и основните операции са замяна на леярските технологии с високоточна изработка на машиностроителна прототипна машина. Общият цикъл на работа повтаря само първата стъпка – физическо вземане на мярка (отпечатък) по челюстта и околните зъби (осъществява се в зъболекарския кабинет). Използват се за вземане на отпечатък (най-добре монофазно едноетапно или двуфазно едноетапно) - материал полиетер или А-силикон.

Следващите етапи и стъпки са коренно различни и се осъществяват с използване на най-съвременни компютърни технологии:

- Автоматично снемане на формата и размерите посредством 3D скенер на взетата мярка за направа на модела, в конкретно разглеждания случай това е носеща вложка тип „кепе“; така се постига много добра и гарантирана точност на модела; използван е наличният в Технически Университет – София тримерен лазерен скенер марка NextEngine;
- Прилагане на 3D CAD софтуер за Reverse Engineering, който да обработи постъпващата от скенера информация и по нея да изгради тримерен модел на сканирания обект;
- Използване на 3D CAD специализиран софтуер за моделиране на (корони, мостове, носещи вложки и др.) в замяна на ръчното оформяне на същите от синтетичен технически восък, включително с използването на готови библиотеки от елементи, които се дооформят; за целите на изследването е използван специализирания софтуерен пакет EXOCAD, с който разполага Технически Университет - София;
- Създаване на управляваща програма за изработване на реален модел; използва се софтуерът AutoFab 1.6 на компанията „Marcam Engineering“; този продукт е специализиран в производството на метални изделия чрез технологията селективно лазерно разтапяне; [92]
- Следва физическо изработване на елемента носеща вложка;
- На края - ръчно отделяне/почистване на модела от работната платформа и поддържащия материал, с последващо шлайфане на песъкоструен апарат за придаване на необходимата гладкост на външните повърхнини – почистване с перли, 50 микрона;

Подготвителен етап

Започва се със съществуващ гипсов модел, изработен в зъботехническа лаборатория. Той е отпечатък на снетия в зъболекарското студио модел от пациент. В случая, значение има долната челюст на пациент, и по-специално един проблемен зъб, който се нуждае от изработване на съставна дентална корона, състояща се основна част – носеща вложка, и покриващ елемент от металокерамика. Интерес за целите на научното изследване има създаването на носеща вложка.

Отпечатъка идва препариран на оклудатор. На него, всеки модел на зъб, представлява отделен съставен модел с пин, закрепен към общата основа. Това позволява фокусиране само върху желаната зона – в случая това е зъб № 47 по денталната номерация. Гипсовият

модел се поставя в работната зона на тримерния скенер NextEngine, който разполага с ротираща на 360° маса. С помощта на неговия софтуерен драйвер ScanStudio се извършва процеса на сканиране: копиране на физическата информация на модела във виртуална такава. Този софтуерен пакет се явява едновременно и продукт за ре-инженеринг и дава възможност да се подготви точен и консистентен 3D модел на сканирания образец, изграждан на базата на т.н. облак от точки, който постъпва в софтуерния пакет при 3D сканирането (прецизността на работа и елемента на внесена грешка са в строга зависимост от точността на скенера; тя е 0,005"). Времето за сканиране е от порядъка на няколко минути (4-5 минути), а времето за последваща обработка на постъпилата информация и създаването на тримерен модел е от около допълнителни 45 минути. Изходящия файлов формат е STL (Standard Tessellation Language).

3D скенера снима по 50 000 точки за секунда и работи с точност от 0,02 mm. При сканирането с този модел скенер се внася грешка в размера между физическия модел и неговия виртуален аналог от порядъка на 1.6 до 3.3 %, което се счита за напълно приемливо. Използван за целите на настоящето изследване 3D скенер е на NextEngine. Готовия модел представлява виртуално копие на физическия прототип (елемента на грешка е пренебрежимо малък за целите на изследването) и е в готовност за следващ етап.

Имплементиране в специализиран дентален CAD моделиер – EXOCAD

Избрана като технология за работа е системата тип Offset coping. Още тук е указано, че разработвания модел ще бъде изграждан по методиката на селективното лазерно разтопяване, зададени са и разстоянието до антагониста – 0,8 mm, както и минималната дебелина на обекта – 0,6 mm, информация постъпваща от страна за стоматолога.

Следва импортиране на модела в EXOCAD с последваща ориентация в работната зона. Извършва се сегментиране на нужната геометрия и нейното отделяне от останалата геометрия, посредством избор на граница (автоматично или ръчно прецизиране, ако не е постигната необходимата прецизност като избор), **Error! Reference source not found..** Задават се следните параметри:

- Оклузия 0,02 mm;
- Дебелина на циментовата основа 0,08 mm;

На следващата стъпка следва създаване на анатомична носеща вложка, която се генерира на базата на носещия модел и зададените параметри.

Изходящия файлов формат отново е STL като за целите на последващите операции той трябва да е с максимално добро качество. Избира се опцията Merge for Selective Laser Melting за създаване на омрежен модел.

Времето за създаване на 3D модел в специализираната софтуерна платформа EXOCAD е около 45 минути.

Селективно лазерно разтапяне (SLM – Selective Laser Melting), както е упоменато по-горе, е метод, при който се използва разтопяване на прахообразен материал от лазерен лъч, с цел получаване на метален детайл с почти неограничено сложна форма.

Детайлът се изгражда адитивно слой по слой, с дебелина на отделните слоеве от 30 микрометъра. Този процес практически дава възможност за изработването на изключително сложни, комплексни форми, създавани от тримерна CAD геометрия (STL файл), напълно автоматично и практически само за няколко часа, и то без каквито и да било инструменти. Получените изделия са продукти с най-висока степен на геометрична точност, добро ниво на грапавост на повърхнините и са с изключителни механични показатели.

В настоящето изследване се изгражда зъбен имплант носеща вложка тип „кепе“ чрез селективно лазерно разтопяване. Процеса е разделен на следните стъпки:

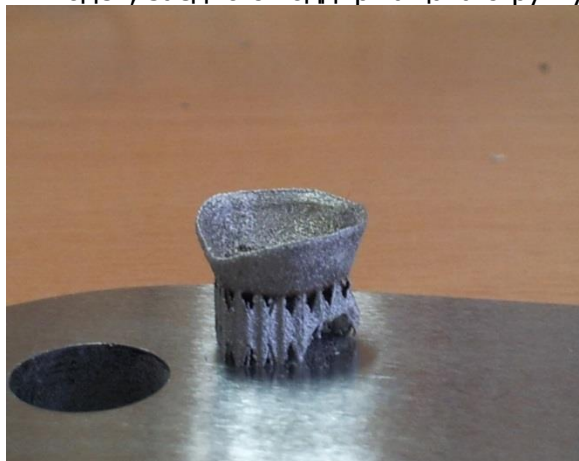
- ✓ Наличие на тримерен компютърен модел (от специализиран дентален CAD софтуерен пакет);
- ✓ Създаване на управляваща програма за машина SLM 125 HL, работеща по метода „Селективно лазерно разтапяне“;

- ✓ Създаване на детайла по установени в предишно изследване оптимални параметри за получаване на висококачествени импланти.

Извършва се подготовка на модела за изграждане с помощта на софтуера AutoFab. Това е продукт, специализиран в производството на метални изделия чрез лазерно синтероване и разтапяне, използван и по-горе в настоящата глава. С него се проверява и поправя постъпилата от специализирания дентал CAD пакет тримерна геометрия на изследвания елемент - моделът трябва да бъде във вид на затворен обем и да няма налични дефекти по геометрията. Извършва се ориентация на посоката на слоевете. Добавя се дебелина на обекта (черупка). Създава се поддържаща структура. Преди началото на изграждане на модела, същият трябва да бъде разделен на слоеве с определена дебелина. Дебелината зависи предимно от състава на прахообразния материал, който ще се използва за направа на детайла. Използван е наличният материал неръждаема стомана AISI 304L и за нея е избрана дебелина на слоевете: $\delta = 30 \mu\text{m}$. Стоманата е по-евтина, но с по-голямо тегло и по-голяма топлопроводимост от препоръчаните за тази цел CrCo (хром-кобалтови) сплави. Последните са с много добра корозионната устойчивост, механична здравина, износоустойчивост и биопоносимост.

Използваната машина е модел SLM 125HL. Апаратурата се помещава в лаборатория „CAD/CAM/CAE в индустрията“ към Машинно Технологичния Факултет на Технически Университет – София. Машината се стартира с вече създадената управляваща програма и започва процес на изграждане на детайла.

На Фиг. 7 е даден готовия модел, заедно с поддържащата структура.



Фиг. 7 Готовия модел, заедно с поддържащия материал

Следват довършителни операции по отделянето на модела от поддържащия материал, шлайфане в пескоструен апарат за намаляване на грапавостта и придаване на необходимата гладкост на повърхнините.

Моделът е готов за монтиране при пациента – да служи като стабилна основа за надграждане с металокерамична корона.



Фиг. 8 Оклузален изглед на готовия модел, след шлайфане

Изводи

1. Разработена методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти чрез използването на различни технологии: 3D сканиране, формиране на виртуално копие на сканирания обект, създаване на негова база в специализиран дентален CAD пакет 3D модел на импланта, създаване на управляваща програма и изработване с прототипираща машина по технологията SLM.
2. Технологията е апробирана чрез изграждане на дентални импланти конструкция тип „мост“ и конструкция тип „носеца вложка“.
3. От подготвения тримерен компютърен модел с инструментите на софтуера AutoFab е създаден годин модел за генериране на управляваща програма.
4. Анализирани са различни варианти за ориентация на модела и респективно на слоевете, като е избран най-подходящият в конкретния случай, с цел да се запази качеството на лицевите повърхнини на импланта.
5. Направена е експериментална серия, като са променяни следните параметри: скорост на обхождане на контура на слоя и време за нагряване от лазерния лъч. Експерименталната серия се състои от девет обекта.
6. Определени са оптималните параметри на процеса на изграждане в резултат на проведени тестове.
7. Установи се, че по-дългото нагряване да предизвика по-интензивно топене на металните прахови частици и респективно по-ниска грапавост на повърхнината, се установи, че се появява ефектът „пригар“.
8. Установи се, че параметрите, зададени за този материал от производителя, не са оптимални в конкретния пример, защото взаимодействието между лазерната радиация и металът е термодинамичен процес, чиято зависимост от времето се изразява в габаритите на изграждания детайл.
9. Постигната е висока степен на автоматизация и точност на геометрията.

Глава 4. ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА ЗЪБНИ ИМПЛАНТИ АЛТЕРНАТИВНО ПО ТЕХНОЛОГИЯ С ОТНЕМАНЕ НА МАТЕРИАЛ С ПОМОЩТА НА СПЕЦИАЛИЗИРАН ДЕНТАЛЕН САМ ПАКЕТ. ПАРАЛЕЛ МЕЖДУ 3 И 5 ОСНИТЕ СТРАТЕГИИ ЗА ЦИФРОВА ОБРАБОТКА.

Методика за изработване на дентални импланти

Представеното изработване на зъбни импланти чрез отнемане на материал е разделено на следните стъпки:

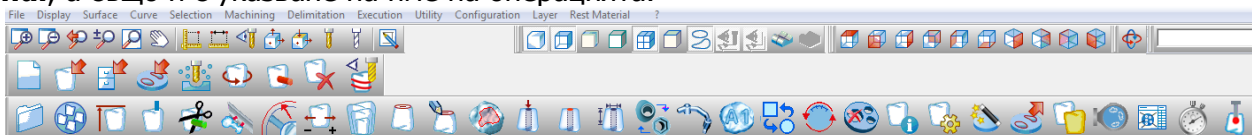
1. Наличие на тримерен компютърен модел (от специализиран дентален CAD софтуерен пакет);
2. Създаване на управляваща цифрова програма за машина Roland DWX-50, представляваща специализирана дентална 5 осна ЦПУ фреза (от специализиран дентален САМ софтуерен пакет);
3. Създаване на опитни образци, изработени от цирконий и технически восък;

Изработване на управляваща програма в специализираната дентална САМ софтуерна система SUM3Dental

Когато е формирана 3D геометрията на денталните импланти в специализирания дентален CAD пакет EXOCAD, следва да се избере начина на тяхното реално изработване, в конкретния случай, чрез отнемане на материал (фрезование). С цел улесняване на работещите, особено, ако се използва 3 осна методика за работа и/или се разполага с такава цифрова фреза, то в EXOCAD има създаден нарочен интерфейс към САМ пакета

SUM3Dental. В EXOCAD трябва да се укаже типа на материала (посочен още в началния етап на моделиране). След това трябва да се направи, на базата на геометричните размери на моделите, удачен избор на заготовка за работа (в нашия случай това са дискове, които са стандартизирани по размери дебелина на диска и диаметър на диска). След това се указва конкретната ЦПУ машина (и удачния пост процесор) и да се подбере необходимата стратегия за работа, да се позиционират автоматично или ръчно моделите на имплантите върху диска. Следва стартиране на този интерфейс между двете системи, който по същество не прави връзка между тях, а директно изкарва ISO код, който следва да се качи на ЦПУ фрезата. Т.е. този интерфейс съдържа математика от SUM3Dental в средата на EXOCAD, в т.ч. и готови постпроцесори за определен набор от цифрови фрези. Това е опростен, но удобен, автоматизиран метод за работа, насочен изключително към хора, които не могат да се справят с възможностите, които предоставя специализирания дентален CAM пакет. За да бъдат качествено изработени денталните модели е нужна голяма прецизност в работата, 5 оси на фрезование, цял набор от профилирани фрезови стратегии за цифрова обработка. Това може да се осъществи посредством използването на самостоятелния дентален CAM пакет на SUM3Dental (Фиг. 9).

Работата стартира с избор на материал на заготовката, който ще се подложи на обработка, както и с посочване на точна ЦПУ машина (фреза), **Error! Reference source not found.**, а също и с указване на име на операцията.



Фиг. 9 Част от менюто в SUM3Dental

Всички стъпки, които трябва да бъдат направени, за да се създаде годна за изпълнение програма за цифрова обработка, са разположени в последователно меню с икони.

Ще се създава цифрова програма за работа на заготовка от циркониев диск. Използваната ЦПУ фреза е CIMSISTEM 5A (Rolland) с 5 едновременно управляеми оси на работа.

На следващата стъпка се прави избор на това какво ще се изработва, т.е. посочва се съответния имплант или съответните импланти, които се разполагат последователно в работната зона на софтуера. CAM системата разполага със специално създадени шаблони за работа, в зависимост от направения избор на тип имплант. Това са цял набор от точно създадени и подбрани CAM стратегии за фрезование, които са строго уточнени от разработчика на продукта, и са тясно специализирани съобразно вида на стоматологичния модел – „кепе“, анатомична корона, мост, анатомичен мост, абатмънт, абатмънт тип анатомичен мост, шина, телескопична корона, имплант за вграждане в костта, инлей/онлей и др.

Ето защо, правилния избор на шаблон с фрезови стратегии на този етап, е от съществено значение за коректността на изпълнение. Шаблонизирането води до силно ускоряване на работния процес.

Създадената в EXOCAD 3D CAD геометрия е във вид на експортиран STL файлов формат, който се явява входен за CAM софтуера SUM3Dental. Ще се подберат цял набор от конструирани модели, които ще се изработят в една заготовка. Това ще бъдат седем дентални елемента.

Започва се с импортирането на модел №1 – конструкция тип „кепе“, с подбор на удачния за целта CAM шаблон – Coring. На базата на указания в предната стъпка вид на материала на заготовката (цирконий), продукта дава веднага неговия фактор на свиване – 1.2, което е предварително отчетено в шаблона за работа. Веднага след потвърждаване на направения избор, модела се позиционира в работната среда на CAM системата, върху базова заготовка с дебелина и диаметър с формален характер. Точен избор на заготовка ще бъде направен, едва след внасяне на всички модели, които ще бъдат обработвани. Продукта SUM3Dental предлага вариант за автоматично позициониране и ориентиране на модела върху заготовката, като с внасянето на всеки следващ модел се търси възможна оптимизация с цел

максимално оползотворяване на дисковата заготовка. Има опция да се избере и ръчно манипулиране, нещо, което е възможно във всеки един етап от процеса по разполагане на тримерните модели.

Последователно се прави избор на останалите CAD дентални модели, заедно със специфичните за всеки един от тях шаблони съдържащи набор от стратегии за обработка.

След внасяне на всички модели в работното пространство на денталния CAM пакет, следва конкретен избор на заготовка. Предлагащите възможности са, да се подбере стандартна заготовка от съществуващата в софтуера готова библиотека, да се създаде нов модел на заготовка със специфични извън стандартни размери, както и да се работи с вече използвана заготовка, която не е напълно оползотворена. В конкретния случай се подбира нова заготовка от готовата библиотека. Софтуерният пакет автоматично изчислява възможната най-малка от технологична точка дебелина на диска, съобразно максималната дебелина на импортираните обекти и дава предложение за избор на заготовка. Изборът може да бъде приет или отхвърлен, след което ръчно да се формира желаните избор.

Материала и вида на ЦПУ машината идват автоматично от дефинираните в предните стъпки условия. На основата на препоръчаната от софтуера минимална дебелина за диска, се избира заготовка с дебелина от 13 mm и диаметър от 98 mm (стандартна заготовка).

Следва избор на фрезови стратегии за изработване, подбиране на режещите инструменти и генериране на инструменталния път на цифровата програма. Софтуерното CAM решение SUM3Dental предлага удобен автоматизиран подход за работа, вследствие на шаблоните със стратегии за работа, които се основават на дългогодишни проучвания от страна на фирмата разработчик на продукта SUM3Dental – CIM System, конкретния тип на използвания материал, размера и формата на заготовката. Прави се избор на 5 основни фрезове.

SUM3Dental предоставя възможност за автоматичен или ръчен избор на инструменти. В настоящия случай се използват три инструмента, всичките те са сферични фрези с диаметър при върха 0.6 mm, 1 mm и съответно 2 mm. За улесняване на процеса, предпочитаният избор е автоматичен подбор на подходящите инструменти.

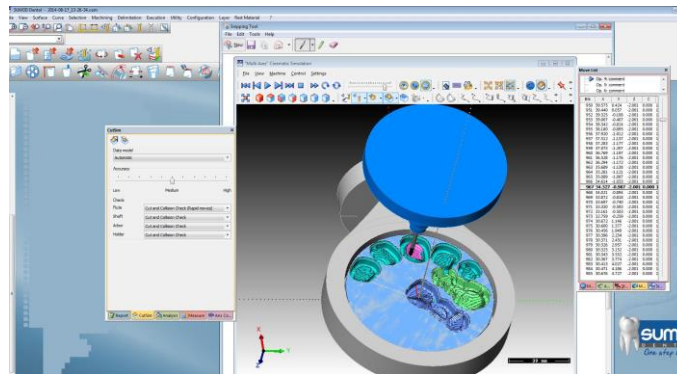
Следва позициониране на всички дентални елементи върху заготовката. Отново се прави избор на предлаганата от системата опция за автоматично разполагане. Основавайки се на сложен алгоритъм, софтуерната система започва да разполага елементите последователно по диска, съобразно начина на тяхното избиране и с оглед на тяхното оптимално разполагане, така че да се сведе до възможен минимум остатъчният материал (който може да е потенциален брак). Така, оставащия от заготовката материал, може да бъде използван повторно на по-късен етап за друга обработка.

На следващ етап се стартира процеса на пресмятане на цифровата 5 осна програма. Използва се графична работна станция с процесор Intel iCore 7, с 8 GB оперативна памет, 64-битова операционна система, видео карта nVidia Quadro 600. Времето консумирано за тази калкулация е 4 часа и 44 минути.

След приключване на пресмятането, автоматично се отваря в текстов редактор готовата и преминала през постпроцесор (става автоматично на базата на избраната машина, за която предварително е създаден нарочен постпроцесор; за целите на настоящето изследване е използван такъв, любезно предоставен от CIMSystems.) в ISO код програма.

Тя заема завидния обем от 8 MB и 37 000 реда.

С помощта на вградената в SUM3Dental конзола MACHINE KINEMATIC идваща от компанията MachineWorks, става възможно да се проследи детайлно процеса на стружкоотнемане, както е показано на Фиг. 10.

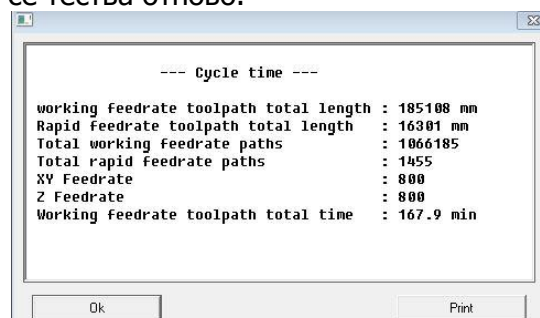


Фиг. 10 MachineWorks показва детайлно процеса на стружкоотнемане

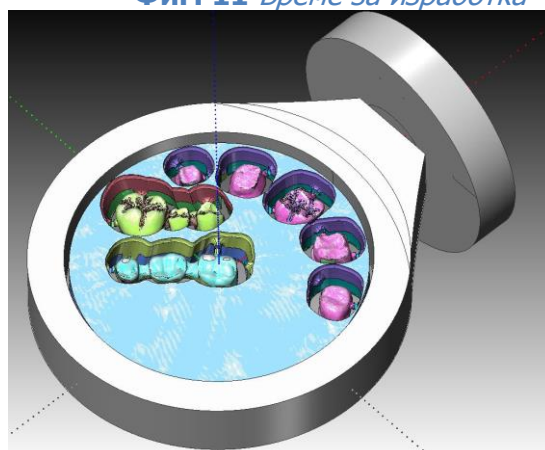
Ясно се виждат следите от режещия инструмент, както и степента на обработка, както и оставащата за вземане прибавка. САМ пакета автоматично извършва проверка за колизии при връзване и подрязване в работната зона, обхващайки поведението на инструментите, техните държачи, заготовката, както и захващания я елемент. В хода на изпълнение колизии не са открити.

Цялата изработка се състои от 63 отделни операции. Времето за работа на ЦПУ машината Roland за производство на всички дентални елементи е 167,9 минути, Фиг. 11.

На Фиг. 12 са дадени два основни изгледа, обхващащи двете страни на диска цирконий, в крайния завършен етап на работа. Така, още на виртуално ниво, се добива реална представа за бъдещето поведение при реалното изработване на ЦПУ фреза. Ако се констатират нередности, следва да се извърши адекватно преработване на технологията за цифрово програмиране и да се тества отново.



Фиг. 11 Време за изработка



Фиг. 12 Изглед А) от готовата фрезова обработка

Изработване на физическите образци чрез отнемане на материал

С помощта на денталната софтуерна специализирана САМ система SUM3Dental става възможно да се създадат цифрови управляващи програми за изработване на стоматологични

импланти от различни типове, предназначени за изработване чрез отнемане на материал - на 5 осни ЦПУ фрезови машини.

В хода на разработването бяха формирани две управляващи цифрови програми за фрезоване, с използването на два типа материал на заготовката. В тип едно, това е разгледания по-горе модел, предназначен за изработване на импланти от цирконий. В тип две, стоматологичните импланти са изработени от синтетичен технически восък, чиято заготовка – диск, също се фрезова. Получените готови образци ще послужат за последващо леене по стопяеми модели с хром-кобалтова сплав.

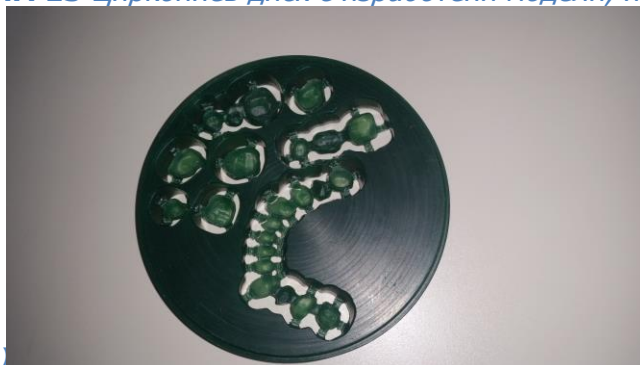
Поради техническата невъзможност за изработване на физическите образци със съществуващото в Технически Университет – София съоръжение, се осъществиха релации с един от световните производители на специализирани цифрови фрези за дентални цели – японската фирма Roland, и по-точно с нейния представител в Гърция, компанията Atlas Digital SA (българския представител не разполага с демонстрационна машина). Фирма Atlas Digital SA прие да изработи безвъзмездно два диска с дентални модели, един от синтетичен восък и друг, от цирконий, по модели и програми предоставени от автора.

Моделите от двата диска са изработени на ЦПУ машина Roland, модел DWX-50, за който CAM пакета SUM3Dental разполага с нарочен специализиран постпроцесор. Използвания материал е на фирма Sagemax: Green Wax CAD / CAM Disc и NEXX ZR S High Strength Zirconia.

Готовите изработени модели са показани на Фиг. 13, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, Фиг. 14 и **Error! Reference source not found.**



Фиг. 13 Циркониев диск с изработени модели, изглед



Фиг. 14 Восъчен диск с изработени модели, изглед А)

Циркониевия диск се синтерова в специализирани пещи при съблюдаването на строга последователност относно технологията. Предписанието за точните режими, идва от страна на производителя на циркониевите блокчета. В настоящия случай се започва с постепенно покачване на температурата през стъпка от 3°C/мин до достигане на ниво от 1 500°C. Тази температура се задържа в продължение на два часа. Следва понижаване на температурата до 65°C през стъпка от 6°C/мин. При достигане на температура под 65°C става възможно да се извади вече синтерования цирконий.

Процедурата по синтероване е извършена в Циркон Център – София.

На Фиг. 15 са показани готовите вече синтеровани модели циркониеви импланти.



Фиг. 15 Готовите синтеровани циркониеви импланти

На Фиг. 16 са показани същите модели на импланти, този път фрезовани от хром-кобалтова сплав, които бяха любезно изпълнени отново от Циркон Център – София.



Фиг. 16 Същите модели на импланти фрезовани от хром-кобалтова сплав

Паралел между 3 и 5 осните стратегии за цифрова обработка.

За обработване на дентални импланти се използват ЦПУ машини с едновременно и непрекъснато управление на 3 и повече оси. За ефективното обработване на тези сложни повърхнини е необходимо инструментът, заготовката, или и двете, да променят по време на обработката своята ориентация, за да се достигнат по най-добрия начин локалните зони, които трябва да се обработят, без подрязване и колизии. Три-осните ЦПУ машини не могат да обработват някои повърхнини със сложна форма и са неефективни за други. Инструментални пътища с драматична промяна в кривината и високи изисквания за грапавост изискват голямо машинно време и трудно могат да бъдат обработени на 3-осни машини. Използването на 3-осно фрезование е удобно за не много дълбоки спрямо диаметъра на инструмента детайли. Ако все пак, обработваният детайл е много дълбок и има тесни участъци, които трябва да се снемат, то 3-осната обработка се явява неподходяща в този случай, особено за чисто фрезование. Това не се наблюдава в сферата на денталното фрезование така често, както е в машиностроенето. Влияние оказва и твърдостта на материала, който се фрезова, като при твърди материали се получава удължаване на времето за работа на инструмента, с влошаване на качеството на работните повърхнини. Ето защо се извършва накланяне на шпиндела под определен ъгъл, който позволява труднодостъпните участъци да бъдат обработени, при това с по-къс металорежещ инструмент. Този етап на работа на шпиндела под определен постоянен ъгъл е известен с наименованието 3+2 осно фрезование (3 едновременно управляеми линейни оси (X, Y, Z) и две дискретни ротации (A и B)). Този тип на фрезование се явява нискостойностна алтернатива на 5-осна ЦПУ машина. Това е близо до 5-осна машина, но двете ротации не са синхронизирани с линейните движения и те са представени като движения по оси. Идеята на разглеждания подход е: разделяне на повърхнината за работа на оптимален брой участъци с подобна форма, определяне на предпочитаните настройки за отделните участъци и съставяне на 3-осна ЦПУ програма за всеки отделен участък. Този тип ЦПУ машина

преодолява ограничението на 3-осните машини чрез поетапно ориентиране на заготовката за намаляване на ъгъла. В сравнение с 5-осната обработка със синхронизирани ротации, подготвителното-заклучително време се увеличава. За всеки отделен участък е необходимо време за пренастройка на позицията. Изгодите са: значително по-малки капиталовложения, по-стабилна структура на машината и по-лесно ЦПУ програмиране, което прави този подход не лоша алтернатива за някои типове детайли. Изисква по-сложна и по-скъпа екипировка за захващане и позициониране на обработвания детайл. Всяко препозициониране е предпоставка за внасянето на допълнителен елемент от грешка. При по-комплексна геометрия на модела е възможно да се извършат редица препозиционирания във вариант 3+2, което да позволи пълна обработка. Инструменталния път се усложнява, често има припокриващи се участъци, машинното време расте. Значително нарастват движенията, програмирането се усложнява. Може да се окаже, че по този начин в някои случаи няма опция детайла да бъде цялостно обхванат. Именно този 3+2 междинен вариант е често използван у нас в България.

Пет осните ЦПУ (три линейни и две синхронизирани с тях кръгови оси) дават решението. Някои производители (най-често това са фирми производители на различни пресформи, но и в дентологията нещата са сходни) намират, че чрез промяна от 3-осно на 5-осно фрезозане, производителността нараства от 10 до 20 пъти.

Пет осните ЦПУ машини също имат своите недостатъци: големи инвестиции и операционни разходи (5-осния дентален и машиностроителен CAM софтуер е все още скъп), по-малка стабилност, по-сложно определяне пътя на инструмента.

Употребата на по-къси инструменти е ключов момент при 5 осните обработки. Така, категорично се решава въпроса с деформациите на режещия инструмент, като те се намаляват до пренебрежими граници. В резултат на това се постига по-добро качество на обработваните повърхнини, извънредно много се намалява необходимостта от използването на електроди (при работа в областта на инструменталното производство). В същото време нарастват изискванията към CAM софтуерните пакети. Практически основите на цифровите управления и тяхното окомплектоване с металорежещи машини, започва през 50-те години на миналия век в Масачузетския Технологичен Институт, като следствие от постъпила заявка от американските военновъздушни сили за изработването на по-сложни изделия от цяло парче заготовка. Последвалото развитие в сферата на електрониката и на графичния интерфейс довежда до първата CAM програма, която е създадена в началото на 80-те години на 20 век. При реалното 5 осно фрезозане има едновременно движение по 3 линеарни оси и по 2 оси на ротация. Това решава всички проблеми, които са налице при 3+2 подхода. Инструментът е къс, няма припокриване на участъци, вероятността за пропускане на зона за обработка е много по-малка. 5 осната работа налага задължителното използване на CAM софтуерен пакет, поради значително усложнения начин на цифрово програмиране. Основната проблематика тук възниква от прекалено голямата свобода, която този начин на работа предоставя. CAM системите се развиват много в тази насока и включват все повече стратегии за 5 осни обработки с много широки възможности за контрол на режимите на рязане и стружкоотнемане, за формиране на инструменталния път, за подхода и отвеждането на металорежещия инструмент и т.н. На изображение **Error! Reference source not found.** са дадени част от настройваемите параметри и режими на рязане при CAM пакет за 5 осно фрезозане. Забелязва се големия потенциал на прецизност в работата, както и на многото опции за контрол на процеса, при това с изключителна детайлност.

На **Error! Reference source not found.** са показани три възможни варианта на разположение на обработващия инструмент, спрямо повърхнината на работа. В първи случай има нормално разположен на повърхнината инструмент, при втория инструмента е ориентиран спрямо точка, явяваща се среда на линията на горната полусфера. При третия случай има перпендикулярност към водещата крива. Обект на интерес, поради екипировката на ЦПУ машината и размерите на нейната работна зона, представлява първия случай.

Контрол над колизиите и методи за тяхното избягване

При работа с повече от 3 оси възниква въпроса за контрол над колизиите и тяхното избягване, което е сложна и времепоглъщаща задача. Въпреки наличието на физическо ограничение на ЦПУ машината при движение по отделните оси, т.нар. „лимити“ на трансляция и ротация, избягването на удари и интерференции при рязане и стружкоотнемане, представлява сериозно предизвикателство. Използването на 5 оси едновременно, води до редица предимства, но същевременно се усложняват неимоверно процесите на работа, като в най-значителна степен нараства вероятността от появата на споменатите по-горе колизии: това са врязвания и подрязвания на металорежещия инструмент в заготовката, удари в захващата инструментална екипировка (менгеме, стиски, др.), сблъсъци на инструмента или главата на машината в масата, колизии между машинни компоненти и т.н. В резултат на всичко това се чупят инструменти, повреждат се заготовки, чупи се самата машина (най-често нейния шпиндел).

CAM пакетите имат в себе си заложили възможности за управление на врязванията в малък диапазон, често обхващащ само работната зона, неразпознаващи например държачите като такива и т.н. Важно е да се отбележи, че в който и да е CAM пакет, всички заложили в него проверки се правят само върху неговия собствен код, т.нар. NCL (Numer Cutter Location) файл, който след това ще трябва да премине през постпроцесор, за да излезе във вид на ISO код. ЦПУ-то на всяка една машина, разчита именно като постъпваща информация, този ISO запис. Пълната, прецизна проверка на цифрова програма, може да се извърши само от софтуерна система четяща ISO формата на програмата и отчитаща всички аспекти на работния процес, стъпвайки върху CAM работата. Това не се постига от CAM пакетите.

Такава система се явява Vericut/CGTech. Тя дава възможност за пълен анализ на ЦПУ програмата идваща от CAM пакета. Прави проверка за: синтактични грешки в кода на програмата; проверява инструменталния път на режещите инструменти; предпазва от всички видове колизии, врязвания, подрязвания, интерференции, в т.ч. и между машинни компоненти; прави тотална симулация на процесите на рязане и стружкоотнемане заедно с реалните инструменти, държачи, заготовка, маса; едновременно симулация на кинематичното движение на ЦПУ машината (особено полезно при многоосни обработки) заедно с процеса на рязане, евентуално спомага за оптимизация на програмата с цел намаляване на времето и за изпълнение.

Големите производители на металорежещи инструменти поддържат в неутрален формат в своите интернет сайтове библиотеки с 3D инструменти и държачи, пластини и т.н., със свободен достъп, което позволява точния инструмент да бъде свален и съответно качен във Vericut. Това премахва необходимостта всеки инструмент да бъде предварително моделиран, което е особено удобно за нови инструменти. На **Error! Reference source not found.** е показано 5 основно фрезозане на дентална мостова конструкция в CAM системата SUM3Dental с вградения пакет MachineWorks, който анализира подобно на Vericut процеса на рязане.

Изводи

1. *Разработен алтернативен вариант на методиката за проектиране и изготвяне на дентални импланти чрез отнемане на материал с използване на последователен набор от технологии: 3D сканиране, формиране на виртуално копие на сканирания обект, създаване на негова база в специализиран дентален CAD пакет модел на имплантите, създаване на управляваща цифрова програма и произвеждане на имплантите с 5 осна фрезова машина.*
2. *От получения тримерен компютърен модел, формиран в Exocad, с инструментите на софтуера SUM3Dental са създадени управляващи цифрови програми, с които са изработени физически образци.*
3. *Изработени са висококачествени зъбни импланти - два моста и няколко корони, съответно от цирконий, хром-кобалт и технически восък.*

4. Изследването доказва добрите възможности на технологията за изработване на дентални импланти чрез отнемане на материал (фрезование).
5. CAD/CAM процеса, свързан с циркония, все още се нуждае от внасяне на подобрения, относно стандартизирането и ефективността му.
6. С 5 основото фрезование се получава по-добро качество на фрезованите повърхнини, респ. по-малка грапавост, защото се избягва недостатъка на триосните машини с невъзможността за динамично поддържане на ъгъла между оста на инструмента и нормалата към повърхнината в точката на контакта, което е особено значимо при комплексните форми на имплантите.
7. Посредством 5 основото фрезование се формира по-дълъг живот на инструмента. Поради използването на по-къси инструменти, силно се понижава степента на деформация, от тук чувствително се понижават и трептенията в цялата система, които възникват при механичната обработка (остатък им до голяма степен се демпферира), което води до получаване на повърхнини с много голямо качество и висока точност на изпълнение.
8. При 5 основото програмиране се елиминират скъпите инструменти и специализирана инструментална екипировка, която е необходима за захващането, типична за 3+2 фрезването.

Глава 5. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ ПО РАЗЛИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ С ДОБАВЯНЕ ИЛИ ОТНЕМАНЕ НА МАТЕРИАЛ ТЕСТОВИ ОБРАЗЦИ НА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ.

Изследвана е възможността за използване на модели от восък, произведени с помощта на силиконов ключ и технология на прототипиране, за многократно отливане на 4-членни дентални мостове от Co-Cr сплав.

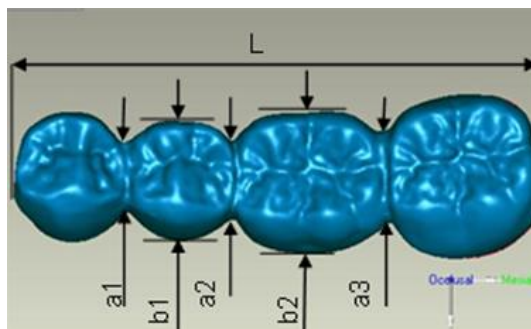
Методика на експеримента

Отлети са пет 4-членни моста от Co-Cr сплав „Biosil“. Восъчните модели са получени чрез изливане на восък в силиконов ключ. Отлети са още шест 4-членни моста от същата сплав, но восъчните модели са произведени по технологията на прототипиране. Измерени са стойностите на връзките между мостовите тела и мостокрепителите, ширината на мостовите тела и дължината на всички изработени мостове по схемата, показана на Фиг. 17. Изчислени са най-голямото отклонение на размерите – e_{max} и средната им стойност - a_{cp} , b_{cp} , L_{cp} по следните формули:

$$e_{max} = a_{max} - a_{min} \quad (1)$$

$$a_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (2)$$

Където: e_{max} е най-голямото отклонение на размерите, mm; a_{max} – най-голям размер на образца, mm; a_{min} – най-малък размер на образца, mm; a_{cp} – среден размер, mm; n – брой на образците.



Фиг. 17 Схема на измерване на мостови конструкции, изработени с помощта на дуближни модели

Получени резултати и анализ

В денталната медицина и зъботехниката протезните конструкции се изработват в единични бройки. Те са предназначени за определен пациент и зависят от спецификата на съответния случай. Изработването на метални конструкции се извършва най-често по метода на центробежно леене с високочестотна апаратура за топене, като се използват ръчно приготвени модели от восък.

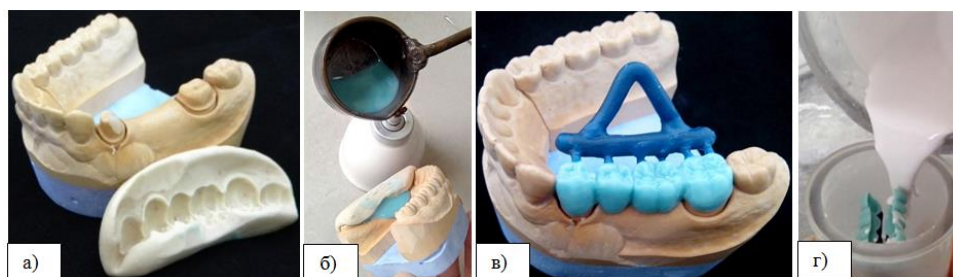
Вероятността за добра повтораемост на няколко моста, отлети по восъчни модели, ръчно изработени върху един и същи гипсов модел, е много малка. Затова се налага да се търсят други начини за „дребно-сериенно“ производство на восъчни модели с достатъчна точност. Единият подход е чрез изработване на форма, в която да се отлее восъка, а другият - да се използват новите технологии на бързо прототипиране. Но за целта е необходимо да се изработи един основен 4-членен мост - модел, по който да се направят отливната форма за восъка и 3D модела за прототипната машина.

Изработването на основния 4-членен мост – модел е извършено в следната последователност:

- 1) Изработване на гипсов модел с подвижни пънчета от твърд гипс – IV клас;
- 2) Моделиране на 4-членната мостова конструкция от восък;
- 3) Поставяне на отливни щифтове и леякова система;
- 4) Опаковане на восъчния моделаж с опаковъчна маса Shera cast;
- 5) Нагряване на муфата до температура 980°C и задържане 30 min;
- 6) Отливане с помощта на апарат за индукционно топене и леене на метали Castomat Krupp table;
- 7) Почистване на отливната форма от опаковъчната маса;
- 8) Изрязване на леяковата система с карборундов сепаратор;
- 9) Грубо зачистване на отливката с карборундов шлайф-грифер;
- 10) Пясъкоструене на отливката с Al_2O_3 с едрина 120µm при налягане 6 bar.

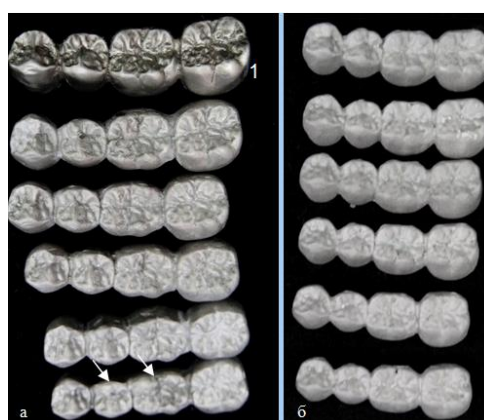
Изработване на мостови конструкции от дуближни модели, получени чрез силиконов ключ

След изработване на основния мост-модел от восък, от него се взема отпечатък със силиконов отпечатъчен материал Zetalabor (Фиг. 18-а). Този така наречен „силиконов ключ“ се използва за форма за отливане на восъка и за многократно получаване на восъчни модели, идентични на тези, за основния мост-модел. Отливането на мостовете от сплав Biosil (Фиг. 18-а) и окончателното почистване стават по описания по-горе начин.



Фиг. 18 Изработване на 4-членни мостове чрез използване на дуближни вощъчни модели, получени с помощта на силиконов ключ. Изработване на силиконов ключ–а), отливане на дублиращи модели от вощък–б), изработване на леяковата система – в) и опаковане на вощъчния моделаж–г)

Изработване на мостови конструкции от дуближни модели, получени чрез прототипиране



Фиг. 19 Основна конструкция – 1; 5 образци, получени чрез дуближни модели, изработени със силиконов ключ – а) и 4-членни мостове, отлети от дуближни модели; получени чрез процес на прототипиране – б)

За да се изработи една конструкция чрез прототипиране първо трябва да се създаде 3D модел. В нашия случай гипсовият модел е сканиран като е използвана апаратура KaVo Everest-Sscan Pro, снабдена със софтуер Everest Scan Control. Извършено е общо сканиране на основния метален мост-модел в 12 позиции. Направено е и индивидуално сканиране на мостокрепителите също в 12 позиции. Сканираната информация е обработена, създаден е виртуалният модел и е разделен на триъгълници, които образуват мрежата за по нататъшна обработка. Тази информация е прехвърлена в KaVo Surface софтуер, който е специализиран за целите на зъботехниката. С него е извършена 3D виртуализация на сканирания модел и разделянето му на части – гингива, съседни зъби, антагонисти, мостокрепители. Така подготвената информация е подадена за изработване на вощъчни модели чрез прототипиране. Тяхното производство е извършено с помощта на „система за прототипиране на микроструктури“ SolidScape R66+ част от машинния парк за бързо прототипиране в Машинно Технологичният Факултет на Технически Университет – София.

Прототипирането на 4-членните мостове е извършено в следната последователност:

- 1) Наличие на физически модел;
- 2) Сканиране на модела с KaVo Everest-Sscan Pro и обработка на данните в приложението KaVo Surface;
- 3) Отваряне на модела в приложението Model Works и създаване на управляваща програма за машината;
- 4) Изграждане на мостовете в машината;
- 5) Химическо разграждане на поддържащият материал и получаване на готовото изделие;

Тримерният компютърен модел се отварят в приложението Model Works 8.1, където се размножава до необходимия брой, и детайлите се ориентират в работното пространство на машината. С цел постигане на максимално висока точност на мостовите е избрана дебелина на слоевете от 0.0127 mm. Осигуряването на тази висока точност се извършва, като се зададе подравняване след всеки слой, с помощта на вградената в машината фреза. След задаване на останалите технологични параметри се генерира управляваща програма, която се изпраща към машината.

Ключов момент при подготовката на машината за изпълнение на отговорната задача е осигуряването на равнинност на работната подложка и отклонението от успоредност между тази и равнината на движение на дюзите, да не надвишават дебелината на слоя. Това се постига чрез последователно фрезование на работната подложка вътре в машината.

Изработката на детайлите отнема 27:40 часа. Запълването на цялата работна зона би понижило значително времето за изграждане към броя на детайлите. На отделна операция химически се разтваря розовия поддържащ материал, за да остане окончателният модел.

От получените модели са отлети и окончателно обработени по описания по-горе начин шест моста от сплав Biosil (Фиг. 19-6).

Точност на мостови конструкции, изработени от дублажни модели, получени по различни технологии

Размерите на елементите на 4-членни мостове, изработени чрез дублажни модели със силиконов ключ са дадени в Таблица 2. Вижда се, че максималното отклонение на размерите на връзките между мостокрепителите и мостовите тела е в границите на 0,30mm за размери a1 и a2 и 0,70 mm за размер a3. Разликата на същите размери с тези на основния мост-модел е около +0,05/+0,15 mm. Но, при ширината на мостовите тела (b1 и b2) има голямо максимално отклонение - 1,04 mm и 1,54 mm за малкото и голямото мостови тела съответно. Размерите b1 и b2 на образец 11 са съответно 6,59mm и 7,77 mm, което е доста по-малко от 7,28 mm и 8,63 mm на основния мост-модел. Подобно е и съотношението на размер b2 за същия образец. Подробен оглед на образец 11 показва недобро оформяне на лингвалните повърхнини на двете мостови тела. Всички образци са получени със сравнително точна дължина – L (33,90-34,00 mm), като максималното отклонение е 0,1 mm. Като се има предвид добрата точност на дължината на мостовите и метода за получаване на дублажните восъчни модели, то най-вероятно дефектите в мостовите тела на образец 11 са получени вследствие свиването на восъка и недостатъчното му захранване в процеса на втвърдяване на восъчния модел.

Таблица 3 показва размерите на елементите на 4-членни мостове, отлети по дублажни модели, изработени чрез прототипиране. Максималното отклонение на всички размери варира между 0,07 mm – 0,22 mm, което е около три пъти по-малко в сравнение с това на мостовите, изработени с модели от силиконов ключ. Средните размери на елементите на мостовите, отлети с восъчни модели по силиконов ключ са по-големи от тези на основния мост-модел с изключение на дължината.

размер	a1	a2	a3	b1	b2	L
образец 11	4,70	5,10	5,60	6,59	7,77	34,00
образец 12	4,70	5,20	5,85	7,27	8,98	33,94
образец 13	4,60	5,20	5,85	7,48	9,16	34,00
образец 14	4,70	5,40	5,90	7,42	8,87	33,90
образец 15	4,40	5,20	6,30	7,63	9,31	33,92
среден размер, mm	4,62	5,22	5,90	7,28	8,82	33,95
максимално отклонение, mm	0,30	0,30	0,70	1,04	1,54	0,10
Основен мост-модел	4,55	5,10	5,80	7,28	8,63	34,00

Таблица 2 Размери на 4-членни мостове, изработени чрез дублажни модели със силиконов ключ [mm]

размер	a1	a2	a3	b1	b2	L
образец 21	4,40	5,00	5,80	7,43	8,55	34,00
образец 22	4,40	5,00	5,90	7,37	8,48	33,80
образец 23	4,40	4,90	5,90	7,21	8,48	33,80
образец 24	4,50	5,00	5,90	7,38	8,50	33,80
образец 25	4,40	4,90	5,90	7,27	8,49	34,00
образец 26	4,40	5,00	6,00	7,27	8,52	33,80
среден размер, mm	4,42	4,97	5,90	7,32	8,50	33,87
максимално отклонение, mm	0,10	0,10	0,20	0,22	0,07	0,20

Таблица 3 *Размери на 4-членни мостове, отлети по дуближни модели, получени посредством прототипиране [mm]*

Разликите варират между +0,07/+0,19 mm. Докато средните размери на почти всички елементи на мостовете, изработени от въсъчни прототипирани модели са по-малки с около - 0,13mm от тези на основния мост-модел.

Изводи

1. В зависимост от използваната технология, точността на образците е различна. Размерите на мостовете, отлети по въсъчни модели, изработени със силиконов ключ, са по-големи от тези на основния мост-модел. Максималното отклонение на размерите на техните елементи варира в широки граници – от 0,30 mm до 1,54 mm. Мостовете, отлети с прототипирани въсъчни модели са с по-малки размери от тези на основния мост-модел. Тяхното максимално отклонение е между 0,07 mm - 0,22 mm, т.е. почти 3 пъти по-малко от това на мостовете, отлети с модели от силиконов ключ.

2. Мостовите конструкции, произведени с помощта на прототипирани дуближни модели са със значително по-висока точност по отношение на форма и размери в сравнение с мостовете, изработени по въсъчни модели от силиконов ключ.

3. Едно безспорно предимство на новите CAD/CAM технологии спрямо класическите методи, е възможността да се изработват на практика възстановявания с едно посещение от страна на пациента.

4. Друго важно преимущество на бързото прототипиране пред конвенционалните методи е, че тук не е необходимо оптимизиране на конструкцията от технологична гледна точка. Могат да бъдат изработвани физически модели със сложна форма, които по друг начин биха били неоправдано скъпи или дори невъзможни за изработване. По някои от методите с добавяне на материал се изработват окончателно готови детайли със сложна форма като ендопротези за човешкото тяло или изделия за аеро-космонавтиката и др. Също така получените модели могат да се използват в по нататъшно изработване на леярски форми за получаване на серия от детайли със сложни скулптурни повърхнини и черупкови форми.

Приноси

Научно-приложни приноси

1. Анализирани са съществуващите индустриални технологии за бързо изграждане на дентални импланти работещи с добавяне на материал. Направен е обоснован избор на две алтернативни иновативни технологии (извън конвенционалната) за изграждане на зъбни импланти.

2. Разработена е методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти чрез използването на различни технологии: 3D сканиране, формиране на виртуално копие на сканирания обект, създаване на негова база в специализиран дентален CAD пакет 3D модел на импланта, създаване на управляваща програма и изработване с прототипираща машина по технологията SLM.

Приложни приноси

1. Направен е подробен анализ на иновативната технология селективно лазерно разтопяване - selective laser melting (SLM), като същата е пригодена за практическите цели и нужди на дентологията. С нея са създадени дентални импланти с добри физико-механични и точносни показатели.

2. Разработената методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти е апробирана за проектиране и изработване на стоматологични импланти за различни типове технологии с добавяне на материал и с отнемане на материал, посредством използването на различни специализирани дентални CAD/CAM софтуерни системи.

3. Доказано е експериментално, че с помощта на 5 основното фрезозване се получава по-добро качество на обработените повърхнини, защото се избягва недостатъка на триосните машини с невъзможността за динамично поддържане на ъгъла между оста на инструмента и нормалата към повърхнината в точката на контакта, което е особено значимо при комплексните форми на имплантите. Именно с помощта на 5 основното фрезозване са изработени денталните импланти посредством метода на отнемане на материал.

4. Чрез проведените експерименти е доказано, че мостовите конструкции, които са създадени с помощта на прототипирани дуближни модели, са със значително по-висока точност по отношение на форма и размери в сравнение с мостовете, изработени по конвенционалните методи посредством направата на восъчни модели от силиконов ключ.

5. Адекватността и приложимостта за практически цели на създадената методика за проектиране и изготвяне на дентални импланти е апробирана и валидирана в множество от реално изградени модели на дентални импланти.

Публикации по дисертацията

1. Митов В. "Нови методи за създаване на дентални импланти", част 1, Конструктивни етапи, Списание "CAD ДАЙДЖЕСТ", януари, 2012 г.;
2. Тодоров Г., Митов В., Николов Н., "Нови методи за създаване на дентални импланти", част 2, Технологични методи за производство, Списание "CAD ДАЙДЖЕСТ", АМТЕХ 2012 г., 27-ма Международна научна конференция;
3. Тодоров Г., Митов В., Върбанов Б., Софронов Я., Изследване на възможностите за изграждане на зъбни импланти чрез технологията "селективно лазерно разтопяване" в ТУ - София, Международна конференция по роботика, автоматизация и мехатроника, РАМ 2012 г. 15 октомври;
4. Todorov G., Mitov V., Nokolov N., Sofornov Y., Изграждане на зъбна метална конструкция тип носеща вложка чрез технологията „селективно лазерно разтопяване“ в ТУ – София. Usage of „selective laser melting“ technology capabilities implementation for teeth implants metal construction in tu-sofia.
Списание „RECENT“ Vol.15, no. 1 (41), March, 2014 г.;
5. Тодоров Г., Митов В., Върбанов Б., Софронов Я., Христов Х., 3D Реконструирание от томографски изображения на челюстна кост за субпериостални импланти и практическото и приложение.; Списание „Машиностроене и електротехника“, брой № 9, 2014 г.
6. Тодоров Г., Митов В., Николов Н., Софронов Я., Методика за 3D реконструирание от томографски изображения на кости и практическото и приложение при изграждане на импланти;
Списание „CAD ДАЙДЖЕСТ“, ноември 2014 г.

ABSTRACT

RESEARCH TECHNOLOGY FOR RAPID BUILD DENTAL IMPLANTS

Made a thorough historical review of the development of dental technology to date, they have highlighted their specific problems, explained the necessity of the emergence of new innovative approaches - using specialized CAD/CAM software systems. With their help design and manufacture of implants are placed in a functional new level, which is unique in comparison with the existing up to the present methods. A comprehensive overview of the most popular dental CAD/CAM packages. Presented an introduction to industrial technologies to quickly build dental implants, working with the addition of material. The basic technological approaches explained is their principle of operation, referred to are their technological advantages and disadvantages. Formed type selection technology, which is used for the purpose of research, namely, selective laser melting technology. Designed and created various types of dental implants using a specialized dental CAD package EXOCAD. The methodology presented in the construction of dental implant type three-member bridge construction and bearing insert a "cap". Detailing the different stages in the technology. In the CAD system is made complicated three-dimensional modeling of the received 3D scanner information to the creation of dental implants "bridge" and "cap". Then, with the help of the software product AutoFab, formed a management program for their construction machine working on technology to quickly build by adding material. A method for the design and preparation of dental implants, which was proved synchronized approach to work through the use of various technologies: 3D scanning, forming a virtual copy of the scanned object, creating a base in specialized dental CAD package of 3D model of the implant, creating a

control program and working with a rapid prototyping machine technology SLM. Shown technological approach and formed the methodology for the creation of alternative dental implant technology by working with material removal (milling). Modeling three-dimensional structure of dental implants in a CAD package are created in specialized CAM system SUM3Dental digital programs for milling. The process is verified for errors and collisions, postprocessing is performed and dental implants are made of 5-axis digital milling different types of material - zirconium, technical wax and chrome-cobalt. A detailed analysis of the three and five-axis strategies for digital processing. Prominent are the advantages and disadvantages. Formed is a valid option will be used in this research operation. A detailed analysis of dental implants produced by different technologies, they are carried out precise measurements of geometric accuracy and deviations of form. The methodology for the design and preparation of dental implants is probated for design and manufacture of dental implants for different types of technologies by adding material and removing material, using various specialized dental CAD / CAM software systems.

Благодарности:

Изказвам благодарност на научния ми ръководител *проф. доц. д-р Георги Тодоров* за безценните съвети и съдействие, в процеса на оформянето ми като специалист и личност, както и на научния ми ръководител доц. д.т.н. инж. мат. Николай Николов, за всеотдайната подкрепа.

Благодаря на *екипа на лаборатория "CAD/CAM/CAE в Индустрията"*, за тяхната помощ, сътрудничество и споделянето на инженерен опит.

Благодарности и на *катедра ТММ*, обучавала ме през годините и предоставила ми възможност чрез преподаваната методологията да израстна като специалист, както и за предоставената организационна помощ при разработването на дисертационния труд.

Особена благодарност бих желал да изкажа на *родителите си*, както и на *цялото ми семейство* за оказаната подкрепа и насърчение за довеждане на дисертационната работа до завършен вид.

От автора