



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
„ПРОФ. Д-Р ПАРАСКЕВ СТОЯНОВ“

ФАКУЛТЕТ ПО ДЕНТАЛНА МЕДИЦИНА

**КАТЕДРА ПО ДЕНТАЛНО МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И
ПРОПЕДЕВТИКА НА ПРОТЕТИЧНАТА ДЕНТАЛНА
МЕДИЦИНА**

Д-р Преслав Пламенов Пенчев

**ЛЕТИ МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИИ ПО 3D ПРИНТИРАНИ
ПРОТОТИПИ ЧРЕЗ ЛАЗЕРЕН СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ
ПРИНТЕР**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд
за придобиване на образователно-научна степен „Доктор“
Научна специалност: Ортопедична стоматология

Научен ръководител:
Доц. д-р Стоян Георгиев Кацаров, д.м.

Варна
2020

Дисертационният труд съдържа 142 страници, включващи 4 таблици и 78 фигури. Цитирани са 180 литературни източници, от които 26 на кирилица и 164 на латиница.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на заседание на Катедрен съвет на катедра „Дентално материалознание и протепедвтика на протетичната дентална медицина“, Факултет по дентална медицина към Медицински университет „Проф. д-р Параскев Стоянов“ - Варна, на 02.12.2020г.

Научно жури:

Председател:

Доц. д-р Христина Иванова Арнаутска, д.м. – вътрешен член

Членове:

Проф. д-р Стефан Иванов Сиромашки, д.м. – външен член

Проф. д-р Георги Рангелов Тодоров, д.м. – външен член

Доц. д-р Илиан Вангелов Христов, д.м. – външен член

Доц. д-р Ивета Пламенова Катрева, д.м. – вътрешен член

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.02.2021 г. от 11:00 ч. на открито заседание на Научното жури във виртуалната зала на електронната платформа на Blackboard на МУ-Варна.

Материалите по защитата са на разположение в Библиотеката на Медицински университет - Варна и са публикувани на интернет страницата на МУ.

СЪДЪРЖАНИЕ

Използвани съкращения	4
Увод	5
Първа глава: Цел и задачи	6
Втора глава: Материали и методика на експеримента	8
Трета глава: Сравнителен анализ на физичните промени и наличния пепелен остатък при термична обработка на материали, използвани за фрезоване, CAD/CAM и полимери за селективна лазерна полимеризация, предназначени за заместване с дентални сплави	22
Четвърта глава: Сравнителен анализ на точността при материализиране на дигитални прототипи, изработени чрез 3D принтер, по технологията селективна лазерна полимеризация.	33
Пета глава: Изследване на влиянието на вида на структурата на принтирани тела, изработени от Castable Resin [®] и Castable Wax [®] , при подготовката на отливната муфа за леене, при различни температурни режими и опаковъчни маси.	44
Шеста глава: Подобряване на условията за леене посредством предварителна софтуерна оптимизация на прототипите преди тяхното принтиране.	54
Изводи	58
Заклучение	58
Приноси	60
Публикации свързани с дисертационния труд	62

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

ПММА – Полиметилметакрилат

ADA – American Dental Association

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design

CAD/CAM – Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing

DLP-SLA – Digital Light Processing Stereolithography

FDM – Fused Deposition Modeling

IJP – Inkjet Printing

LCD – Liquid Crystal Display

LED – Light-emitting Diode

LFS – Low Force Stereolithography

MSLA – Masked Stereolithography

SEBM – Selective Electron Beam Melting

SLA – Stereolithography

SLM – Selective Laser Melting

SLP – Selective Laser Polymerization

SLS – Selective Laser Sintering

УВОД

Сравнително ново направление в денталната медицина е технологията за послойно изграждане на протезни конструкции. Според американското общество за тестване и материали (American Society for Testing and Materials, ASTM) технологиите за изработване на детайли чрез добавяне на материал се дефинират по следния начин: „Процес, противоположен на технологиите за изработване чрез отнемане на материал, при който обектът се изработва от триизмерен модел чрез присъединяване на материал слой по слой.“. Незаменимо качество на адитивните технологии е, че предоставя възможност да се създават сложни детайли по отношение на своята повърхност и сърцевина. Наред с това позволяват изработването на редица обекти едновременно, като по този начин спестяват време и дават възможност за материализиране на детайли, чието създаване досега е било невъзможно. В денталната медицина, адитивните технологии могат да се използват за изработка на протезни конструкции, техни прототипи, които в последствие да бъдат отлети, или работни модели, които да служат за завършване на протезната конструкция.

Един от най-достъпните и развити (респективно широко застъпени в денталната медицина) методи за 3D принтиране е стереолитографията. Това е технология позната на човечеството от близо четири десетилетия, но въпреки това продължава търсенето на решения на някои фундаментални въпроси. Заедно с това интерес за практиката представлява интегрирането на този съвременен подход в конвенционалните методи на изработка на протезни конструкции. Именно поради тази причина целта на настоящия научен труд е да се проучат възможностите за изработване на лети метални конструкции по 3D принтирани прототипи чрез лазерен стереолитографски принтер, както и да се подобрят условията за леене, чрез интегриране на иновативни технологични подходи.

ПЪРВА ГЛАВА

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ

ЦЕЛ:

Целта на настоящия дисертационен труд е да се проучат възможностите за изработване на лети метални конструкции по 3D принтирани прототипи чрез лазерен стереолитографски принтер.

За постигането на поставената цел трябва да се решат следните задачи:

ЗАДАЧИ:

1. Сравнителен анализ на физичните промени и наличния пепелен остатък при термична обработка на материали, използвани за фрезование, CAD/CAM и полимери за селективна лазерна полимеризация, предназначени за заместване с дентални сплави.
 - 1.1. Сравнителен анализ на физичните промени по време на термична обработка на пробни тела, изработени от материали използвани за фрезование, CAD/CAM и полимери за селективна лазерна полимеризация.
 - 1.2. Сравнителен анализ на наличния пепелен остатък след термична обработка на обследваните пробни тела.
2. Сравнителен анализ на точността на материализиране на дигитални прототипи, изработени чрез 3D принтер, по технологията селективна лазерна полимеризация.
 - 2.1. Сравнителен анализ на точността на принтиране на пробни тела в зависимост от посоката им на ориентация, при два вида смоли за леене.
 - 2.2. Оценка на влиянието на структурата върху точността на тела от Castable Resin[®] и Castable Wax[®].
 - 2.3. Оценка на влиянието на постполимеризационния процес върху точността на обектите от Castable Resin[®].

3. Изследване на влиянието на структурата на принтирани тела, изработени от Castable Resin[®] и Castable Wax[®], при подготовката на отливната муфа за леене, при различни температурни режими и опаковъчни маси.
4. Подобряване на условията за леене посредством предварителна софтуерна оптимизация на прототипите преди тяхното принтиране.
 - 4.1. Оптимизиране на условията за леене чрез дигитално проектиране и 3D принтиране на обектите, заедно и монолитно с индивидуализирана отливна система.
 - 4.2. Подобряване на условията за леене чрез дигитално проектиране и 3D принтиране на обектите, заедно и монолитно с индивидуализирана леякова система, отливен пръстен и отливен конус.

ВТОРА ГЛАВА

МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

За изследване и решаване на съответните проблеми по поставените задачи, са използвани следните материали и опитни постановки.

Материали и методика по задача 1.

Предлаганите материали за изработване на прототипи от Formlabs™, за Form 2® 3D принтер, биха могли да се използват за получаване на лети метални обекти по метода на термично елиминиране на първичния прототип. Ключов момент са температурно индуцираните физични промени и количеството на неизвлекаемия пепелен остатък, който би влошил качествата на металната отливка.

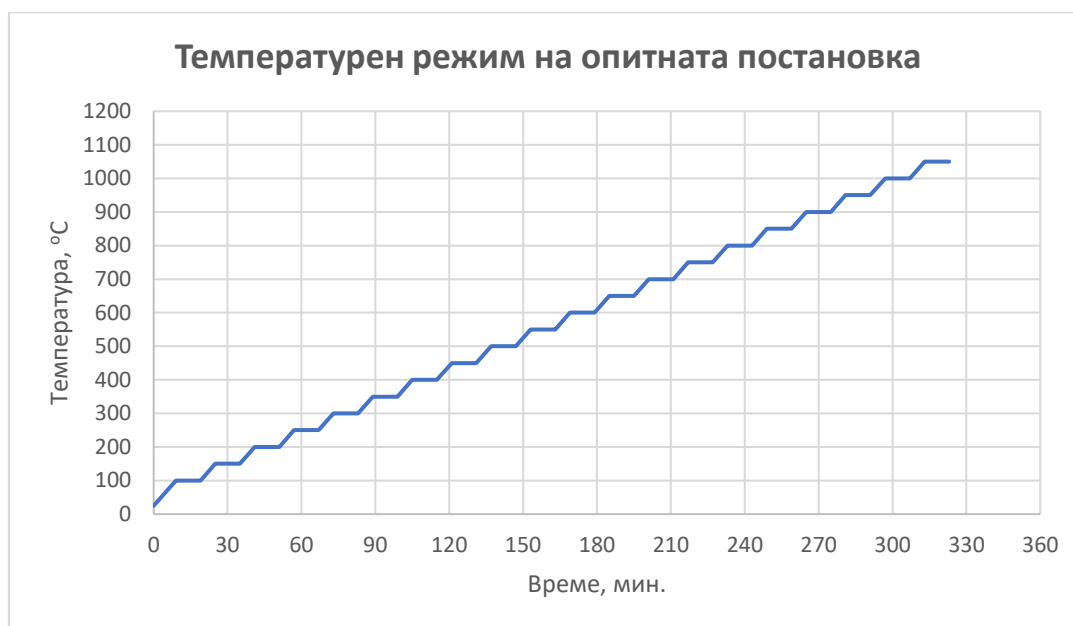
За целите на **подзадача 1** са изработени четири идентични пробни тела от следните материали: Pattern Resin LS™ (GC™), C-cast (KaVo Dental™), CAD/CAM wax (Yeti Dental™), Castable Resin® FLCABL02 (Formlabs™).

За изграждането на пробно тяло от Pattern Resin LS™ (GC), е използвана цилиндрична силиконова форма с диаметър 20 мм. и височина 20 мм., която се изпълва с обследвания материал, който е оставен да полимеризира в нея. Идентични по размери и форма дигитални обекти са създадени и изрязани от C-cast® (KaVo Dental™) и CAD/CAM wax (Yeti Dental™) по технологията CAD/CAM. Последният детайл е 3D принтиран по технологията селективна лазерна полимеризация от Castable Resin® FLCABL02 (Formlabs™). **Фиг.1.**



Фиг.1. На снимката от ляво на дясно са изобразени опитните тела както следва: CAD/CAM wax (Yeti Dental™), C-cast® (KaVo Dental™), Pattern Resin LC® (GC™) и Castable Resin® (Formlabs™).

За целите на задачата е изработена още и специална огнеупорна поставка от опаковъчна маса Sherafina[®] Rapid (SHERA[™]). Поставката има четири гнезда, които са предназначени за позициониране на обследваните тела. Пробните обекти са поставени в съответните гнезда, след което поставката е въведена в пещ Miditherm[®] 100 MP, BEGO[™], при стайна температура (25°C). Поетапно температурата в пещта се покачва до 1050 °C, като се наблюдават измененията в пробните тела. **Фиг.2.**



Фиг.2. На графиката е изобразен използваният за опита температурен режим. Поставката с опитните тела се въвежда в пещта при температура от 25°C, която се покачва със стъпка от 9°C/мин., а на всеки 50°C се задържа за 10 мин. Изключение прави първата задръжка, която е направена на 100°C.

За обследване на целите по **подзадача 2**, след достигане на 1050°C, огнеупорната поставка е изведена от пещта и е оставена да се охлади до стайна температура. С помощта на аналитична везна е обследвано количеството на извлекаемия пепелен остатък след изгаряне на пробните тела.

Материали и методика по задача 2.

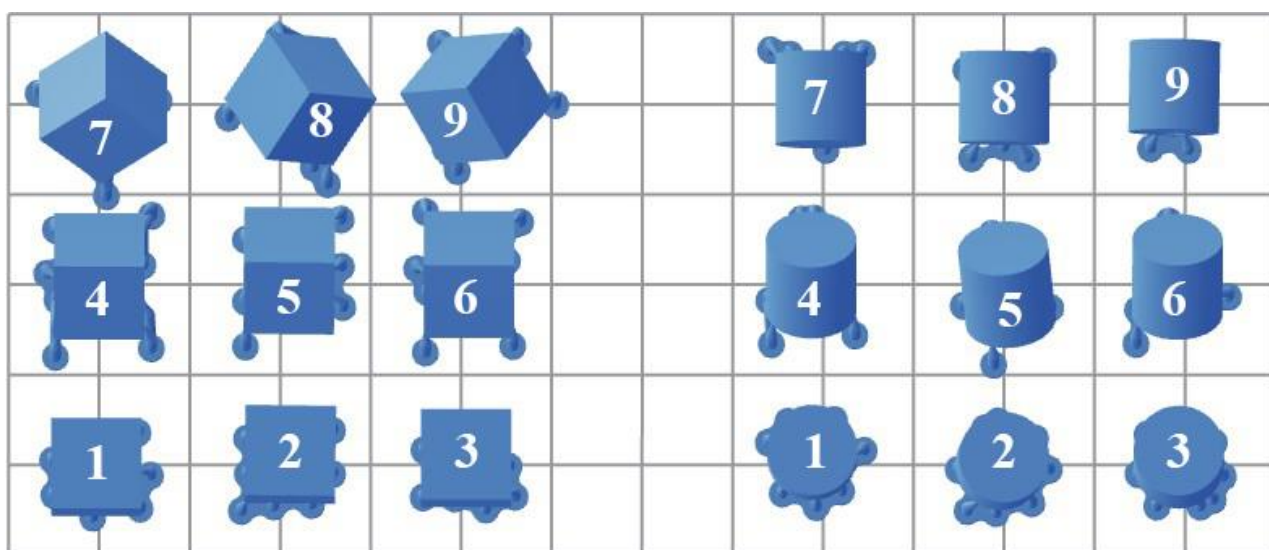
Изработването на 3D принтирани прототипи може да бъде повлияно в различна степен от вида на смолата, ориентацията при принтиране, структурата на телата, както и от характера на процесите на постобработка.

За оценка на влиянието на тези фактори са генерирани дигитални образци с форма на куб и цилиндър и размери 10 мм. X 10 мм. X 10 мм. (съответно по осите x, y и z). Всички кубове са ориентирани с основа, линеен ъгъл или обемен ъгъл

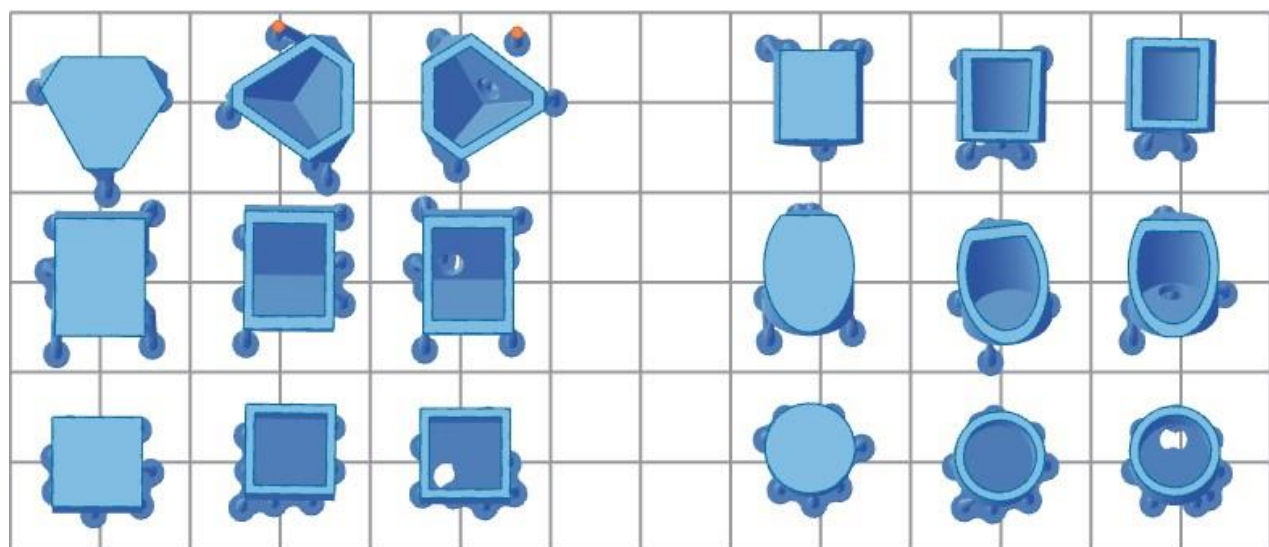
към площадката за изграждане, а цилиндрите – с основа към платформата, в хоризонтално положение и под ъгъл от 45°. Заедно с това принтираните тела с форма на куб и цилиндър са генерирани като плътни, кухи и кухи детайли с отвор.

Генерираните дигитални образци са принтирани чрез метода на селективна лазерна полимеризация, с помощта на 3D принтер Form 2® (Formlabs™), от сертифицираните и препоръчани от производителя смоли за леене - Castable Resin® (Formlabs™) и Castable Wax® (Formlabs™). Детайлите са изработени с дебелина на всеки положен слой от 25 µm, като е подбрана подходяща плътност на подпорните структури, включително и вътрешни подпори за кухите тела.

Фиг.3. Фиг.4.



Фиг.3. На изображението схематично са представени тела от интерфейса на PreForm®, които предстои да бъдат изработени от смола Castable Resin®.



Фиг.4. Срез на дигиталните образци през средата, в направление перпендикулярно на посоката на принтиране.

Направени са по 10 измервания във всяка равнина (x, y, z), с помощта на дигитален микрометър, с точност до 1µм. (1×10^{-6} м.).

За целите на **подзадача 1** е изготвен сравнителен анализ на измерванията на шестте групи тела, според позицията им спрямо площадката, като са изчислени и сравнени стойностите за средното отклонение спрямо дигиталния образец на идентични групи, изработени от Castable Resin[®] и Castable Wax[®].

За целите на **подзадача 2** е изготвен сравнителен анализ на измерванията на шестте групи тела (според структурата им), като са изчислени и сравнени стойностите за средното отклонение спрямо дигиталния образец на идентични групи, изработени от Castable Resin[®] и Castable Wax[®].

За целите на **подзадача 3** са използвани вече изследваните опитни тела от Castable Resin[®]. Обследваните обекти са подложени на постполимеризационен процес, в съответствие с изискванията и предписанията посочени от производителя, като след това са направени идентични измервания на телата по осите x, y и z. Изготвен е сравнителен анализ на отклоненията в идентични групи тела (според структурата си) преди и след процеса на постполимеризация.

Материали и методика по задача 3.

Механизмът на елиминиране на първичния прототип при стереолитографските смоли се различава от този при елиминирането на восъчните прототипи, по това че настъпва директна сублимация, а именно превръщане на твърдо тяло в газ. От ключово значение са тегловното количество на материала и използвания температурен режим.

Освен голямото термично разширение, което търпят, обемистите тела при определен режим могат да предизвикат масивен газов напор върху стените на муфата и да я фрактурират. В опит за решаването на този проблем, фирмите производители разработват стереолитографски смоли със съдържание на восък. Независимо от това значителна част от обема на 3D принтираните прототипи е съставена от смола, което е причина за възникване на описаните явления и в резултат - фрактуриране на муфите при определени условия.

За обследване на хипотезите по задачата са принтирани идентични пробни тела с форма на цилиндър по технологията селективна лазерна полимеризация, с помощта на 3D принтер Form 2[®] (Formlabs[™]), от сертифицираните и препоръчани от производителя смоли за леене - Castable Resin[®] и Castable Wax[®]. Принтираните обекти са проектирани и изработени в два размера, като детайлите

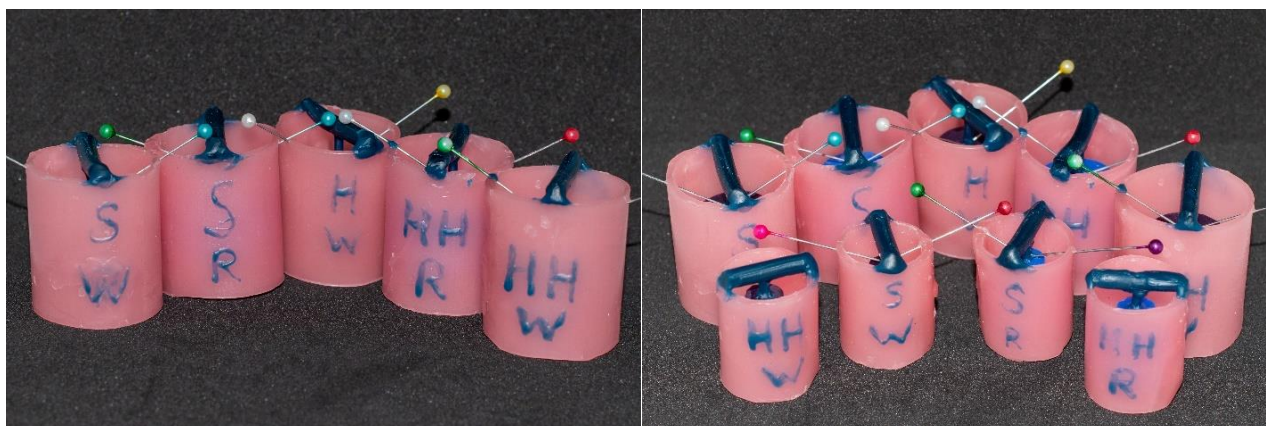
от всяка смола и всеки размер могат да се обединят в три групи според структурата си: плътни тела, софтуерно модифицирани до постигане кух объект без отвор и такива с отвор. **Фиг.5.**



Фиг.5. На фигурата е изобразен по един представител от изработените групи пробни обекти. Телата, 3D принтирани от смола Castable Wax[®], имат форма на цилиндър и биват: кухи, кухи с отвор и плътни, с размери: диаметър – 20 мм., височина – 20 мм. и такива с диаметър 10 мм. и височина 20 мм. Идентични по форма, размер и структура тела са представени и от смола Castable Resin[®].

Изработени са още отливни пръстени от розов восък Cavex Set Up Wax (Cavex[™]) и индивидуализирани размери, така че да се осигури поне 5 мм. отстояние между детайлите и стената на пръстена.

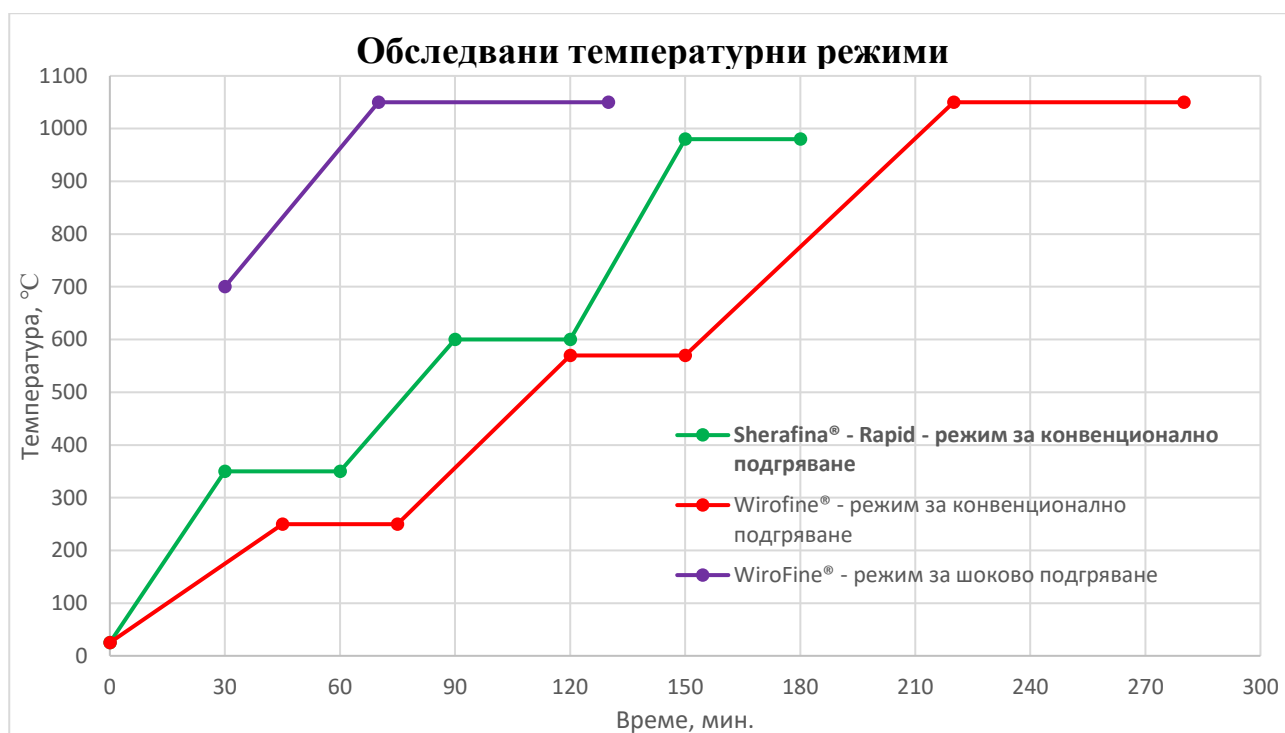
Преди опаковане опитните тела са фиксирани към отливния пръстен посредством восък, така че да отстоят на 5 мм. от всички стени на муфата. По външната повърхност на отливния пръстен е обозначена структурата на опакованото тяло. **Фиг.6.**



Фиг.6. На фигурата са изобразени фиксирани за отливните пръстени

пробни тела. По външната повърхност на всеки пръстен е маркиран вида на пробното тяло, което е опаковано: SW – плътно тяло от Castable Wax[®], HW – кухо тяло от Castable Wax[®], HHW – кухо тяло с отвор от Castable Wax[®], SR – плътно тяло от Castable Resin[®], HHR – кухо тяло с отвор от Castable Resin[®].

Телата са опаковани с един отливен щифт, като са използвани два вида опаковъчни маси: WiroFine[®] (BEGO[™]), предложена от фирмата производител на смолите - Formlabs[™], и Sherafina[®] - Rapid (SHERA[®]). След това муфите са подложени на стандартни термични режими за подготовка за леење на неблагородни сплави, съответстващи на предложените и сертифицираните от производителя на използваните опаковъчни маси. **Фиг.7.** За подгръването на муфите е използвана пещ Miditherm[®] 100 MP, BEGO[™].



Фиг.7. Графика на използваните температурни режими за подготовка на муфите за леење.

Обследвани са следните опитни постановки:

- Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леење, изработена от Sherafina[®] Rapid и конвенционален режим на подгръване. **Фиг. 8.**



Фиг.8. Изработените муфи, въведени в пещта при температура от 25°C.

- Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леене, изработена от WiroFine® и конвенционален режим на подгряване. Фиг.9.



Фиг.9. Муфи с опаковани пробни тела с помощта на опаковъчна маса WiroFine® (BEGO™), поставени в пещта при температура от 25°C.

- Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леене, изработена от WiroFine® и режим на шоково подгряване. Фиг.10.



Фиг.10. Муфи с опаковани пробни тела с помощта на опаковъчна маса WiroFine® (BEGO™), поставени в пещта при температура от около 700°C.

Проведени са десет идентични опита при описаните условия и е направена оценка на наличието на фрактури по повърхността на муфите по време на покачване и след достигане на крайната температура. Резултатите са обработени и представени графично и чрез снимков материал.

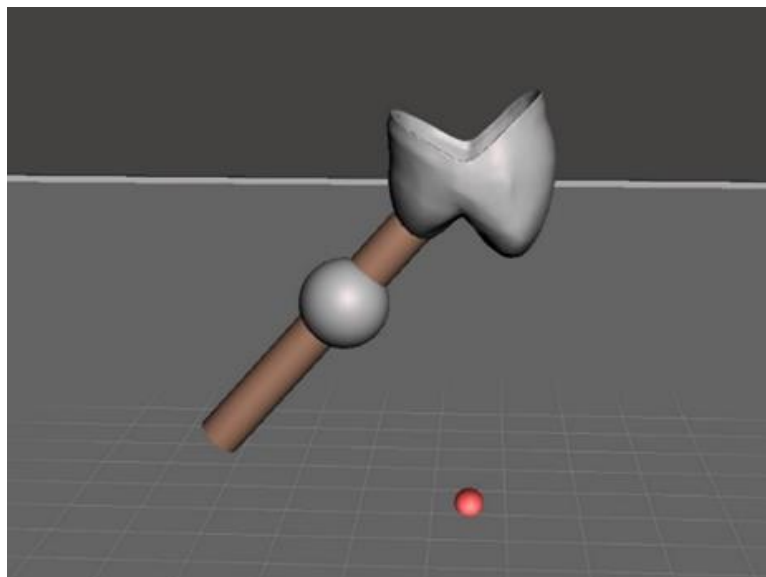
Материали и методика по задача 4.

Правилното ориентиране на отливните прототипи в отливната муфа е критично ключов момент за правилното им заместване. В конвенционалните техники за фиксиране на обектите се използват материали (восъци), които са склонни да проявяват свойството течене, като се деформират под действието на различни физични фактори, вкл. и собственото си тегло. За да се елиминира влиянието на спомагателните материали и прецизира ориентацията на обектите според индивидуалните особености на конкретната технология за леене, е разработен метод за дигитално позициониране на обекти при налична муфа с известни размери.

За нуждата от обследване на методиката по **подзадача 1** са използвани файлове с разширение .stl, съдържащи дигитални прототипи на цели обвивни корони от различни (в морфологично отношение) групи зъби. Съдържанието на файловете, а именно шест дигитални прототипа на цели обвивни корони (2 броя - за горночелюстни централни резци, 2 броя - за първи горен премолар и 2 броя - за първи горен молар) са обработени със специализиран немедицински софтуер за триизмерно проектиране и оптимизиране (Autodesk Meshmixer®, Autodesk, Inc.), като са подготвени за вакуумно леене с неблагородна кобалт-хром-молибденова сплав.

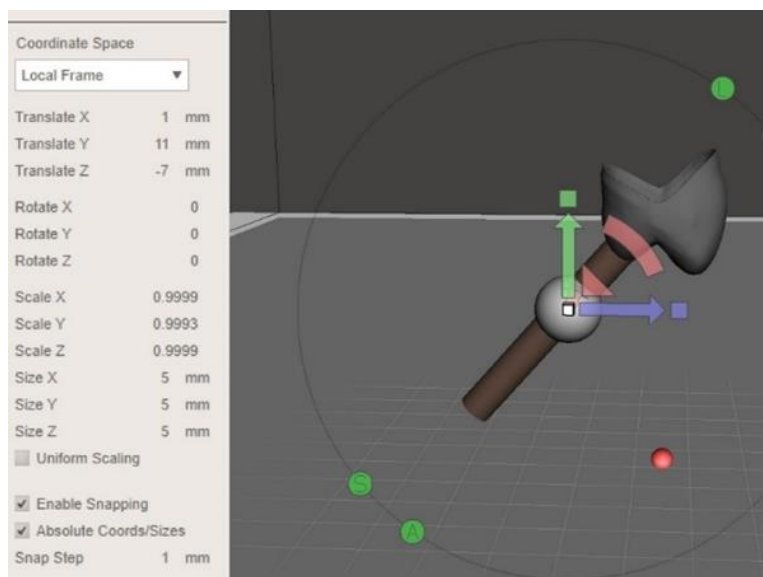
Непосредствено след импортиране в софтуера короните са позиционирани спрямо размерите на желаня отливен пръстен, така че да са в най-благоприятната по отношение на леенето позиция. Последващата обработка се състои в генериране на дигитални образи на отливни щифтове с диаметър 2,5 мм., като в същото време тяхната дължина е така подбрана, че да бъде достатъчна, за да осигури разстояние между короните и отливния пръстен от 5 мм. до 8 мм. Щифтовете са прецизно позиционирани, така че векторът им да съвпада с най-големия диаметър на дигиталния прототип, след което са фиксирани за дигитален отливен конус.

След фиксиране на отливните щифтове се пристъпва към генериране на дигитални образи на смукателни глави. Те са подбрани да бъдат с диаметър 5 мм. и са така позиционирани по протежение на отливните щифтове, че да съвпадат с термалния център на муфата. **Фиг.11.**



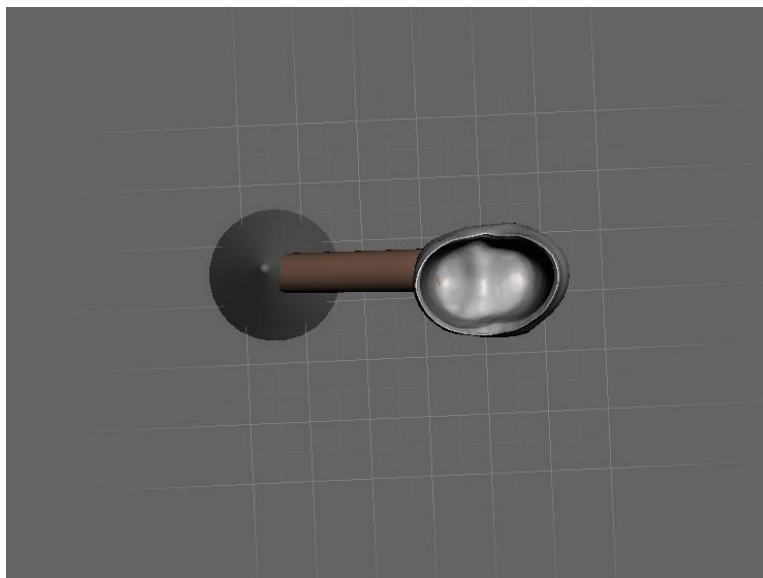
Фиг.11. Дигитален образ на коронка с фиксиран щифт и сферично резервно депо за метал.

Веднага след генериране на всеки дигитален обект софтуерът автоматично зарежда специален инструмент – „Transform tool“, който позволява прецизно задаване на желаните размери на детайла, а също и неговото точно позициониране в триизмерното пространство. **Фиг.12.**



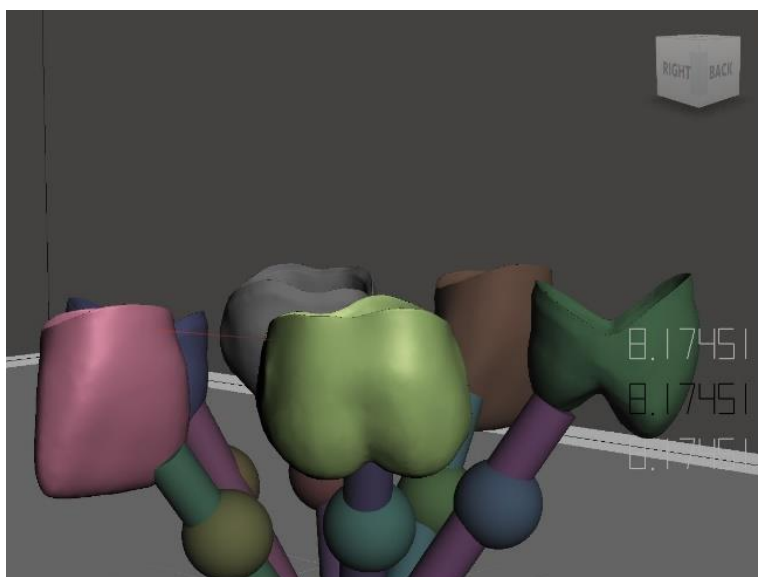
Фиг.12. Софтуерът дава възможност за задаване на размери на създаваните обекти в трите равнини (x,y,z).

Веднъж щом отливната система е генерирана и компонентите ѝ са фиксирани в желаната позиция, е желателно да се направи проверка. В този ред на мисли тя може да се осъществи чрез специалната мрежа интегрирана в софтуера, когато не е нужна голяма прецизност, или чрез специален инструмент за измерване, когато се изисква по-голяма точност. **Фиг.13.**



Фиг.13. Интегрираната мрежа осигурява задоволителна точност при определяне и проверка на позицията на коронковия прототип по отношение на размерите на отливния пръстен.

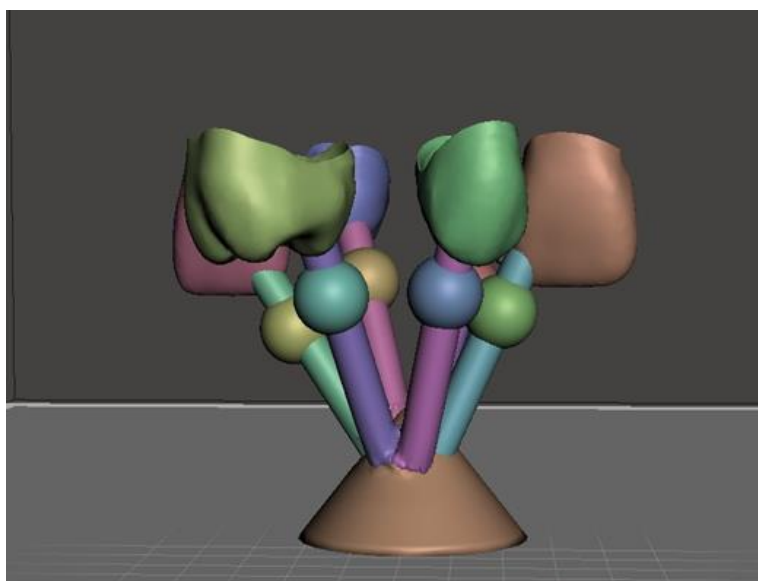
Когато по-голяма прецизност е нужна, може да бъде използван специален измервателен инструмент на софтуера – „Measuring tool“. **Фиг.14.**



Фиг.14. Инструментът позволява измерване на разстоянието между отделните генерирани и импортирани детайли в милиметри с точност до 1×10^{-5} мм.

С помощта на описаните инструменти, отделните детайли на отливната система са позиционирани с изключително голяма точност спрямо размерите на избрания отливен пръстен - Rapid-Ringless-System® (BEGO™).

Веднъж след като дигиталните образи на короните са позиционирани спрямо отливния пръстен, следва подреждане на компонентите на отливната система. Процесът започва от една произволно избрана корона и продължава за всяка една последователно до изграждане на цялата система. **Фиг.15.**



Фиг.15. На изображението са представени дигитални прототипи на коронки, с фиксирани отливни цифтове, резервни депа за метал и дигитален образ на

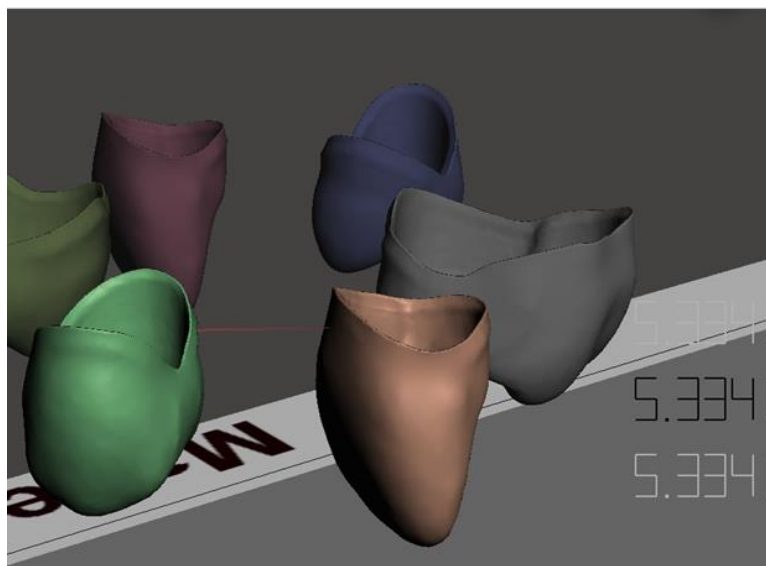
отливен конус, който в конкретната опитна постановка е така проектиран, че да служи за стабилна основа за свързване на системата с фабричния отливен конус.

Детайлите са материализирани по метода на селективна лазерна полимеризация от смола Castable Wax[®] (Formlabs[™]), с помощта на 3D принтер Form 2[®] (Formlabs[™]).

Твърде често в практиката се налага отливането на различни по брой и обем конструкции. Това, както и произтичащата нужда от голям набор от отливни пръстени с различни размери, са причина за разработването на метод за създаване на пръстен с индивидуализирани и оптимални параметри, продиктувани от конкретен набор от обекти за леене.

За обследване на методиката по **подзадача 2** са използвани отново STL-файлове, съдържащи дигитални прототипи на различни (в морфологично отношение) цели обвивни корони. Понеже в предложената опитна постановка отливният пръстен и отливният конус ще бъдат индивидуално и дигитално генерирани, то водещи фактори за подреждане на отливаните обекти са броят и размерът им. Разбира се трябва да се имат предвид и възможностите на използвания апарат за леене.

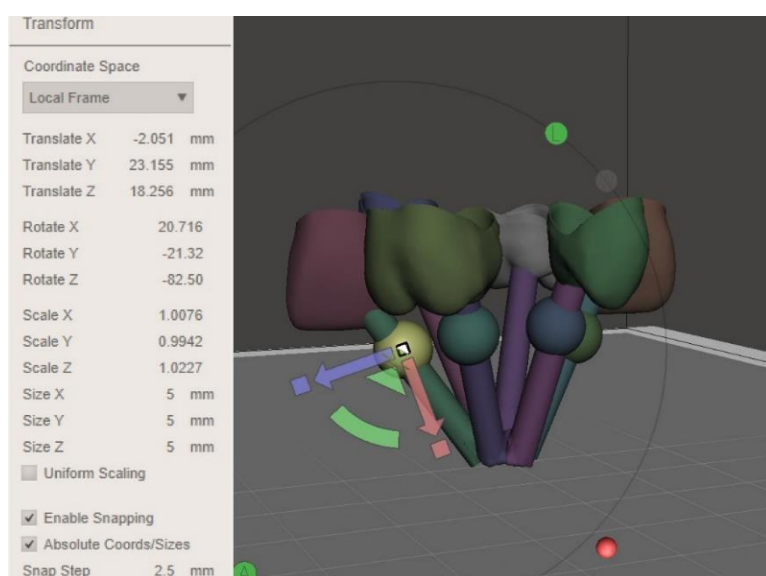
STL-файловете са импортирани в немедицински софтуер за триизмерна обработка на дигитални обекти - Autodesk Meshmixer[®] (Autodesk, Inc.). Прототипите са подготвени за вакуумно леене с неблагородна кобалт-хром-молибденова сплав и апарат Nautilus T[®], BEGO[™]. Детайлите са позиционирани, така че между тях да има отстояние от 5 мм. до 8 мм. По оста **z** прототипите са аранжирани, така че да отстоят на около 5 мм. от минималния възможен размер на муфата. Желаното отстояние може да бъде определено прецизно чрез инструмента „Measuring tool“. **Фиг.16.**



Фиг.16. *Коронковите прототипи са позиционирани на отстояние едни от други в рамките на 5 мм.- 8 мм. между всеки два съседни детайла.*

Следва генерирането и позиционирането на отливните щифтове. Те са така подбрани, че да имат диаметър 2,5 мм., а дължината им да е съобразена с позицията на прототипите. За целта се използва инструментът „Transform tool“, като щифтовете се разполагат по посоката на най-големия диаметър на коронките.

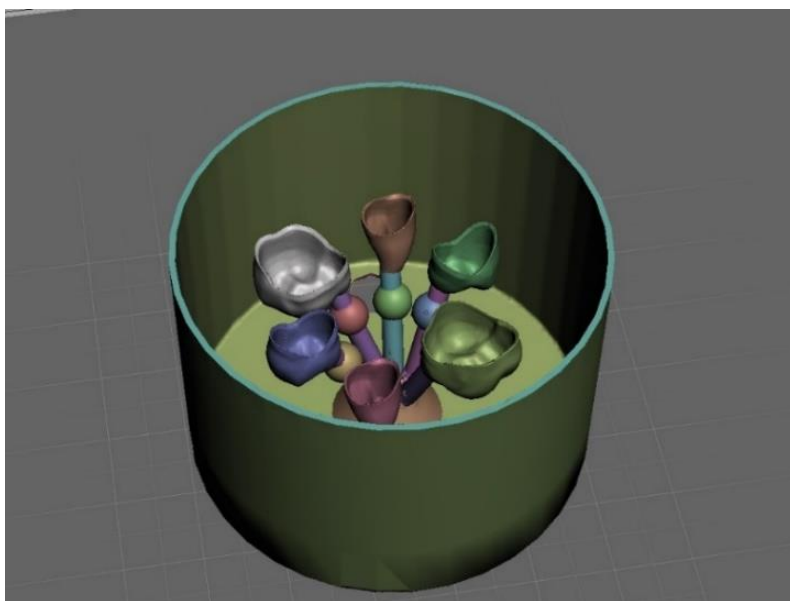
Генерирането на отливна система завършва с изработването и позиционирането на резервни депа за метал. За целите на опитната постановка са подбрани смукателни глави със сферична форма и диаметър 5 мм., които са позиционирани в обсега на термалния център на муфата, с помощта на инструментът „Transform tool“. **Фиг.17.**



Фиг.17. *Сферични смукателни глави с диаметър 5мм. С помощта на „Transform tool“ може да се получи ясна информация за позицията на маркираната смукателната глава.*

Щом отливната система е готова, следва генерирането на отливния конус и последващото свързване на отливните щифтове с него, посредством тяхното удължаване или скъсяване.

Следващата стъпка от опитната постановка е дигиталното проектиране на отливен пръстен, чиито размери са дефинирани от броя, размера както и от конфигурацията на отливната система. Пръстенът е генериран в съответствие със заложеното в обследваната от нас опитна постановка, а именно отстояние на короните от стената на отливния пръстен от порядъка на 5 мм. до 8 мм. **Фиг.18.**



Фиг.18. При втория разработен от нас подход, наред с коронковите прототипи, отливните щифтове, депата от метал, се генерират и дигитални образи на отливен пръстен и отливен конус.

Детайлите са изработени с помощта на 3D принтер Form 2[®] (Formlabs[™]), чрез селективна лазерна полимеризация, от сертифицираната от производителя смола Castable Wax[®] (Formlabs[™]).

ТРЕТА ГЛАВА

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ФИЗИЧНИТЕ ПРОМЕНИ И НАЛИЧНИЯ ПЕПЕЛЕН ОСТАТЪК ПРИ ТЕРМИЧНА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ФРЕЗОВАНЕ, CAD/CAM И ПОЛИМЕРИ ЗА СЕЛЕКТИВНА ЛАЗЕРНА ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕНИ ЗА ЗАМЕСТВАНЕ С ДЕНТАЛНИ СПЛАВИ

Промените в опитните тела са заснети, а снимковият материал е приложен в подкрепа на получените резултати. След изгарянето на пробните обекти, извлекаемият пепелен остатък е събран и изследван с помощта на аналитична везна.

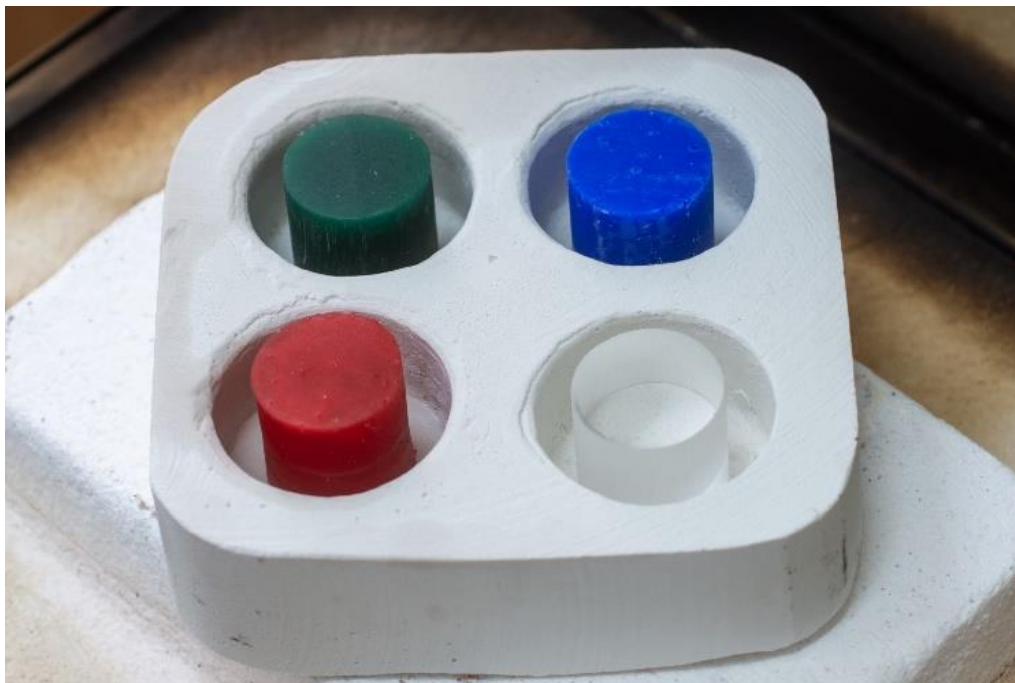
1. Сравнителен анализ на физичните промени по време на термична обработка на пробни тела, изработени от материали използвани за фрезование, CAD/CAM и полимери за селективна лазерна полимеризация.

След въвеждане в пещта и покачване на температурата до 100°C опитните тела не показват никакви визуално доловими промени. **Фиг.19.**



Фиг.19. Опитните тела при температура от 100°C.

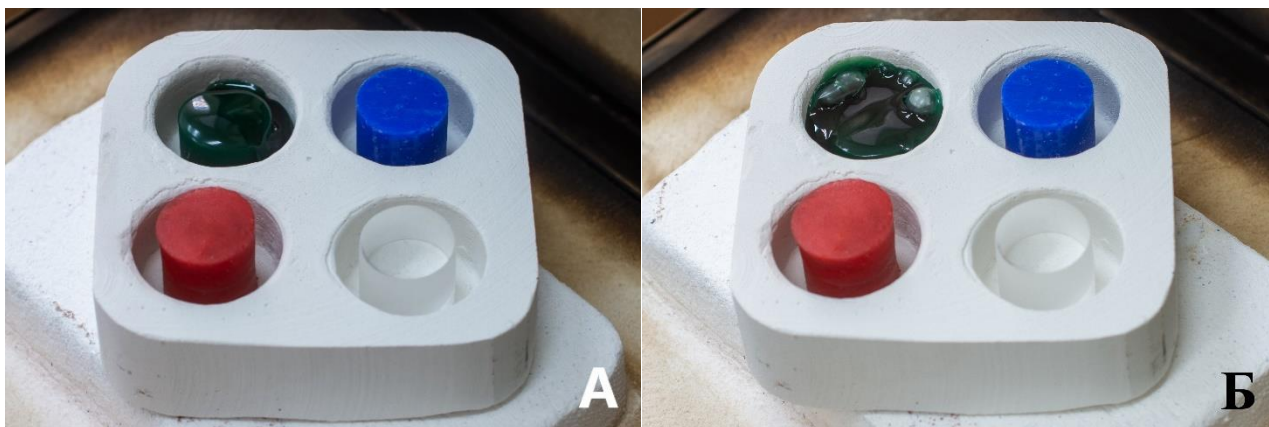
При температура от 150 °С не се наблюдават разлики в сравнение със 100°С, с изключение на образецът от CAD/CAM wax, чиито ръбове започват леко да се заоблят, а повърхността да става по-матова. При останалите тела промени в агрегатното състояние, структурата, цвета и повърхността липсват. **Фиг.20.**



***Фиг.20.** На фигурата ясно личи липсата на промени при опитните тела, с изключение на детайла изработен от CAD/CAM wax.*

При 200°С образецът от CAD/CAM wax започва да се топи. Детайлът, изработен от Pattern Resin LS™ (GC™), започва своето температурно разширение, като на този етап то е достатъчно демонстративно. Образците изработени от S-cast® и Castable Resin® не показват визуално доловими промени при обследваната температура. **Фиг.21-А.**

След 10 мин. задръжката на 200°С детайлът от CAD/CAM wax изцяло е преминал в течно агрегатно състояние, като започва да кипи. Отчита се и нарастващото температурно индуцирано разширение на детайла от Pattern Resin LS®, докато видът на останалите образци остава все така непроменен. **Фиг.21-Б.**



Фиг.21. Промени в опитните тела при 200°C, преди 10 минутната задръжка (А) и след нея (Б).

При 250°C восъчният образец продължава да кипи без никакви видими други промени. Температурното разширение на опитното тяло от Pattern Resin LS™ става далеч по-значимо, дори след 10 минутната задръжка по повърхността му се появяват отделни порьозни участъци. При обследване на детайла, изработен от Castable Resin®, първите белези на термично разширение са вече видими. По свободната основа на цилиндъра се образуват тънки цепнатини, които постепенно увеличават броят и размерите си. Прави впечатление, че пукнатините са успоредни на принтираните слоеве и перпендикулярни на посоката на принтиране. Що се касае до пробното тяло от C-cast® промени в неговата структура все още не са макроскопски доловими. **Фиг.22-А**

След 10 минутната задръжка на 250°C няма други значителни промени в опитните тела, с изключение на подчертаване на описаните изменения, породени от термичното разширение и характерни за всеки един материал. Детайлът от Pattern Resin LS™ започва да се огъва около надлъжната си ос. При тялото от Castable Resin® се появяват нови цепнатини, а старите се задълбочават и разширяват. Детайлът от C-cast® все още не показва изменения. **Фиг.22-Б**



Фиг.22-А. Обследваните опитни тела при достигане на температура от 250°C.



Фиг.22-Б. Обследваните образци след 10 мин. задръжка на 250°C.

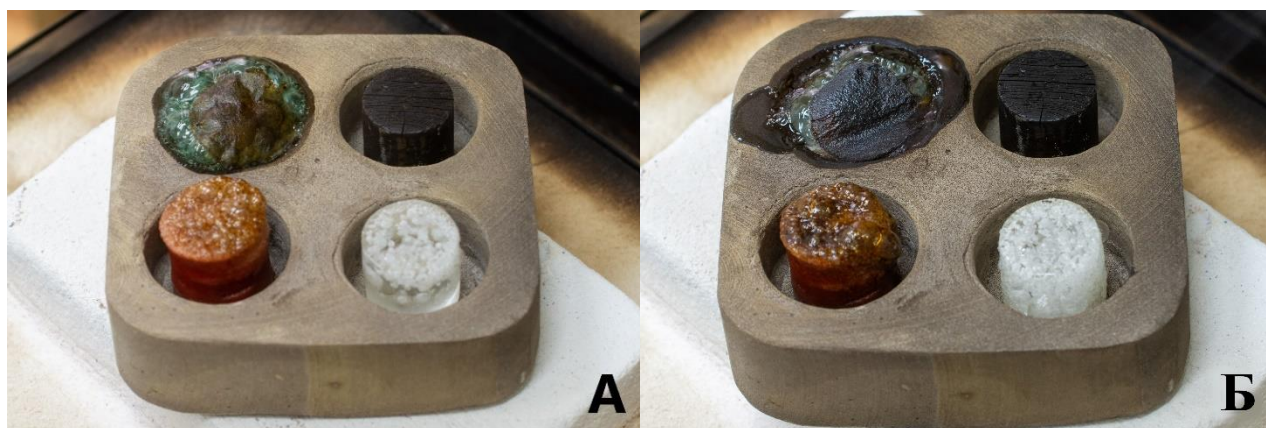
При достигане на 300°C не се наблюдават промени спрямо 250°C, като след задръжката новите изменения са по-демонстративни. Количеството на восъка в поставката започва постепенно да намалява, което говори за неговото бавно изпаряване. Много забележителни са промените при образеца от Pattern Resin LS™, който почти удвоява своя обем, като за сметка на това се увеличава порьозността му. Опитният детайл от Castable Resin® започва да потъмнява в

резултат от изгаряне на редица компоненти в състава на смолата. Цепнатините продължават да се множат и задълбочават, но освен тях друг видим белег на разширение не се отчита. Тенденциозно е поведението на образеца от C-cast[®], който не проявява никакви промени и при тази температура. Компоненти от състава на CAD/CAM wax започват постепенно да се овъгляват. **Фиг.23.**



Фиг.23. *Опитните образци при температура от 300°C, след 10 мин. задръжка.*

При температура от 350°C процесите на разширение при детайла от Castable Resin[®] продължават и запазват характера си. За разлика от него, цилиндърът от Pattern Resin LS[™] започва плавно да се стапя. Фрезованият от C-cast[®] образец вече показва пореста структура. След 10 минутната задръжка се наблюдава дори и макроскопски доловимо увеличение в обема на опитното тяло. При CAD/CAM wax няма съществени изменения в сравнение с предходната стъпка. **Фиг.24.**



Фиг.24. *Промени в обследваните образци при 350°C, преди (А) и след (Б) задръжка.*

Изменения в опитните телата при 400°C са сходни с описаните при 350°C, но са по-демонстративни. CAD/CAM wax продължава да се овъглява поетапно. По подобие на него, детайлът от Pattern Resin LS™ вече се е стопил и е започнал да кипи, като също се наблюдават отделни зони на овъгляване. При цилиндъра от Castable Resin® няма съществени изменения спрямо предходната обследвана температура. Далеч по-драматично протичат промените при образеца от C-cast®, при който освен силно порьозната структура, се отчита и редукция в обема. **Фиг.25.**



Фиг.25. Опитните образци при температура от 400°C, след задръжка.

В интервала между 450°C и 550°C се наблюдава процес на бурно горене на материалите. В резултат от това при 550°C образците от C-cast® и Pattern Resin LS™ изгарят напълно и без пепелен остатък. За разлика от тях CAD/CAM wax и Castable Resin® все още имат остатъчни фрагменти, които подлежат на изгаряне при по-висока температура. **Фиг.26.**



Фиг.26. Наличните фрагменти от детайлите след процеса на бурно горене, отчетени при 550°C.

При 600°C остатъците от CAD/CAM wax и Castable Resin® драматично намаляват своя обем. **Фиг.27.**



Фиг.27. Наличният пепелен остатък при 600°C.

Между 600°C и 1050°C не се наблюдават динамични промени в пепелния остатък, затова е отчетен крайният резултат от процеса на изгаряне на детайлите при 1050°C. **Фиг.28.**



Фиг.28. Крайният резултат от темпериране на детайлите при 1050°C.

Образците от Castable Resin® и от CAD/CAM wax са изгорели почти изцяло, но въпреки това оставят известно количество пепелен остатък.

2. Сравнителен анализ на наличния пепелен остатък след термична обработка на обследваните пробни тела.

След достигане на 1050°C огнеупорната поставка е изведена от пещта и е оставена да се охлади до стайна температура, след което е извършен анализ на наличния пепелен остатък. **Фиг.29.**



Фиг.29. Пепелен остатък генериран от опитните образци, изработени от четирите различни обследвани материали.

Очевидно е, че тегловното количество на пепелния остатък, което е получено от образца изработен от CAD/CAM wax, е несъществено малко. Въпреки това е

направена проверка с аналитична везна. Отчетено е теглото на пепелния остатък от CAD/CAM wax, което е по-малко от 0,001 гр. Като се има предвид, че образецът тежи около 5,5 гр., то може да се заключи, че остатъкът след изгаряне е по-малък от 0,02%, което го определя като незначителен.

Ситуацията при Castable Resin® е идентична отчитайки показанието на аналитичната везна, която показва, че количеството му е по-малко от 0,001гр. Като се има предвид теглото на образца от 7гр., може да се изчисли, че остатъкът след изгаряне е по-малък от 0,02% от тегловното количество на първичния прототип.

3. Обсъждане на получените резултати.

Процесът на леене може да бъде определен като неточен метод за превръщане на протезни прототипи в окончателни конструкции, именно поради температурните промени, физичните и механичните взаимодействия между материалите, които съставят леяковата система, както и наличието на пепелен остатък след изгарянето им. Ако сравним обследваните материали, ще установим, че физичните им свойства са твърде различни и то независимо от определени сходства в химичния им състав.

Характерно за базираните на восък материали е, че при загряване преминават в пластично състояние, а след това и в течно агрегатно състояние, преди да успеят да се разширят до степен, че да окажат някакво съществено напрежение по муфелните стени. Восъците, макар и широко използвани, имат редица недостатъци по отношение на механичните и физичните си качества. Това е причина за нарастващата употреба на материали базирани на смоли или пластмаси, за които тези несъвършенства не са характерни.

Материалите C-cast® и Pattern Resin LS™ са базирани на метил метакрилат. Като такива те се стапят и пластифицират при високи температури (около 400°C). Това позволява опакованият детайл да запази своята структура при висока температура, като се разшири достатъчно, до толкова че да окаже значително напрежение по стените на муфата и да предизвика пукнатини в нея.

Обследваният материал Castable Resin®, произвеждан от Formlabs™ за техните 3D принтери, е базиран на фотополимеризиращи естери на метакриловата киселина. Характерно за Castable Resin® е, че при загряване на детайлите от този материал, те не преминават в течно агрегатно състояние, а директно се превръщат в газ, т.е. сублимират. По този начин структурата на

твърдото тяло се запазва дори и при екстремно високи температури, като се елиминира възможността за евакуирането му през отливните канали. Резултатът е значително термично разширение на прототипите в процеса на тяхното елиминирание, с което нараства и рискът от фрактура на стените на муфите.

Що се касае до условията за получаване на качествена отливка, количеството на пепелния остатък при обследваните материали няма значителна роля, предвид незначителното му тегловно количество. Това от своя страна определя като по-съществена характеристика термичното разширение на обследваните материали при обсъждане на влиянието им върху процеса на леене. В резултат може да се наложи модифициране на процеса на леене във връзка с физичните качества на материалите.

4. Изводи по задача 1:

- Материалът CAD/CAM wax, независимо че преимуществено е съставен от восък, изгаря като оставя малко и несъществено количество пепелен остатък. Наред с това не притежава характерната за восъците ниска температура на топене.
- Pattern Resin LS[®] изгаря без остатък, но претърпява значително температурно разширение, което налага модифициране на режима на подгряване на муфите и/или покриване на външната повърхност на прототипите с восък.
- C-cast[®] изгаря без остатък. Материалът показва по-малко температурно разширение в сравнение с другия използван полимер (базиран на ПММА), но се пластифицира и топи при много висока температура, което налага модифициране на режима на подгряване на муфите и/или покриване на външната повърхност на прототипите с восък.
- C-cast[®] има сходен химичен състав с Pattern Resin LS[®], но се наблюдават съществени различия във физичните им качества при висока температура.
- При изгарянето си, Castable Resin[®] оставя незначително количество пепелен остатък. За сметка на това търпи известно температурно разширение. При загряване не се регистрира пълно стапяне, дори и при екстремно високи температури, близки до индуциращите бурно горене. Това на свой ред налага модифициране на температурния режим на подгряване на муфите и/или покриване на външната повърхност на прототипите с восък.

- Температурно индуцираните физичните промени, както и количеството пепелен остатък, който Castable Resin[®] оставя след изгаряне, биха могли да позволят използването му за целите на денталната медицина.
- Предвид разнообразието от материали за изработване на първични прототипи на протезни конструкции и присъщите им строго специфични физични качества, за получаване на качествена отливка е нужно модифициране и индивидуализиране на процесите опаковане и термично елиминиране. Изключение правят восъците.
- Независимо че някои от обследваните материали оставят известно и пренебрежително количество пепелен остатък след изгаряне, количеството му е такова, че не би повлияло бъдещата отливка.

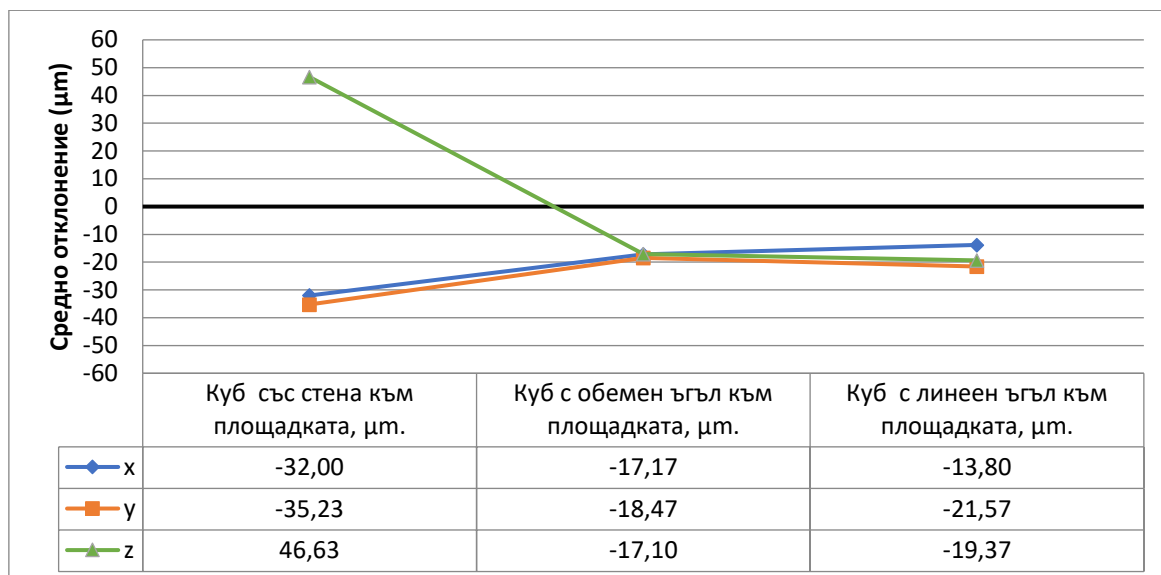
ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТОЧНОСТТА ПРИ МАТЕРИАЛИЗИРАНЕ НА ДИГИТАЛНИ ПРОТОТИПИ, ИЗРАБОТЕНИ ЧРЕЗ 3D ПРИНТЕР, ПО ТЕХНОЛОГИЯТА СЕЛЕКТИВНА ЛАЗЕРНА ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ.

Събраната първична информация е кодирана и въведена в компютърна база данни, където е извършена статистическа групировка, прекодиране и анализ. Данните бяха обработени с помощта на специализиран софтуер за статистически анализ IBM SPSS[®], IBM[™].

1. Сравнителен анализ на точността на принтиране на пробни тела в зависимост от посоката им на ориентация, при два вида смоли за леене.

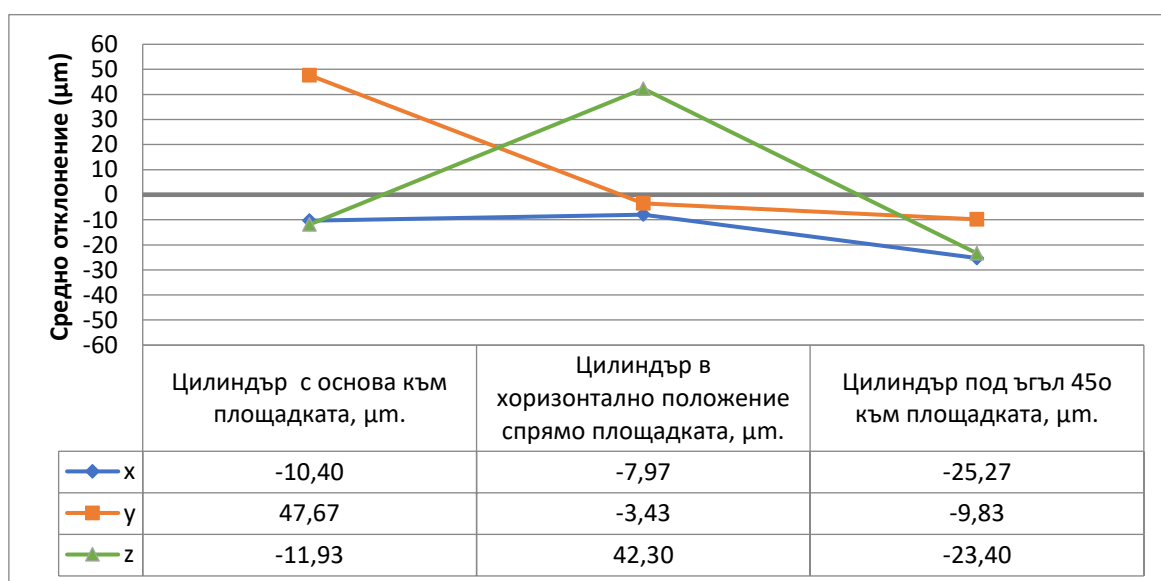
След извършване на измерванията на обследваните детайли във всяка от трите равнини, получените данни са групирани и са изчислени средните отклонения спрямо зададения дигитален образец. Отчетените несъответствия са най-малки и варират в най-тесни граници при кубовете, които са позиционирани с обемен ъгъл към площадката за принтиране. При кубовете, разположени с линеен ъгъл към основата, тенденцията е сходна, но отклоненията от дигиталния образец варират в по-широки граници. И при двете групи се наблюдава известно умаляване на изработените обекти. Най-големи несъответствия се наблюдават при кубовете, чиито две от стените са успоредни на площадката. При тях се отчита увеличение на размерите по оста **z** и свиване - по осите **x** и **y**. **Фиг.30.**



Фиг.30. Средно отклонение на различните групи кубове, обединени според посоката на принтиране и изработени от смола Castable Resin®.

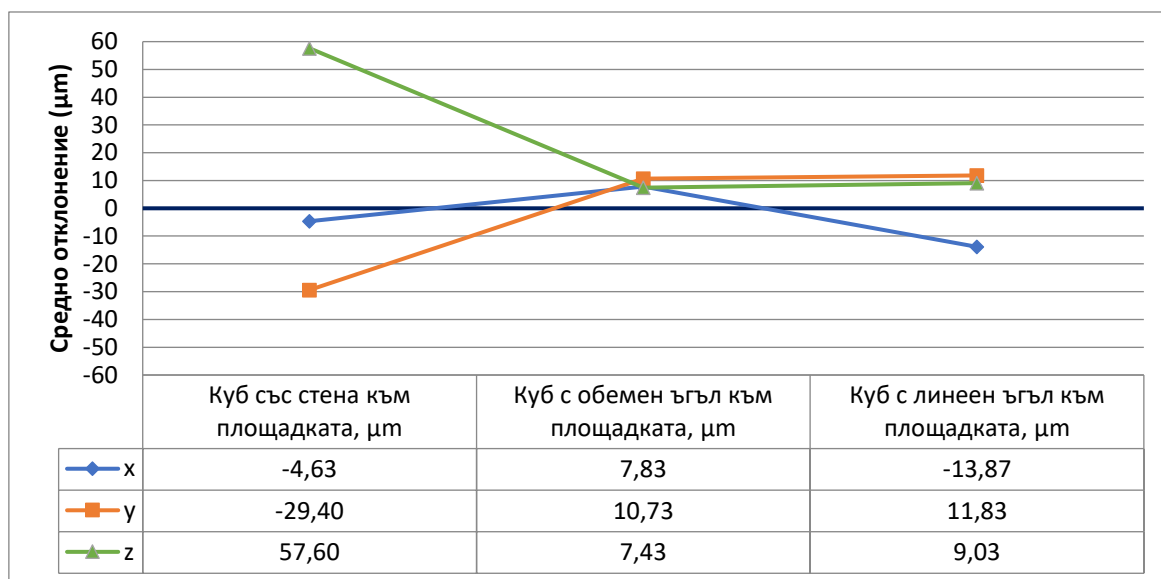
Резултатите от измерванията на образците с форма на цилиндър, изработени от смола Castable Resin®, сочат най-малки стойности на средното отклонение за тези от тях, които са наклонени под ъгъл от 45° към платформата за изграждане. Заедно с това се отчита тенденция към редуциране на размерите на материализираните детайли спрямо зададените дигитални образци.

При останалите две групи тела стойностите на средното отклонение от зададените дигитални образци отново сочат тенденция към увеличение на размера на изработения детайл, но само за измерванията по определен вектор, успореден на посоката на принтиране. В останалите равнини детайлите са по-малки от дигиталния образец. **Фиг. 31.**



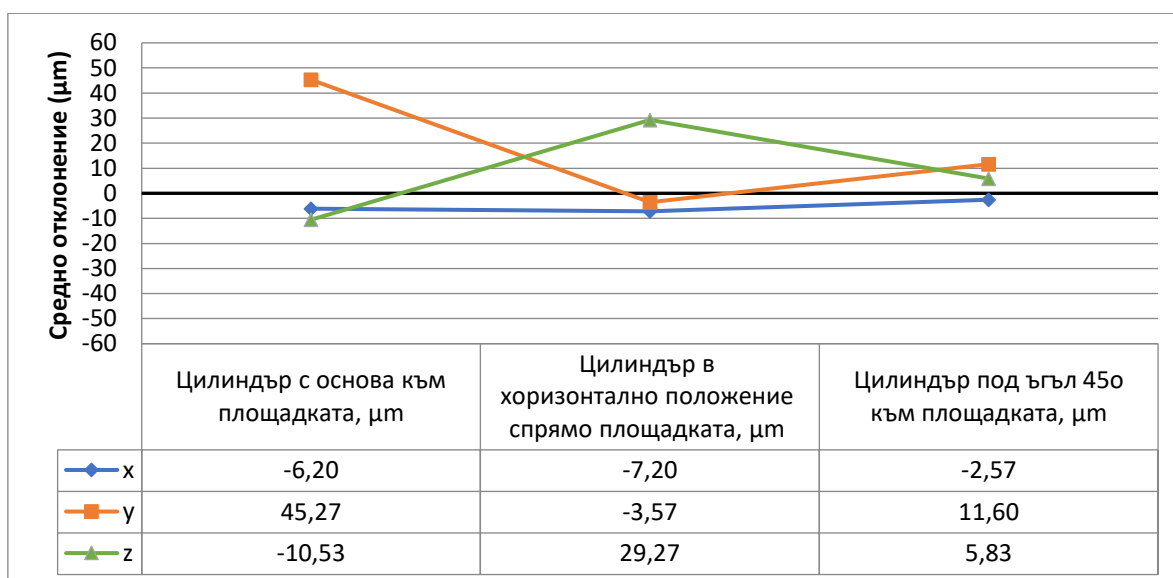
Фиг.31. Средно отклонение на различните групи цилиндри, обединени според посоката на принтиране и изработени от смола Castable Resin®.

Анализът на данните за измерванията на детайлите с форма на куб и изработени от смола Castable Wax[®] показва, че девиацията от зададения размер, по подобие на обектите изработени от другата смола, е най-голяма при групата, чиито две стени са успоредни на площадката за изграждане. Още повече че най-големи отклонения са отчетени по оста успоредна на посоката на принтиране. Тенденцията за най-малки отклонения при телата, които са изработени с обемен ъгъл към платформата, се затвърждава и в този случай. **Фиг. 32.**



Фиг.32. Средно отклонение на различните групи кубове, обединени според посоката на принтиране и изработени от смола Castable Wax[®].

Статистически обработените данни за детайлите с форма на цилиндър и изградени от смола Castable Wax[®], показват най-големи отклонения при тези, които са позиционирани с основа към площадката и в хоризонтално положение. За разлика от тях, несъответствията спрямо дигиталния образец при цилиндрите, които са принтирани под наклон 45°, са далеч по-малки. **Фиг.33.**

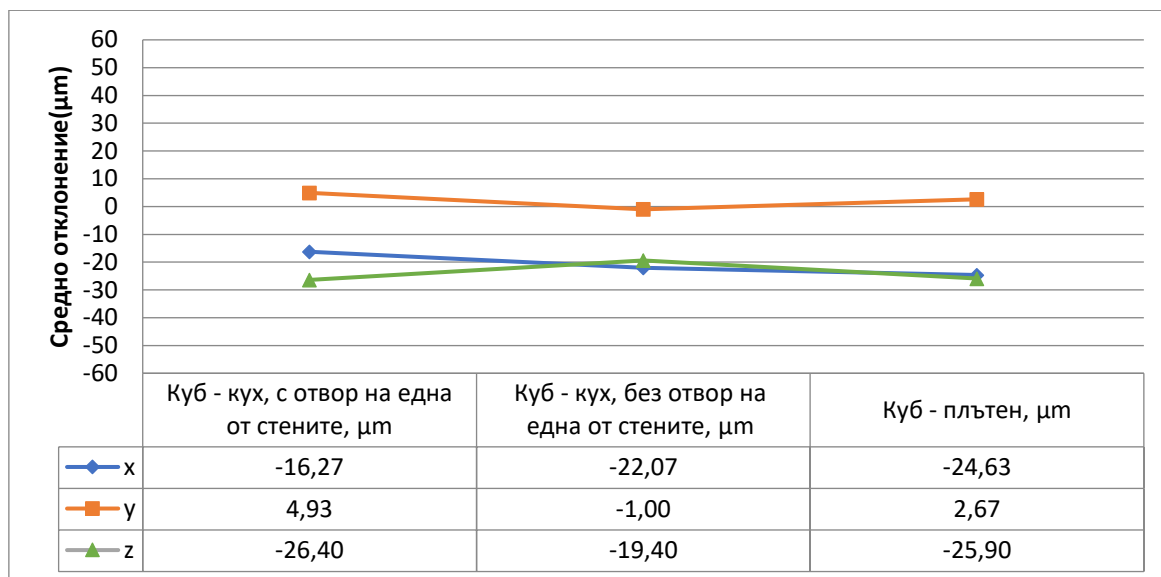


Фиг.33. Средно отклонение на различните групи цилиндри, обединени според посоката на принтиране и изработени от смола Castable Wax®.

2. Оценка на влиянието на структурата върху точността на тела от Castable Resin® и Castable Wax®.

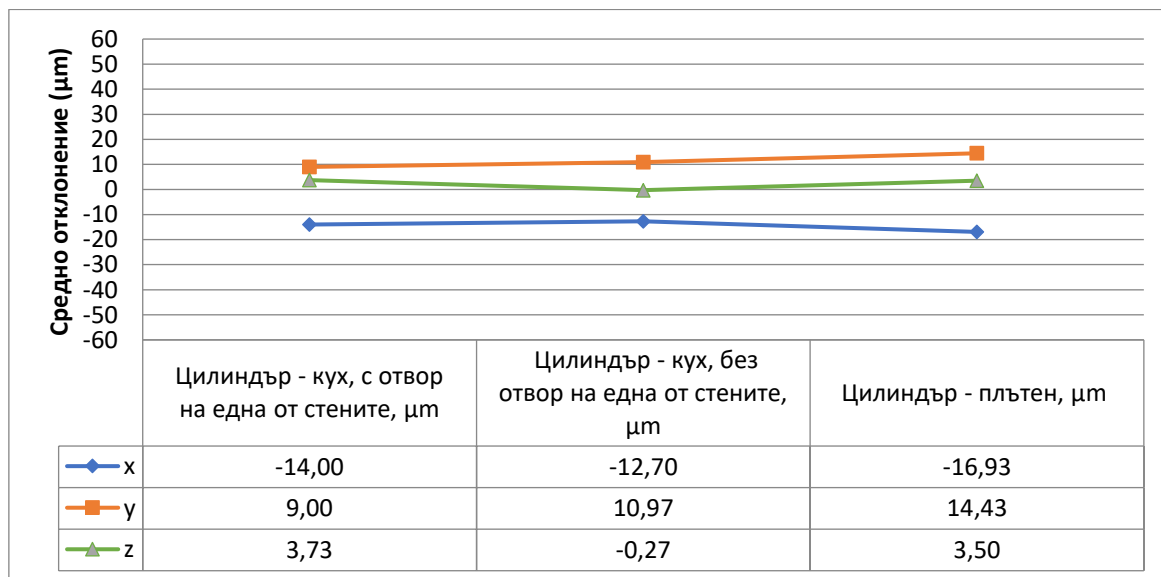
Освен отчетените досега фактори има и още един, който също в известна степен повлиява резултатите от 3D принтирането. Касае се за структурата на вече материализирания обект. Тя може да се манипулира дигитално с подходящи за целта специализирани софтуери за триизмерна обработка на виртуални обекти. Това позволява генерирането на детайли с идентична форма, но различни механични качества, които имат отношение към последващата им обработка и в общ план към манипулативните им качества. В този ред на мисли е целесъобразно да се провери влиянието на различни структурни варианти на сходни детайли по отношение на точността на репрезентиране (в контекста на 3D принтирането) на дигитално заложения модел.

При направените измервания и изчислените средните отклонения на детайлите с форма на куб от смола Castable Resin® спрямо заложения образец, не се установяват значителни промени. Това дава основание да се заключи, че при тези опитни тела факторът структура не влияе съществено върху точността на принтиране, а генерираните отклонения са резултат на други фактори. **Фиг.34.** Установява се, че по оста **x** най-голямата разлика в стойностите за средно отклонение между трите групи опитни тела е от порядъка на 8,36 μm., по оста **y** – 5,93 μm., а за оста **z** – 7,00 μm.



Фиг.34. Средно отклонение на различните групи опитни тела спрямо заложеня дигитален модел. Представени са данни за кубовете, обединени според характеристиките на тяхната структура и изработени от смола Castable Resin[®].

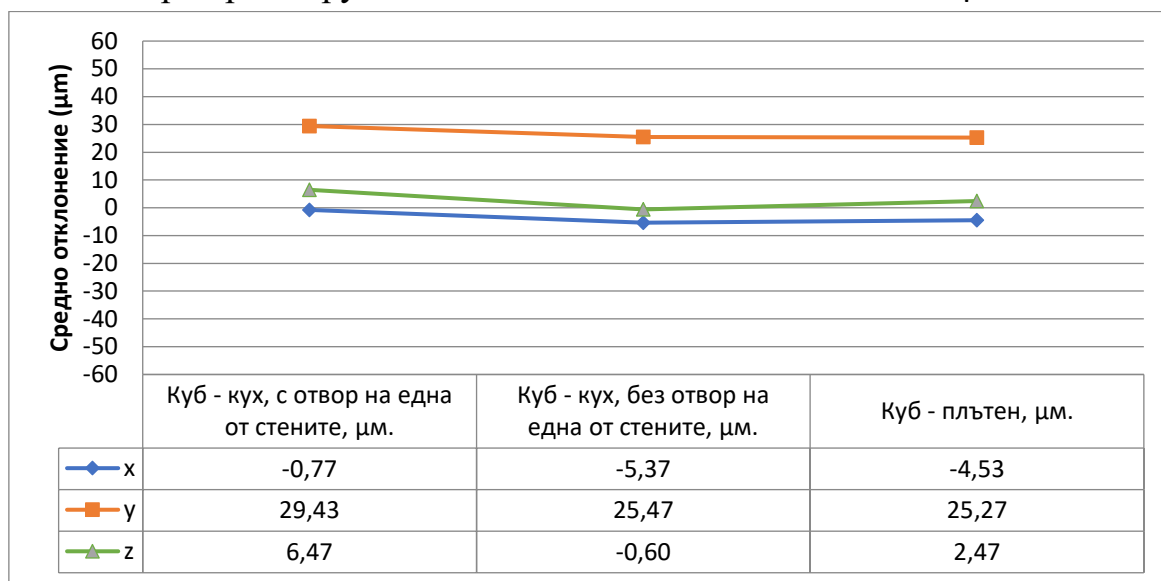
Анализът на измерванията и изчислените средни отклонения за детайлите с форма на цилиндър, изработени от смола Castable Resin[®], показват идентични резултати с кубовете от същата смола. **Фиг.35.** Разликите в стойностите на средните отклонения между трите изследвани групи са не по-големи от 6 μm .



Фиг.35. Средно отклонение на различните групи опитни тела спрямо заложеня дигитален модел. Представени са данни за цилиндрите, обединени според характеристиките на тяхната структура и изработени от смола Castable Resin[®].

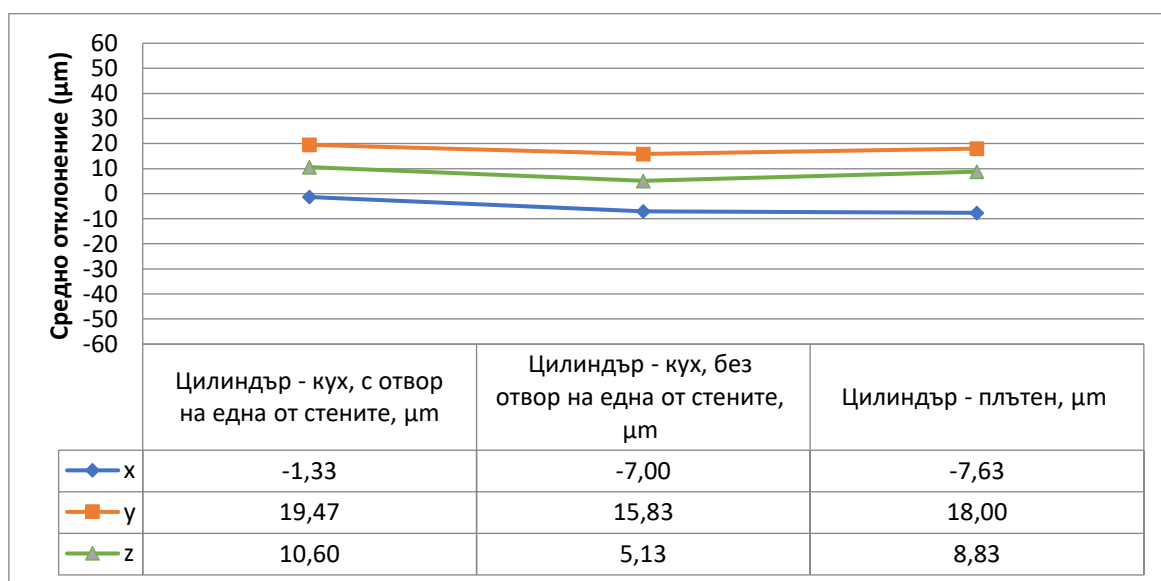
Що се касае до опитните тела, изработени от смола Castable Wax[®], за тях могат да се направят идентични изводи както при телата от другата обследвана

смола. При детайлите с форма на куб и изработени то смола Castable Wax[®], по подобие на разгледаните досега опитни обекти, се наблюдават минимални отклонения при трите групи тела - в диапазон не по-голям от 7 μm . **Фиг.36.**



Фиг.36. Средно отклонение на различните групи опитни тела спрямо заложеня дигитален модел. Представени са данни за кубовете, обединени според характеристиките на тяхната структура и изработени от смола Castable Wax[®].

Сходни резултатите са получени и за 3D принтираните цилиндри, изработени от смола Castable Wax[®], като данните са представени на **фиг.37**. Разликите в стойностите на средното отклонение между трите изследвани групи тела са не по-големи от 6,3 μm .



Фиг.37. Средно отклонение на различните групи опитни тела спрямо заложеня дигитален модел. Представени са данни за цилиндрите, обединени според характеристиките на тяхната структура и изработени от смола Castable Wax[®].

3. Оценка на влиянието на постполимеризационния процес върху точността на детайлите от Castable Resin®.

Получените резултати са групирани и са изчислени средните стойности от измерванията. Извършен е и статистически анализ на получените данни, като са съпоставени с наличните идентични тела преди постобработката. Резултатите са представени в **табл.1**.

Табл.1. Представени са: средни стойности от измерванията ± стандартна грешка, средна разлика, интервал на доверителност, T-стойности, P-стойности, за идентични групи цилиндри (според структурата си) от Castable Resin®, измерени преди и след допълнителния полимеризационен процес.

	Средни стойности от измерванията ± стандартна грешка	Средна разлика	95% Интервал на доверителност	t	P
Цилиндър - кух, с отвор на една от стените					
Ос x					
Преди полимеризация	9,98600±0,001063	0,000933	[-0,002072; 0,003939]	0.703	0.500
След полимеризация	9,98507±0,000868				
Ос y					
Преди полимеризация	10,00900±0,001306	0,002367*	[0,000869; 0,003864]	3,575	0,006
След полимеризация	10,00663±0,001238				
Ос z					
Преди полимеризация	10,00373±0,003931	0,001500	[-0,005769; 0,008769]	0,467	0,652
След полимеризация	10,00223±0,001690				
Цилиндър - кух, без отвор на една от стените					
Ос x					
Преди полимеризация	9,98730±0,000568	0,000467	[-0,002305; 0,003239]	0,381	0,712
След полимеризация	9,98683±0,000923				
Ос y					
Преди полимеризация	10,01097±0,001589	0,001033	[-0,000666; 0,002732]	1,376	0,202
След полимеризация	10,00993±0,001198				
Ос z					
Преди полимеризация	9,99973±0,001345	0,000833	[-0,001261; 0,002928]	0,900	0,392
След полимеризация	9,99890±0,001347				
Цилиндър - плътен					
Ос x					
Преди полимеризация	9,98307±0,000227	0,000233	[-0,000998; 0,001465]	0,429	0,678
След полимеризация	9,98283±0,000437				
Ос y					
Преди полимеризация	10,01443±0,002504	0,002200	[-0,002119; 0,006519]	1,152	0,279
След полимеризация	10,01223±0,001564				
Ос z					
Преди полимеризация	10,00350±0,001469	0,002767*	[0,000596; 0,004938]	2,883	0,018
След полимеризация	10,00073±0,001138				

Със „*“ са означени всички статистически значими получени резултати.

От изложената таблица става ясно, че минималната разлика между отчетените средни размери на идентични групи тела, установени преди и след постполимеризация, е от порядъка на 0,000233 μm ., а максималните – 0,002767 μm . На пръв поглед тези стойности са пренебрежимо малки, особено с оглед на възможностите на съвременните 3D принтери. След извършване на допълнителна статистическа обработка и определяне на значимостта на тези отклонения, резултатите придобиват по-различен вид. При разглеждане на получените стойности за Р и Т се установяват величини за Р, които са по малки от стойността за нивото на значимост за разглежданата тестова извадка (т.е. 0,05), а за Т – по-големи от критичната стойност на извадката, т.е. 1,96. В този ред на мисли е видно, че постполимеризационният процес води до малки по стойност, но сигнификантни разлики между размерите на цилиндрите, отчетени преди и след процеса на допълнителна полимеризация.

Идентичен анализ е извършен на данните за средните размери на идентични групи кубове от Castable Resin[®], преди и след постполимеризация (табл.2). От представените резултати в **таблица 2** става ясно, че минималната разлика между отчетените средни размери за идентични групи тела е от порядъка на 0,001636 мм., а максималната – 0,043821 мм. Стойностите на средните разлики варират от незначителни – 1,63 μm . до такива от порядъка на 43,82 μm ., които съвсем не могат да бъдат пренебрегнати. След извършване на допълнителна статистическа обработка и проверка на значимостта на получените, се установяват стойности за Р, които са по малки от стойността за нивото на значимост за разглежданата тестова извадка (т.е. 0,05) и за Т – по-големи от критичната стойност извадката, т.е. 1,96. В този ред на мисли е видно, че постполимеризационният процес води до статистически значими разлики между размерите на кубовете преди и след процеса на допълнителна полимеризация.

Табл.2. Представени са: средни стойности от измерванията \pm стандартна грешка, средна разлика, интервал на доверителност, T-стойности, P-стойности, за идентични групи кубове (според структурата си) от Castable Resin[®], измерени преди и след допълнителния полимеризационен процес.

	Средни стойности от измерванията \pm стандартна грешка	Средна разлика	95% Интервал на доверителност	t	P
Куб - кух, с отвор на една от стените					
Ос x					
Преди полимеризация	9,98380 \pm 0,001093	0,002936*	[0,000099;0,004301]	2,369	0,042
След полимеризация	9,98160 \pm 0,000733				
Ос y					
Преди полимеризация	10,01660 \pm 0,011377	0,043821	[-0,023748;0,038948]	0,548	0,597
След полимеризация	10,00900 \pm 0,005972				
Ос z					
Преди полимеризация	9,97380 \pm 0,000490	0,003062	[-0,000591;0,003791]	1,652	0,133
След полимеризация	9,97220 \pm 0,000712				
Куб - кух, без отвор на една от стените					
Ос x					
Преди полимеризация	9,97790 \pm 0,000567	0,001776*	[0,001329;0,003871]	4,628	0,001
След полимеризация	9,97790 \pm 0,000567				
Ос y					
Преди полимеризация	9,99910 \pm 0,001683	0,002781*	[0,000211;0,004189]	2,502	0,034
След полимеризация	9,99690 \pm 0,001320				
Ос z					
Преди полимеризация	9,98060 \pm 0,000806	0,003164	[-0,000963;0,003563]	1,299	0,226
След полимеризация	9,97930 \pm 0,000448				
Куб - плътен					
Ос x					
Преди полимеризация	9,97530 \pm 0,000775	0,003169	[-0,000667;0,003867]	1,596	0,145
След полимеризация	9,97370 \pm 0,000775				
Ос y					
Преди полимеризация	10,00270 \pm 0,000746	0,004442	[-0,001378;0,004978]	1,281	0,232
След полимеризация	10,00090 \pm 0,001888				
Ос z					
Преди полимеризация	9,97420 \pm 0,000327	0,001636*	[0,000529;0,002871]	3,285	0,009
След полимеризация	9,97250 \pm 0,000401				

Със „*“ са означени всички статистически значими получени резултати.

4. Обсъждане на получените резултати.

Детайлите, които са позиционирани с широка основа към площадката за принтиране, показват значителни деформации именно в размерите, чийто вектор е успореден на посоката на принтиране. На практика първият слой от обекта, положен върху подпорните структури, е изключително грацилен и лесно подлежи на деформация, дори под действие на най-слабите физични и механични въздействия. Именно при потапянето във ваничката изпълнена със

смола за полагане на втори слой, флуидът, предвид своето хидростатично налягане, издува и деформира дебелия само 25 μm . слой. Това води до увеличаване на размерите на детайла в направление, успоредно на посоката на принтиране. Един от начините да бъде решен този проблем, е да се увеличи гъстотата и/или контактната площ на подпорните структури с обекта. В резултат обаче ще се наруши значително повърхностната морфология на детайла и по-конкретно на ангажираната стена. По-удачен подход за преодоляване на тези деформации е да се търси друга по-подходяща ориентация на детайла, така че първите слоеве от детайла да са с възможно най-малка площ. При кубовете това е позиционирането им с обемен и линеен ъгъл към изграждащата платформа.

Сходна закономерност се наблюдава и при телата с форма на цилиндър. Тук характерното е, че големи изменения се наблюдават при позициониране на цилиндъра с основа към платформата и в хоризонтално положение. И в двата случая площта на първия положен слой е по-голяма от тази при ъгловите зони на детайла. Именно заради това е целесъобразно обектът да бъде разположен под определен ъгъл към площадката за изграждане. В този ред на мисли при детайли с по-сложна форма трябва да се търси такова разположение спрямо изграждащата платформа, че първият слой, който се изгражда непосредствено върху подпорните структури, да бъде с възможно с най-малка площ.

В подкрепа на получените резултати може де си изтъкне и фактът, че полимеризацията на всеки слой е светлинно индуцирана, осъществявайки се посредством лазерен лъч с определена дължина на вълната, което неминуемо води до генериране на определено количество топлина. По този начин колкото по-голяма площ се подлага на светлинно индуцирана полимеризация, толкова повече енергия се отделя, като се повишава локалната температура. Логичният резултат е термично разширение, а от там и деформация на тънкия изграден слой.

Очевидна е и друга зависимост, девиацията в размерите на материализираните детайли спрямо техните дигитални образци е много по-малка при изработените от смола Castable Wax[®] в сравнение с тези от Castable Resin[®]. Въпреки всичко трябва да се отчете и фактът, че леенето не е точен процес и в този контекст отклоненията при детайлите в най-благоприятна позиция на принтиране (с оглед на точността) са допустими.

Разглеждайки отклоненията при групите тела с различна структура и от един и същи материал, се установява, че най-големите отклонения отчетени по дадена ос са от порядъка на 5,43 μm . до 9,43 μm . Тези резултати, съотнесени към

възможностите на съвременната апаратура, еднозначно водят към заключението, че модификацията в структурата на телата не повлиява тяхната точност.

След анализ на получените резултати по отношение на влиянието на постполимеризационния процес върху 3D принтираните обекти, се установяват промени в размерите на детайлите. В този ред на мисли допълнителната полимеризация, освен че има положителен ефект по отношение на увеличаване на якостните качества на принтираните прототипи, то тя влошава точността на конструкциите, като наред с това отнема и допълнително време.

5. Изводи по задача 2:

- Детайлите, които са позиционирани с широка основа към площадката за принтиране, показват значителни деформации именно в размерите, чийто вектор е успореден на посоката на принтиране.
- Обследваните детайли, които са разположени под определен ъгъл към площадката за изграждане, така че първият принтиран слой да е с минимална площ, след материализиране показват най-малки отклонения спрямо зададените размери.
- Смолата Castable Wax[®] осигурява условия за получаване на по-точни детайли спрямо Castable Resin[®], като и двете смоли са подходящи за изработване на прототипи по отношение на показателя точност на принтиране.
- Материалът Castable Resin[®] има добри якостно-механични качества, дори и без да е подложен на допълнителна полимеризация. С оглед на свиването, което е регистрирано, провеждането на допълнителен полимеризационен процес при Castable Resin[®] е нецелесъобразно.
- Независимо че в резултат на софтуерната модификация до кухи обекти телата променят в известна степен своите механични качества, точността на принтиране не се повлиява.

ПЕТА ГЛАВА

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ВИДА НА СТРУКТУРАТА НА ПРИНТИРАНИ ТЕЛА, ИЗРАБОТЕНИ ОТ CASTABLE RESIN[®] И CASTABLE WAX[®], ПРИ ПОДГОТОВКА НА ОТЛИВНАТА МУФА ЗА ЛЕЕНЕ, ПРИ РАЗЛИЧНИ ТЕМПЕРАТУРНИ РЕЖИМИ И ОПАКОВЪЧНИ МАСИ.

Събраната първична информация беше въведена в компютърна база данни, където бе анализирана и експортирана графично. Заснетите изображения бяха софтуерно обработени и подготвени в подкрепа на изложените резултати.

1. Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леење, изработена от Sherafina[®] Rapid и конвенционален режим на подгряване.

След въвеждане на муфите в пещта (при 25°C), температурата се покачва бавно и регулярно, съгласно заложения режим в опитната постановка.

При температура от 200°C се отчитат първите фрактури, ангажиращи повърхността на част от муфите с плътни тела. При последващо покачване и достигане на температура от 350°C се наблюдават пукнатини по всички муфи, в които са опаковани плътни тела. На този етап кухите тела не предизвикват фрактури в муфелните стени. **Фиг.38.**



Фиг.38. На изображението са видими наличните фрактури, предизвикани от температурното разширение на плътните тела при 350 °C.

След задръжката от 30 мин. на 350°C, в резултат от температурното разширение на опакованите тела и нарастващият газов напор по стените на муфите, се отчитат пукнатини и дори разрушаване на муфите на плътните и кухите тела, с изключение на тези с отвор. **Фиг.39.**



Фиг.39. Отчетените резултати след след 30 мин. задръжане на температурата на 350°C. Муфите на плътните и кухите тела, с изключение на тези с отвор, са разрушени напълно.

При последващо покачване на температурата до 980°C не се наблюдават други промени в муфите. **Фиг.40.**



Фиг.40. Изпитваните муфи при температура от 980°C.

Резултатите след десетократно провеждане на опита са анализирани, обединени, обработени и изобразени графично. **Фиг.41.**



Фиг.41. Графично са изложени резултатите от всички проведени опити при описаните условия. С абривиатурите са обозначени: *SW* – плътно тяло от смола *Castable Wax*[®], *HW* – кухо тяло от смола *Castable Wax*[®], *HHW* – кухо тяло с отвор от смола *Castable Wax*[®], *SR* – плътно тяло от смола *Castable Resin*[®], *HHR* – кухо тяло с отвор от смола *Castable Resin*[®].

От **фиг. 41** се вижда, че нито една от муфите с опаковано плътно тяло не запазва целостта си след изгаряне. Не по същия начин стоят нещата със софтуерно модифицираните пробни тела. Тези детайли, които са 3D принтирани кухи и без отвор по повърхността си, запазват целостта на опаковъчните си муфи в едва 20% от проведените опити. Това, разбира се, не е резултат, който позволява да се определи тази модификация като сполучлива. Далеч по-задоволителни резултати са получени при кухите детайли с отвор на една от стените си. При тях 100% от изследваните муфи запазват целостта си и то без налични пукнатини, независимо от размера на опакованото пробно тяло. Това е сигурен белег, че тази модификация на пробните тела е успешна в контекста на напрежението, което оказва детайла при изгарянето си върху стените на муфата.

2. Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леене, изработена от WiroFine[®] и конвенционален режим на подгряване.

След въвеждане на муфите в пещта (при 25°C), температурата се покачва бавно и регулярно, съгласно заложения режим в опитната постановка. Отчетени и заснети са промените, които настъпват при обследваните муфи.

В момента на достигане на температура от 250°C са регистрирани и първите пукнатини при муфите, в които са опаковани плътни тела. След задръжка от 30 мин. на същата температура се появяват фрактури по всички муфи с плътни тела. **Фиг.43.**



Фиг.43. Изследваните обекти след 30 мин. задръжка на температура 250°C. Забелязват се пукнатини по муфите, маркирани с SR и SW от двата изследвани размера.

При последващо покачване на темепратурата са регистрирани фрактури на муфите с кухи тела без отвор, но само в изолирани случаи. В общия случай, нови промени по целостта на муфите не се наблюдават чак до каря на обследвания температурен режим. **Фиг.44.**



Фиг.44. На изображенито е показана една група от изследваните муфи при температура от 1050°C. Не се установяват значителни разлики в сравнение с 250°C.

Резултатите след десетократно провеждане на опита са анализирани, обединени и изобразени графично. **Фиг.45.**



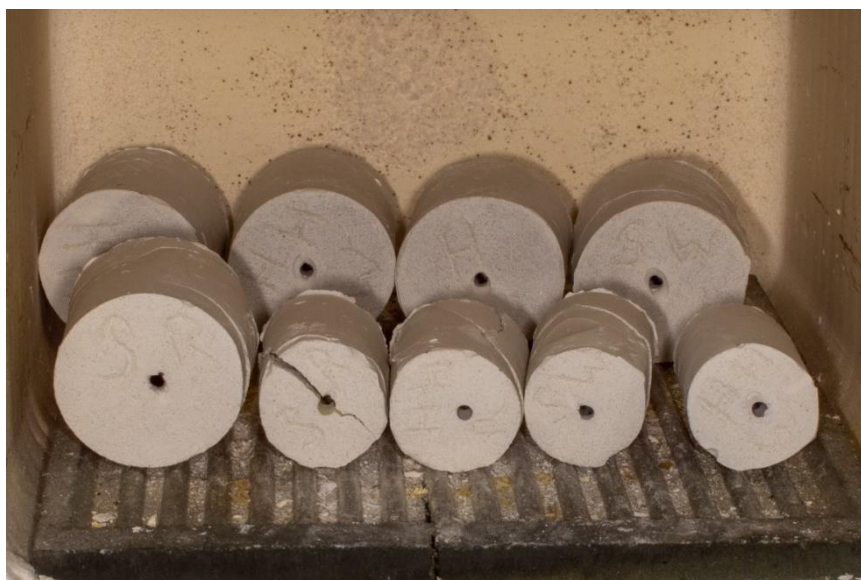
Фиг.45. Графично са изложени резултатите от всички проведени опити при описаните условия. С абривиатурите са обозначени: SW – плътно тяло от смола Castable Wax[®], HW – кухо тяло от смола Castable Wax[®], HHW – кухо тяло с отвор от смола Castable Wax[®], SR – плътно тяло от смола Castable Resin[®], HHR – кухо тяло с отвор от смола Castable Resin[®].

От получените опитни данни, систематизирани във **фиг.45**, се вижда, че изследваните плътни тела запазват целостта на муфата, само ако са изработени от смола Castable Wax[®] и то само в 10% до 30% от изследваните тела. Опитните детайли със същата структура от смола Castable Resin[®], водят до фрактуриране на опаковъчните си муфи при 100% от опитните постановки. При софтуерно модифицираните детайли до кухи обекти, 80% от опитните муфи запазват целостта си. В най-голяма степен липсват фрактури при муфите с опаковани кухи тела с отвор, като при тях не се наблюдават фрактури в нито един от проведените опити.

3. Изследване на влиянието на различните по структура опитни тела при подготовка на отливна муфа за леене, изработена от WiroFine[®] и режим на шоково подгриване.

Муфите са въведени в пещта при температура от 700°C, в съответствие с предписания от производителя режим. Предвид факта, че отварянето на вратичката на пещта в първите 15мин. носи известен риск, първите резултати от загряването на муфите могат да бъдат отчетени при температура от 900°C.

При 900°C се забелязват фрактурирани муфи с опаковани плътни тела в тях. При два от проведените опити се наблюдават пукнатини по муфата с опакован кух детайл от Castable Wax[®]. Отчетена е и пукнатина при муфа на кухо тяло с отвор, изработено от смола Castable Resin[®], но тя е наблюдавана само в един от проведените опити. **Фиг.46**



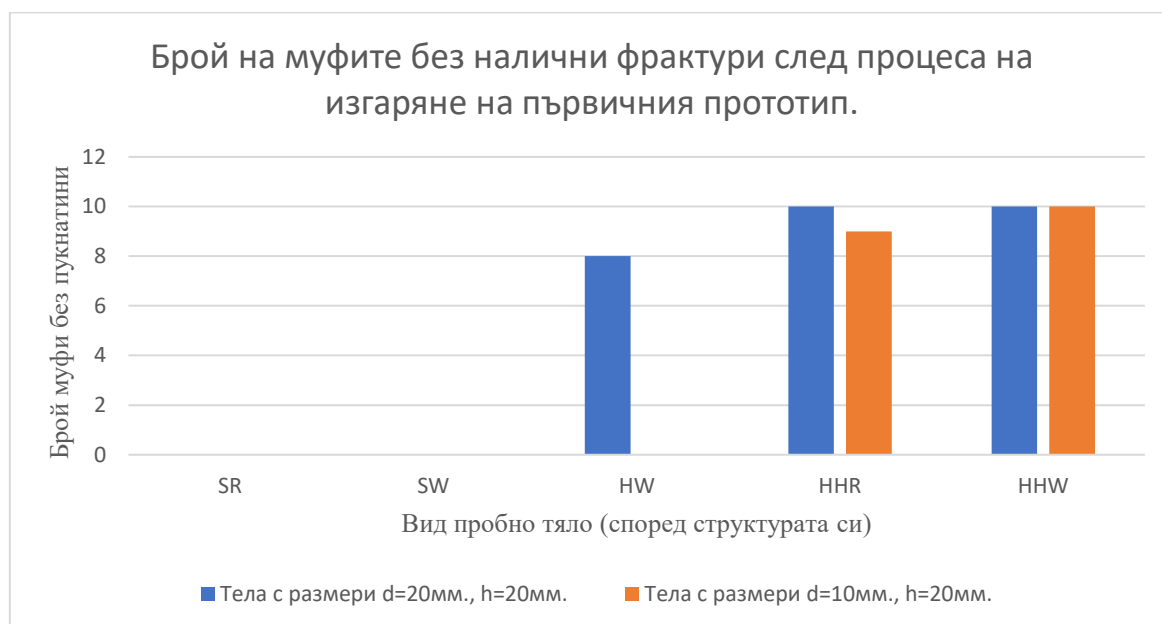
Фиг.46. Изследваните обекти при температура от 900°C.

При последващо покачване на температурата до 1050°C и след 60 мин. задръжка, не се наблюдават макроскопски доловими нови промени по повърхността на обследваните обекти. **Фиг.47.**



Фиг.47. Подгретите муфи на 1050°C, след 60 мин. задръжка, препоръчана от фирмите производители на смолата и опаковъчната маса.

Резултатите след десетократно провеждане на опита са анализирани, обединени и изобразени графично. **Фиг.48.**



Фиг.48. Графично са изложени резултатите от всеки проведен опит при описаните условия. С абривиатурите са обозначени: SW – плътно тяло от смола Castable Wax[®], HW – кухо тяло от смола Castable Wax[®], HHW – кухо тяло с отвор от смола Castable Wax[®], SR – плътно тяло от смола Castable Resin[®], HHR – кухо тяло с отвор от смола Castable Resin[®].

При шоково подгриване на муфите, тези от тях, в които са опаковани плътни тела, се фрактурират при всички проведени опити, независимо от размерите на детайла и вида на изграждащата го смолата. При софтуерно модифицираните кухи тела 80% от муфите са годни за леене след темперирание, При кухите детайли с отвор почти 100% от муфите запазват целостта си след изгаряне на опитните тела.

6. Обсъждане на получените резултати.

Получените резултати потвърждават напълно поставената работна хипотеза. Предвид факта, че тегловното количество на детайлите със сравнително голям обем е фактор в напреженията, които възникват по вътрешната повърхност на муфата, чрез софтуерна оптимизация са постигнати две конфигурации опитни обекти – кухи тела с отвор и други без отвор. Целта на оптимизацията е да се редуцира съотношението тегло/обем. При 3D принтиране на обекти, които са оптимизирани до кухи, но без отвор, се получават детайли, които са изпълнени с течна и неполимеризирала смола. По този начин тегловното количество се редуцира с около 55% до 60% спрямо плътното тяло. Една алтернатива за по-

голяма редуция в теглото е да се проектира отвор на една от стените на кухия детайл, от където затворената смола да може да изтича. В следствие тази модификация на детайлите дава възможност за промиване с изопропилов алкохол, който има роля на разтворител, отстранявайки и най-малките остатъци от неполимеризирала смола. По този начин тегловното количество на телата се редуцира с около 70%, а обемът се запазва. Резултатът е осигурено пространство, което в известна степен да компенсира голямото температурно разширение на детайла. От друга страна, редуцията на количеството на изграждащия материал води до намаляване на отделените в резултат от сублимацията газове, респективно до редуциране на налягането по вътрешните стени на муфата.

С оглед на обследваните опитни постановки резултатът при плътните тела е категоричен, оказаното напрежение води до фрактури в стените и дори цялостно разрушаване на муфите, независимо от температурния режим и вида на опаковъчната маса. При кухите детайли с отвор, наред с по-малкото тегловно количество, именно отворите осигуряват евакуирането на газа, образувал се вътре в детайла. По този начин се създава предпоставка за имплозия на обследвания обект, редуцирайки ефекта от повишеното налягане по стените на муфата и вътре в него. Това позволява детайлът да се разшири за сметка на изпълнената си с въздух сърцевина. При кухите тела без отвор процесът на елиминиране протича по малко по-различен начин. При температурното разширение на тези детайли имплозията е възпрепятствана, в резултат от отделящите се газове по протежение на цялата им повърхност. В този случай налягането се повишава както по външната повърхност на детайла и към стените на муфата, но и във вътрешността на обследвания образец. По този начин се възпрепятства разширението за сметка на вътрешната кухина на детайла, като в резултат се увеличава рискът от фрактура на опаковъчната се муфа.

С цел да се провери влиянието на обема на опакованите тела върху обследваните процеси, пробните детайли са разработени в два размера: такива с диаметър 20 мм. и височина 20мм. и други с диаметър 10 мм. и височина 20 мм. Телата с цилиндрична форма и по-малки размери (10мм.х20мм.) се доближават до обема и формата на мостово тяло с дължина позволяваща възстановяването на 2 или 3 изгубени зъба. По-големият размер цилиндрични тела е подбран, така че да осигури възможност за изследване в едни утежнени условия и да послужи като база за сравнение. На практика не е установена значителна разлика в получените резултати за двата обследвани размера опитни тела.

Друг фактор, който има важна роля, е вида на опаковъчната маса, с оглед на нейните якостно-механични качества. В предложената първа опитна постановка

е използвана опаковъчна маса Sherafina® - Rapid (SHERA®). С оглед на по-слабите якостни качества на опаковъчната маса, надежден вариант за получаване на качествена отливка е по-обемистите детайли да бъдат софтуерно оптимизирани до кухи тела с отвори. В противен случай вероятността за получаване на пукнатини по муфелната повърхност е значителна и варира от 80% до 100%.

Получените резултати от конвенционално и шоково подгретите муфи от WiroFine® еднозначно определят, че предложеният протокол на работа от фирмата Formlabs™ е неприложим при опаковане за леене на по-обемисти и плътни структури. При конвенционално подгриване на муфите, опакованите по-обемисти детайли трябва да са софтуерно оптимизирани поне до кухи тела. Плътните тела, независимо от техния размер, в значителна степен водят до пукнатини в муфелните повърхности, респективно до провал в процеса на леене.

Получените резултати биха могли да насочат евентуални бъдещи изследвания в няколко насоки. От една страна трябва да бъдат проверени възможностите за модифициране на температурния режим за елиминиране на опакованите тела, така че да позволи по-бързото и по-сигурното елиминиране на протезните прототипи, независимо от тяхната структура. От друга страна могат да бъдат потърсени други допълнителни модификации в състава на смолите за 3D принтиране, които да осигурят по-благоприятни условия в процеса на изгаряне. Полезно за практиката би било разработването на опаковъчна маса с по добри якостно-механични качества, които устояват на силите генерирани от опакованите тела по време на изгарянето им.

7. Изводи по задача 3:

- Температурното разширение на детайлите, изработени смолите Castable Resin® и Castable Wax®, значително надвишава това на опаковъчните маси.
- Свойството на използваните смоли да сублимират при повишаване на температурата и ограничените възможности за отвеждане на газовете в муфата на вън от нея, са допълнителен и утежняващ фактор, който създава напрежение по вътрешната муфелна повърхност.
- Редуцирането на тегловното количество на опакованите тела влияе значително върху напреженията, възникващи по вътрешната повърхност на муфата.

- За елиминирането на първичните прототипи, 3D принтирани от Castable Resin[®] и Castable Wax[®], могат да се използват и други опаковъчни маси, различни от препоръчаните от Formlabs[™], но при определена модификация на условията.
- Не се наблюдава съществена разлика между Castable Wax[®] и Castable Resin[®] по отношение на възникване на пукнатини в муфелните стени, при обследваните опитни постановки.
- Предложените температурни режими от Formlabs[™] за елиминиране на първичните прототипи са неуспешни при изгаряне на плътни тела с обем еквивалентен на дву- или тричленно мостово тяло, респективно и по-големи обеми.
- С цел редуциране на напреженията по вътрешната муфелна повърхност, в резултат от термично разширение и образуващия се масивен газов напор при изгаряне на опакованите тела, детайлите могат да се модифицират софтуерно до кухи тела с отвори. Тези модификации от своя страна позволяват твърде ефективно елиминиране на прототипите без нарушаване на целостта на муфите, изработени от опаковъчни маси с якост на натиск от 5,5 МПа до 11 МПа.

ШЕСТА ГЛАВА

ПОДОБРЯВАНЕ НА УСЛОВИЯТА ЗА ЛЕЕНЕ ПОСРЕДСТВОМ ПРЕДВАРИТЕЛНА СОФТУЕРНА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОТОТИПИТЕ ПРЕДИ ТЯХНОТО ПРИНТИРАНЕ.

1. Оптимизиране на условията за леене чрез дигитално проектиране и 3D принтиране на обектите, заедно и монолитно с индивидуализирана отливна система.

Дигиталният образ на отливната система е 3D принтиран успешно. **Фиг.49.**



Фиг.49. На фигурата е изобразена материализираната отливна система от Castable Wax®, преди и след премахване на подпорните структури. Основата, която има конична форма, служи като средство за фиксиране на отливните щифтове, а също и на отливната система към отливния конус.

След промиване с изопропилов алкохол и отстраняване на подпорните структури, детайлът е готов за фиксиране към фабричния отливен конус. **Фиг.50.**



Фиг.50. На фигурата са изобразени фиксираната отливна система към фабричния отливен конус.

Видимо е съпадението на термалния център на муфата с резервните депа за метал. Наред с това коронковите модели са разположени в т.нар. благоприятни зони, а отливните щифтове и смукателни глави са с подходяща конфигурация, отговаряща напълно на дигитално зададената. На практика заложените параметри и постигнатите съотношения в дигитална среда са валидни и след материализиране и фиксиране на отливната система към отливния конус.

2. Подобряване на условията за леене чрез дигитално проектиране и 3D принтиране на обектите, заедно и монолитно с индивидуализирана леякова система, отливен пръстен и отливен конус.

Дигитално планираните и изработени отливна система, отливен пръстен и отливен конус са материализирани успешно като един монолитен обект. След промивка на принтирания обект с изопропилов алкохол, подпорните структури по повърхността на отливната форма се отстраняват. По този начин конструкциите са готови за опаковане, без да е необходима друга допълнителна подготовка. **Фиг.51.**



Фиг.51. Полученият резултат е детайл, състоящ се от: 3D принтирани монолитно отливен пръстен и конус, отливни щифтове, резервни депа за метал и прототипи на конструкции.

Затруднено е отстраняването на подпорните структури между отливната система и отливния пръстен и конус. На практика тези подпори могат и да не бъдат премахвани, понеже биха могли да изпълняват роля на отдушници, които да ускорят отвеждането на летливите продукти от горенето на полимера и да захранват с кислород вътрешността на муфата.

Този подход позволява прецизно селектиране на най-добрите условия за леене, с оглед на качествата на материала изграждащ прототипите,

характеристиките на опаковъчната маса и използваната сплав, както и вида на протезната конструкция и технологията на леене.

3. Обсъждане на получените резултати

Леенето не е точен процес предвид многото фактори, от които зависи репрезентативността на отливката. При изработване на изцяло дигитална леякова система по размери на фабричен отливен пръстен, конфигурацията ѝ трябва да бъде адаптирана към параметрите на отливния пръстен, като се спазят всички други условия за безпрепятствено протичане на процеса на леене. Наред с това виртуалното проектиране и аранжиране на отливната система дава възможност за точно определяне на централната термална зона на муфата, както и най-благоприятните зони за разположение на прототипите. Като се има предвид, че най-често използваният материал за изработване на отливна система е восъкът, а той лесно се деформира и има свойството да тече, то изработването на всички компоненти на отливната система монолитно редуцира възможностите за грешки. В резултат се постига по-сигурен и предвидим успех при процеса на леене.

В ежедневната практика се налага изработването на конструкции различни по вид, размери и обем. Това от своя страна изисква използването на богат набор от отливни пръстени. С оглед оптимизирането на процеса на леене е разработен подход за генериране на отливна система, пръстен и конус, изцяло дигитално и според изискванията наложени от характеристиките на протезните конструкции. Докато при конвенционалния подход детайлите се ориентират спрямо размерите на фабрично изработен отливен пръстен, тук прототипите се позиционират един спрямо друг, а отливният пръстен е индивидуално изработен за конкретния случай. Основен недостатък тук е сложността на детайлите в структурно отношение и нуждата от генериране на подпорни структури между отделните компоненти, като това създава известни трудности при последващото отстраняване на подпорите.

Дигиталното проектиране на отливна система е пестящ време метод. Наред с това е по-сигурен и по-точен подход, редуцирайки нуждата от аранжиране и фиксиране на редица компоненти в материалния свят и произтичащите от това затруднения.

4. Изводи по задача 4:

- Дигитализирането на изработването на отливна система позволява изключително точно позициониране на компонентите ѝ един спрямо друг.
- 3D принтираните отливни системи са по-устойчиви на външни влияния в сравнение с конвенционално изработените.
- Софтуерната подготовка на отливната система е процес, който спестява време в сравнение с конвенционалния подход.
- Дигиталният подход позволява индивидуализиране на различните детайли на отливната система, а заедно с това и на параметрите на отливният пръстен и конус.
- Изграждането на отливната система, отливния пръстен и отливния конус като един монолитен детайл, оптимизира процеса на леење, като наред с това осигурява по-голяма предвидимост и сигурност на получените резултати.

ИЗВОДИ

1. Предвид разнообразието от материали за изработване на първични прототипи на протезни конструкции и присъщите им строго специфични физични качества, за получаване на качествена отливка е нужно модифициране и индивидуализиране на процесите опаковане и термично елиминирание. Изключение правят восъците.
2. Независимо че някои от обследваните материали оставят известно пренебрежително количество пепелен остатък след изгаряне, количеството му е такова, че не би повлияло бъдещата отливка.
3. Температурно индуцираните физични промени както и количеството пепелен остатък, който Castable Resin[®] оставя след изгаряне, биха могли да позволят използването на смолата за целите на денталната медицина.
4. Смолата Castable Wax[®] осигурява условия за получаване на по-точни детайли спрямо Castable Resin[®], въпреки това и двете смоли са подходящи за изработване на прототипи по отношение на показателя точност на принтиране. За точността на принтиране от решаващо значение е ориентацията на принтираните детайли.
5. Материалът Castable Resin[®] има добри якостно-механични качества дори и без да е подложен на допълнителна полимеризация. С оглед на свиването, което е регистрирано, провеждането на допълнителен полимеризационен процес при Castable Resin[®] е нецелесъобразно.
6. Независимо че в резултат на софтуерната модификация до кухи обекти, телата променят в известна степен своите механични качества, точността на принтиране не се повлиява.
7. За получаване на отливка с добри качества при опаковани тела с голям обем, изработени от Castable Resin[®] и Castable Wax[®], е наложителна софтуерна модификация на детайлите до кухи детайли с отвор. Всички останали случаи, които не включват модификация на прототипите, водят до несигурен резултат или провал.
8. Изработването на дигитална отливна система осигурява значителната устойчивост и неимоверната точност при разполагане на отливните компоненти. Наред с това този подход пести време и осигурява по-предвидими и добри резултати.
9. Изграждането на отливната система, отливния пръстен и отливния конус, като един монолитен детайл, оптимизира процеса на леење, като заедно с това осигурява по-голяма предвидимост и сигурност на получените резултати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване е продиктувано от стремителното развитие през последното десетилетие на денталните материали, технологиите за тяхната обработка и изработка на дентални конструкции, както и дигитализирането на редица процеси в дентална медицина. С течение на годините адитивните технологии стават все по-застъпени в денталната медицина, като заедно с това все още има редица недоизяснени проблеми с тях.

В научния труд са обследвани възможностите за изработване на протезни прототипи чрез 3D принтиране по метода на селективна лазерна полимеризация и възможностите за получаване на лети метални конструкции от тях. Леенето е процес, който зависи от редица фактори, в т.ч. качествата на опакования материал и опаковъчната маса, температурния режим на елиминиране на прототипа. За тази цел на първо място са обследвани температурно индуцираните физични и обемни изменения, които настъпват в опитни детайли от различни материали. Отчетени са техните особености и са предложени варианти за решаване на установените проблеми.

Проблемът е разгледан и от друг ъгъл, като са обследвани възможностите на 3D принтиране на точни обекти. Отчетено е влиянето на позиционирането на изработвания обект спрямо посоката на принтиране. Успоредно с това е обследвано влиянието на градивния материал по отношение на точността на принтиране. Във връзка с направените изводи по задача 1, е предложен метод за софтуерна модификация на обектите до кухи детайли и кухи детайли с отвор. Резултатите и заключенията по задача 1 и задача 2 са приложени на практика, като работните хипотези бяха потвърдени. Заедно с това е предложен и иновативен подход за изработване на лети метални конструкции, чрез генериране на дигитални отливна система, отливен пръстен и конус.

Резултатите от настоящата научна разработка ще обогатят и актуализират настоящите познания за технологията на 3D принтиране на протезни прототипи за леене от метални сплави и последващото им заместване. Наред с това научният труд предлага иновативни подходи за оптимизиране на работния процес в зъботехническата лаборатория и денталния кабинет.

ПРИНОСИ

Приноси с научно-приложен характер:

- Приноси с оригинален характер:

1. Регистрирани и документиращи са макроскопските изменения, които настъпват в пробни тела, изработени от материали (Pattern Resin LS™, C-cast, CAD/CAM wax, Castable Resin®) предназначени за заместване с дентални сплави, в процеса на термично елиминиране.
2. Доказана е по-голяма точност на процеса на 3D принтиране при използване на смолата Castable Wax® в сравнение с Castable Resin®.
3. Доказано е, че процесът на постполимеризация на смолата Castable Resin®, не само че не е задължителен, но и води до деформация на детайлите.
4. Установена е ролята на тегловното количество на детайлите, изработени от Castable Wax® и Castable Resin®, върху напреженията, които възникват по стените на муфата в процеса на термично елиминиране и е предложена модификация, т.е. детайлите да се генерират софтуерно като кухи тела с отвор.
5. Доказана е възможността за приложението на Castable Wax® и Castable Resin® с други опаковъчни маси (Sherafina® Rapid).

- Приноси с потвърдителен характер:

1. Установено е и, че материалът Castable Resin® е подходящ за изработване на протезни прототипи, по отношение на точност на детайлите и наличен пепелен остатък след изгаряне. Наред с това е и доказан успешен температурен режим и опаковъчна маса, с които да се прилага.
2. Доказано е, че при 3D принтиране на детайли от Castable Wax® и Castable Resin®, с принтер Form® 2, може да се получават изключително точни протезни прототипи. Регистрирани са отклонения от порядъка на 25,27 µm. за Castable Resin® и 13,87 µm. за Castable Wax®.
3. Доказана е ролята на посоката на 3D принтиране за точността на изработвания обект.

Приноси с приложен характер:

- Приноси с оригинален характер:

1. Създаден е метод за дигитално проектиране на отливна система по зададени размери на фабричен отливен пръстен и конус и 3D принтирането им като монолитен обект.
2. Създаден е метод за дигитално създаване на индивидуализиран отливен пръстен и конус по дигитално проектирана отливна система и 3D принтирането им като монолитен обект.

ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Penchev P. Temperature Related Physical Changes of Different Materials for Fabrication of Patterns for Casting from Dental Alloys. International Journal of Science and Research. 2020;9(10):1466 - 71. doi: 10.21275/SR201024131835.
2. Penchev P., Katsarov S., Digital casting cone and sprue fabrication for 3D printed patterns designed for casting dental alloys., Journal of Medical and Dental Practice (Medinform), 2020; 7(2):1190-1263.
3. Katsarov S., Penchev P., Laboratory assessment of the accuracy of two different resins designed for 3D printing for cast metal frameworks and suprastructures., Clinical Oral Implants Research, 2020; 31.