



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
МАШИННО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра “Технология на машиностроенето
и металоурежещи машини”

Маг. инж. Тодор Цветиев Гаврилов

**Изследване и оптимизация на процеса на формообразуване,
бърза материализация и валидация на сложни структури и
импланти**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 “Машинно инженерство“

**Научна специалност: «Автоматизация на инженерния труд и
системи за автоматизирано проектиране»**

Научни ръководители:

проф. дн. инж. Георги Димитров Тодоров
гл.ас. д-р инж. Явор Петров Софронов

СОФИЯ, 2021г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Технология на машиностроенето и металоурежещи машини“ към „Машинно – технологичен факултет“ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 08.02.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 23.04.2021. от 14.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ 5.1-13/16.02.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

доц. д-р инж. Константин Христов Камберов - председател;
проф. д-р инж. Георги Димитров Тодоров – научен секретар;
проф. д-р инж. Ангел Антонов Диков – член;
проф. д-р инж. Венцеслав Цветанов Тошков – член;
проф. д-р инж. Николай Тончев Тончев - член.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно – технологичен факултет на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3230.

Дисертантът е редовен докторант към катедра “Технология на машиностроенето и металоурежещи машини” на „Машинно – технологичен факултет“. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Тодор Цветиев Гаврилов

Заглавие: Изследване и оптимизация на процеса на формообразуване, бърза материализация и валидация на сложни структури и импланти

Тираж: 30 броя

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертационният труд е насочен в областта на приложение на съвременните машиностроителни технологии, като фокус на работата е приложимостта на технологиите за високоскоростно фрезование, технологии с добавяне на материал за изграждане на полимерни и метални структури и хибридните технологии при създаването на медицински персонализирани имплантни структури и създаването и ремонта на формообразуващи инструменти.

Предложени са методики и подходи за решаване на проблеми в разглежданата област, които целят увеличаване на ефективността на технологиите и техническите средства, оптимизация на процесите и разширяване на областите им на приложение. Всичко това определя актуалността и значимостта на изследването в научно и приложно отношение.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направеният анализ на състоянието на разглежданият проблем е формулирана следната цел на дисертационната работа:

Да се изследват процесите свързани с изготвяне на сложни геометрични форми и импланти чрез иновативни индустриални технологии и възможностите за оптимизация на процеса на изработване с CAD/CAM решения.

От така определената цел произтичат следните основни задачи:

Задача № 1: Да се изследват и се осъществи оптимизация на конкурентни технологии за изработване на сложни структури и импланти.

Задача № 2: Да се направи сравнителен анализ на получените по различни технологии с добавяне или отнемане на материал тестови образци на сложни форми от персонални импланти.

Ще бъдат изработени образци, чрез използването на различни стратегии при високоскоростни при 3-осна и 5-осна обработка

След изработването на образците, ще бъде проведено измерване, за оценяване на постигнатите точности на най-важните части от сложната геометрия на импланта

Получените резултати ще бъдат използвани за избор на най-правилна стратегия, с цел оптимизация на време, постигната точност и разходи.

Задача № 3 Да се създаде методология за бърза материализация на сложни структури в ултра къси срокове по технология с отнемане на материал и с помощта на хибридни технологии.

Задача № 4: Да се разработи методология за валидация на формообразуващи инструменти и сложни структури.

Научна новост

Предложен е подход за избор на оптимална технология за изработване на персонализирани имплантни структури и костни репликации чрез отнемане на материал, чрез адитивни технологии и технология за отливане в силиконови матрици, където са оценени оценяване на предимствата и недостатъците им, според сложността на геометрията, необходимият брой изделия и целта на приложение.

Практическа приложимост

Предложен е метод за прилагане на хибриден подход при изготвяне на специфични импланти изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология и формоване на необходимия имплант в този инструмент

Предложен и валидиран е подход за производство на ФИ, като се използва единствено механична обработка на сложните формообразуващи повърхнини на една установка без пребазиране от инструментална стомана с предварителна термообработка до средна твърдост от порядъка на 30 +_ 3 HRC.

Предложената иновативна производствена стратегия за бързо създаване на ФИ води до намаляване на разходите, като в същото време се постига висока точност, гарантирана чрез 3D сканиране на точностните показатели.

Експериментално е доказано, че използването на инструментална стомана с предварителна термообработка до 30-35 HRC е остъчна за гарантиране на производство на 200 000 - 300 000 броя детайли.

Разработената стратегия е внедрена в реалната практика за създаване на много необходимите за началото на пандемията от КОВИД 19 медицински защитни очила и са постигнати уникални къси срокове от старта до серийното производство на изделията в рамките на сумарно 12 дни.

Сравнени са различни подходи за избор на заготовки и стратегии при изработване на импланти чрез отнемане на материал на 5-осен обработващ център по машинно време, цена на заготовката и брой установки.

Доказано е, че оптимизацията на стратегията на обработване води до редуциране на времето за изработка и на разходите при производство над два пъти и постигането на оптимални резултати по отношение на точността

Посредством 5 основно фрезование на имплант и правилно подбрани инструменти и режими е доказано постигане на по-производителен процес и по-дълъг живот на инструмента над два пъти.

Установено е експериментално, че високоскоростната обработка осигурява над два пъти по-ефективна производителност, която се постига първо със скоростта на рязане и второ със скоростта на подаване.

Разработена е методология за диагностика и ремонт на формообразуващи инструменти, като с помощта на различни софтуери, се поставя цялостна оценка за работоспособността му. Съгласно получените резултати са оформени 4 основни варианта за ремонта на инструмента.

В резултат на разработването на методология, от лаб. „Бързо прототипиране и 3D креативност“ се подготви нова услуга, включваща дейности по валидация на функционалността на формообразуващи инструменти (метрика, отклонения от формата, взаимното разположение) и идентификация за степента на износване, която предстои да бъде предложена на компаниите в България и чужбина, занимаващи се с производство на пластмасови детайли и формообразуващи инструменти.

Апробация

Изследванията по дисертацията са извършени в лабораториите “CAD/CAM/CAE в индустрията” към МТФ на ТУ-София и “3D Креативност и бързо прототипиране“ към СНИРД, като част от изследванията са осъществени при работата по съвместни индустриални проекти с “Арексим Инженеринг“ ЕАД. Резултатите от изследванията са внедрени и се ползват при развитието на нови продукти на “Арексим Инженеринг“ ЕАД.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 научно публикации, от които 1 самостоятелна и 1 полезен модел. Съществените резултати получени при разработване на дисертацията са докладвани на следните конференции и семинари:

Международния научен симпозиум : “Метрология И Метрологично Осигуряване 2020”

Международна научно-техническа конференция “Автоматизация на Дискретното Производство“ 2020

Международна конференция ‘Creative Business for Smart and Sustainable Growth 9 - 11 June 2020 “

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **191** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **103** литературни източници, като **75** са на латиница и **10** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **160** фигури и **10** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Индустриалните изделия се произвеждат от различни материали и по различни производствени технологии и методи, които могат да бъдат обобщени до [6]

Отнемане на материал (механична обработка, рязане, др.) – формата се получава чрез стружкообразуване на металорежещи и др. машини. Точността е висока, необходимото време за обработване е голямо а процеса скъп и зависещ от много фактори във времето;

Свързване (заваряване, лепене, др.) – детайлите се получават чрез свързване на части получени по други методи – използват се при големи размери;

Репликация (пренасяне на формата) – използване на ФИ за цялостно оформяне на детайлите от пластмаса, метални отливки, ламарина и др., най-често без необходимост от допълнително обработване.

Добавяне на материал – метални и полимерни структури се изграждат послойно, чрез отлагането на материал, който може да бъде полимерна нишка, инженерна смола, метален прах и др

1.1. Импланти

В днешно време имплантите навлизат все повече в здравеопазването, като биват стандартизирани и персонализирани. Стандартизираните се произвеждат серийно в няколко вариации, като за конкретен пациент и случай се избира най-подходящият. Все по-често се повдига темата за персонализирани импланти, изработени конкретно за даден пациент, съобразено с анатомичните особености на проблемната зона, заради по-доброто им представяне, спрямо стандартизираните, в оздравителния процес. Това се дължи на точното адаптиране към мястото на имплантиране, което намалява хирургичното време, като това от своя страна води до по-малки шансове за инфекция, по-бързо възстановяване и по-добра адаптация.

1.2. Технологии за формоизграждане на обекти със сложна геометрия и имплантни структури

Технология за високоскоростно фрезование (HSM – High Speed Milling) при бързо изработване на формообразуващи инструменти

Бързото прототипиране не е универсално решение за всеки проблем. CNC технологията, като алтернатива на методите с добавяне на материал е икономична, широко разпространена и предвидима, подходяща е за широк набор от материали и постига отлична точност. Въпреки това, ако се изисква производство на част или обект със сложна или средно сложна геометрия, използването на бърза адитивна технология дава предимство. Когато са налице обичайни случаи, е лесно да се направи заключение с коя технология да се продължи – CNC или RP. Но често изборът на най-подходящ метод не е ясен в самото начало, променя се постоянно в етапите на развоя и зависи от конкретните фактори. Въпреки точността на адитивните методи, те не са толкова точни, колкото CNC и особено високоскоростното обработване на материалите (High Speed Machining (HSM)), дори когато детайлите са от материал с повишена твърдост (фиг1.1).



фиг. 1.1 HSM обработване на сложна повърхнина от формообразуващ инструмент

Селективно лазерно разтопяване SLM

The diagram illustrates a laser-based micro-manufacturing process for a microfluidic chip. A laser beam (red) is focused through a lens (11) onto a substrate (1). The substrate is mounted on a stage (5) with a coordinate system (x, y, z). A blue channel (3) and a yellow channel (4) are visible. A green arrow (10) indicates the direction of material removal. A magnified view (200 μm) shows the laser spot (6) and the resulting microstructure (7). A warning symbol (8) is present.

фиг. 1.2 Технологична схема на SLM процеса - 1 – Лазерен източник; 2 – Напречна струя процесен газ; 3 – Бункер с прахообразен материал; 4 – Устройство за нанасяне на слоеве; 5 – Входящ процесен газ; 6 – Огледала; 7 – Лещи; 8 – Изходящ процесен газ; 9 – Слой материал; 10 – Маса; 11 – Оптична система[73]

При DMD процеса, прахообразни метални частици 2 се отвеждат посредством състен транспортен газ до екструдирателната глава 1. Там материалът бива разтопен посредством лазерен лъч, фокусиран от лещите 5. Материалът бива положен в течно състояние върху подвижната платформа 3, която се движи по оси X и Y. Така първият слой се отпечатва. След отпечатването му главата се издига нагоре на стъпка, равна на дебелината на един слой от напречното сечение на модела и така процесът се повтаря до завършване на работата. От същия материал се изработва и поддържащата структура на модела.

Площта на „строене“ обикновено е защитена чрез неутрален газ (аргон) в обдухвана локална област около зоната на работа, за да изолира процеса от околната среда и да предпази операторите от евентуално излагане на фини прахове и лазерния лъч. Мощността на лазера варира значително, от няколко стотин вата до 20 kW, в зависимост от конкретно използвания материал, скоростта и други параметри. Изработените обекти са плътни, но като цяло се изисква механична обработка, поради високата грапавост и ниската точност на повърхнините, която много често е и финална.

Хибридна адитивна/ механична технология

Днес успехът на адитивното производство се състои в това, че се използват високоспециализирани самостоятелни машини, посветени изцяло на процеса на изграждане тип „отдолу-нагоре“. SLS технологията за 3D принтинг на метали са ярък пример за това. Надеждността и усъвършенстването на тези машини е достигнала връх в производството, като в момента се влагат значителни инвестиции и се разчита на тях да създават геометрично сложни детайли за масово потребление. Изработените обекти са плътни, но като цяло се изисква механична обработка поради високата грапавост и ниската точност на повърхнините, която много често е и финална. Това налага комбинирането на тази технология в системи с включена механична обработка чрез отнемане на материал или в така наречената хибридна обработка.

1.3. Изводи

Извършеното литературно проучване на съществуващите технологии за изграждане на сложни геометрични форми и импланти дава възможност да се формулират следните по-важни изводи:

Към настоящия момент има добро развитие на класическите технологии за конструиране и изработване на сложни геометрични форми и импланти. Поради факта, че те се основават изключително на конвенционални способности и зависят от субективния фактор, са свързани с консумирането на много време и често донапасване на желаната форма и геометрична точност.

Забелязва се динамично навлизане на нови прогресивни технологии, базирани на CAD/CAM и адитивни процеси. Така става възможно да се постига голяма бързина на изпълнение, на анатомична уникалност на всеки елемент, на отлична геометрична точност.

Съществуват три технологични подхода за създаване на сложни геометрични форми и импланти:

- чрез отнемане на материал (фрезование);
- чрез добавяне на материал (адитивни технологии);
- чрез хибридни(паралелно прилагани) и комбинирани (последователно прилагани) технологии за бързо изграждане.

В рамките на направеното проучване не бяха открити директно приложими и ясни методологии и изследвания за ефективността на технологиите за бързо изграждане на сложни геометрични форми и импланти и съпоставка, която да е практически приложима.

Не са установени приложими методи и подходи за използване на хибридни технологии при бързо изграждане на сложни геометрични форми и импланти.

Не бяха открити ясно формулирани количествени сравнения между 3 и 5 осните фрезови HSM обработки и защо последните биха били предпочитан избор за изработването на сложни геометрични форми и импланти.

2. ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОНКУРЕНТНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ИЗРАБОТВАНЕ НА СЛОЖНИ СТРУКТУРИ И ИМПЛАНТИ

Имплантите навлизат все повече в здравеопазването, като биват стандартизирани и персонализирани.



а) Прототип на кейджа, изготвен с добавяне на материал



б) Прототип на олекотен кейдж, изготвен с добавяне на материал



в) Прототип на кейджа, изготвен с отнемане на материал

фиг. 2.1 Прототипи на гръбначни импланти произведени по различни технологии

Персонализираните импланти придобиват все по-голямо значение, поради по-точното адаптиране към региона на имплантиране и намаленото хирургическо време. Прилагането на 3D моделиране променя начина, по който хирурзите планират операциите си и начина, по който инженерите проектират персонализирани импланти.

2.1. Разработване на гръбначен имплант тип „кейдж“

В хода на това изследване бяха създадени няколко прототипа на разработвания имплант кейдж, целящи да валидират различни аспекти на методиката. Респективно, те са обособени в няколко стъпки (етапа).(фиг. 2.1)

Прототип на прешлени

Изработени са общо четири прешлена, използвани за проби с цел валидация на изработените кейджове – това са прешлени C3, C4, C5 и C6. Изработените прешлени са показани на фиг. 2.2.



фиг. 2.2 Прототип на прешлени C3, C4, C5 и C6

Монтаж на титаниев имплант в прототипа на прешлени от клиничен случай No2

Кейджът е монтиран върху долните прешлени C5 и C6, като е оценен контакта (интерфейс) между кейджа и прешлена C5. Направен е оглед и анализ на закрепването и контактните повърхности, като практическата оценка сочи че тази схема дава добър контакт и е напълно приложима.

Монтаж на титаниев кейдж в коригиран прототип на прешлени

Следваща стъпка е по изследване на вариант с корекция на шийните прешлени, за по-добро сглобяване на титаниевия кейдж. Сглобения кейдж и извършената корекция са показани на фиг. 2.3 по-долу.



фиг. 2.3 Сглобен прототип на кейдж след корекция на шийните прешлени

Заклучение

Изработените прототипи на кейджове са сглобени в модели на участъци от шийни прешлени, като по този начин е извършена валидация на развитата методика. Апробирани са различни аспекти и възможни случаи на изпълнение на кейджовете, като за целта са използвани три клинични случая.

Анализа на резултатите от физическото прототипиране доведе до няколко основни препоръки към виртуалния модел на кейджа:

- необходима промяна на контактната повърхнина на кейджа – използване на напречни канали за по-добро осигуряване на връзката „кейдж – прешлен“;
- възможност за задаване на овалност на кейджа – изпълнение на контактната повърхнина като част от сферична/цилиндрична такава;
- редакция на дефинирания параметричен модел, с цел улесняване на изпълнението на различни варианти типоразмери на кейджа.

Изготвените препоръки са отразени във финалния параметричен виртуален модел на кейджа и подлежат на по-нататъшно използване в практиката.

2.2. Технологии за изработване на малки серии на костни репликации

Производството на полимерен прототип на имплант за верификация на геометрията или създаването на малка серия репликации на костни структури е предизвикателна задача. Подобни сетове от полимерни репликации могат да послужат за упражнения при медицински студенти, за извършване на оперативно планиране за поставяне на имплант, заменящ увреден лумбален интервертебрален диск. Дисковете импланти имат за цел да заместят увредения лумбален диск и да намали натиска върху нервните окончания, като осигури пространството между двата прешлена.

Повечето конвенционални технологии не са приложими, заради висока производствена цена или отнемане на прекалено много времеви ресурс. За избор на подходяща производствена технология е следвана блок-диаграмата показана на фиг. 2.4, която разглежда подходящи технологии за производство на полимерни детайли, спрямо производствения обем и сложността на геометрията.



фиг. 2.4 Избор на подходяща технология

При разгледан пример за производство на малка партида репликации на гръбначни прешлени вариантите за производствена технология са сведени до две:

- 3D принтиране по FDM технология
- Репликация в силиконова матрица

Разгледани са предимствата и недостатъците на двете технологии, за да се вземе адекватен избор за технология. Съпоставка между технологиите по време необходимо за производство на 1 брой е показана на фиг. 2.5.

Значителното предимство и по двата критерия определят избора на технология, а именно отливане в силиконова матрица. Друго основно предимство на репликациите в силиконови матрици е постигането на по-висока точност в сравнение с изграждане, чрез FDM технология, където е нужно провеждане на редица тестове с еталонен модел за компенсация на топлинните изкривявания и отклонения в размерите. [79]



фиг. 2.5 Графика на съпоставка на време за производство/обем на детайл

Последователността по изработване на силиконова матрица е обобщен в блок-диаграма, показана на фиг. 2.6

**Последователност при процеса на създаване на
силиконови матрици**



фиг. 2.6 Последователност при изработване на силиконова матрица

Отлятите прешлени се изваждат от матрицата и следва да бъдат почистени от елементите на леяковата система – фиг. 2.7

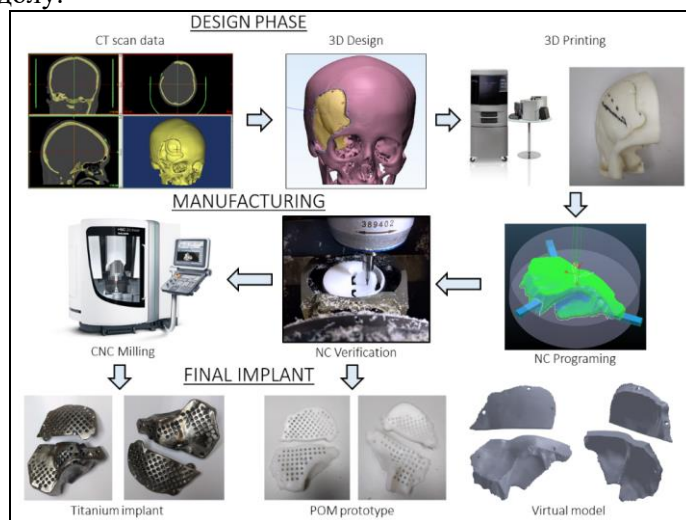


фиг. 2.7 Репликация на гръбначен преилен, произведен, чрез лееие в силиконова матрица

2.3. Индустриални технологии за бързо изграждане (Rapid Prototyping), работещи с отнемане на материал

Работен процес

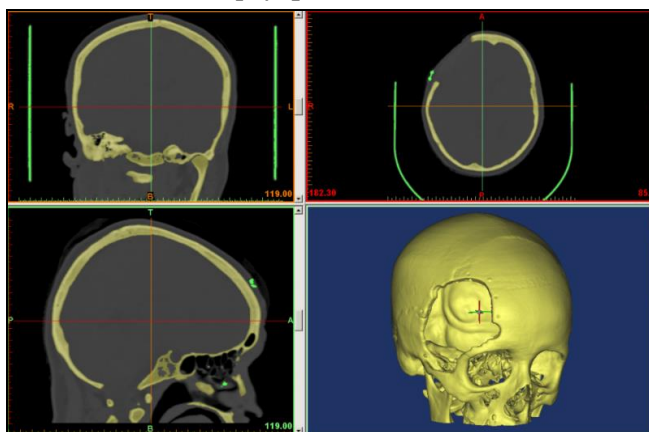
Диаграмата на работния процес за CAD/CAM изработени импланти е показана на фиг. 2.8 и е описана накратко по-долу.



фиг. 2.8 Метод за проектиране и производство на CAD/CAM изработени импланти

В света на техниката процесът е известен като "ревърс инженеринг" и започва с извличане на данни от компютърна томография (CT scan data) за сканиране или данни от 2D изображения от магнитен резонанс като DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) файлове. След това DICOM данните се обработват с помощта на софтуер, като MIMICS, Biobuild или други, за да се създаде тримерен модел на анатомията. 3D моделът се внася в софтуер за тримерна обработка, като например софтуер за свободно моделиране Freeform Geomagic или CAD базиран софтуер като 3 Matic, за да се създаде крайния имплант дизайн. След това имплантът се произвежда с технология за отнемане на материала или чрез технология, работеща с послойно добавяне на материал.

Импортиране на ct данни със софтуера mimics



фиг. 2.9 Импортиране на томографските данни в софтуера Mimics

Медицинските образи, идващи от апаратура за томография или ядрено-магнитен резонанс, представят информацията за картината под формата на нива на сивото.(фиг.2.9) Чрез Mimics се създава тримерен модел, базиран на тези стойности на сивото чрез т.н. Хаунсфийлдови единици в томографските изображения. Тези стойности на сивото представляват число, свързано с цветната характеристика на пиксела в изображението (степен на бяло, сиво или черно). Съществува пряка зависимост между плътността на материала на сканирания обект и стойностите за цвят на всеки пиксел в данните на изображението. Mimics създава модели с всякаква геометрия, различима в рамките на данните от сканирането, чрез обединяване на сходни цветови гами. Този вид сегментация се нарича „Thresholding“или метод на прагови стойности и е намерил приложение в медицината, заради точността на генерираните модели.

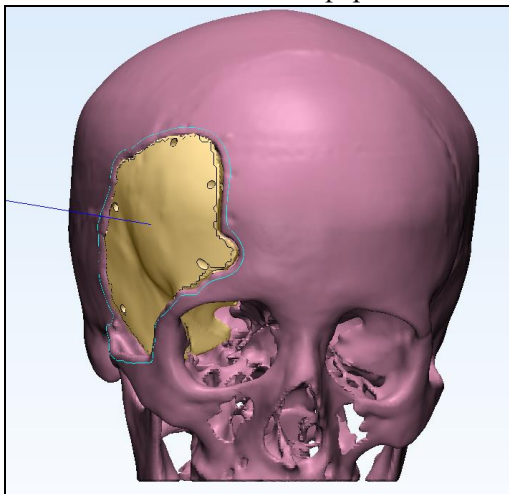
Следващата стъпка в създаването на точен имплант е обработката на извлечената информация чрез софтуера “3-matic”.

- **Допълнителна обработка чрез софтуера 3-MATIC**

Към дизайна на персонализирани лицево-черепни импланти е необходимо да се интегрират съседните анатомични структури. Първата част от подготовката на тримерния модел включва създаване на очертаването на черепната равнина около травмираната част. Също такава повърхнината се подлага на изглаждаща операция, която намаля броя на генерираните триъгълници в STL модела, което го прави по-лесен за работа. Важна стъпка при изготвянето на кривината, е тя да бъде дефинирана близо до увредената част на черепа, но така, че да се запази тангенциалност между черепа и изработвания имплант. 3-matic разполага и с функция, която позволява наблюдаването на тези зони, като проектира цветна карта директно върху модела.

Следващата стъпка от създаването на импланта е използването на здравата геометрия на черепа, като се изгражда огледален образ. Използването на контура за съвпадане по външната част на черепа, но за вътрешната е нужно да се определи посока на изваждане.

В последната стъпка импланта се подлага на няколко операции, една от които е преместване на външния контур(offset) навътре. По този начин се гарантира мястото, около което импланта да зарасне правилно към костта. Финалната форма на импланта е показана на фиг. 2.10.

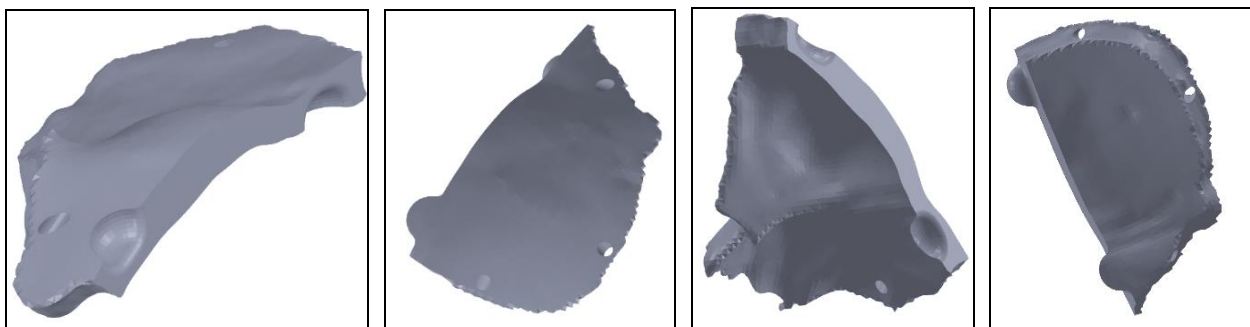


фиг. 2.10 Финална форма на импланта

Подготовка на модела на импланта в среда на софтуера Magics

Заради ограниченията на формата, поставени от дисковата заготовка, имплантът е разделен на две части, които в последствие биват защити една към друга чрез специализиран медицински титаниев конец. За целта се добавят серия отвори в импланта, чрез които двете части на импланта се прикрепят заедно и след това към черепа на пациента. Първата стъпка от обработката на импланта е неговото разделяне на две части в средата на софтуера Magics, като за целта се генерира права равнина за изрязване.

Добавени са двойка издутини и вдлъбнатини намиращи се по правите участъци, останали от изрязването. Те имат за цел да подсилят прикрепянето на двете части на импланта и да отнемат напречното движение на импланта след операцията.(фиг.2.11)



фиг. 2.11 Добавяне на издутини и вдлъбнатини

Производство с отнемане на материал - CNC технология

За физическата изработката чрез отнемане на материал е използвана машина фрезови център DMG Ultrasonic 20, която е налична в лабораторията “CAD/CAM/CAE в индустрията” към машиностроителния факултет на Техническият Университет София България.

Финалната форма на импланта е показана на фиг. 2.12. Двете части на импланта в крайният си вид имат общо тегло 85 грама, респективно 30 и 55 грама.



фиг. 2.12 Двете части на импланта в крайния си вид след механични довършителни операции

Заклучение

В заключение създаването на персонализиран лицево-черепен имплант е трудна процедура, включваща съвместна работа между хирурзи и инженери. Тя комбинира технологиите за тримерно моделиране, знанията за материалите и начините за тяхната обработка с томографски изображения и техники от медицината, свързани с разработване на импланти за лицево-черепни реконструкции. Две технологични сфери, които напоследък все повече работят заедно в задачата по създаване на резервни части за най-комплексната машина – човекът.

2.4. Изводи към глава 2

CAD/CAM технологиите и адитивните технологии (3D печат) се прилагат все по-широко в различни сфери на медицината – предоперативно виртуално 3D планиране, подготовка и симулация на предстоящата оперативна процедура; информираност и образование на пациента; производство на индивидуални, поръчкови импланти за краниална хирургия (черепни дефекти), производство на индивидуални, поръчкови импланти за спинална хирургия (неопластични лезии и травматични увреждания) и др., чрез демократизация на персонализиран и индивидуализиран подход към пациента;

Във всички приложения процесът може да бъде описан като подобен и включва: сканиране на зоната за интервенция на пациента, реконструиране на костната система, концепция на индивидуализирания имплант, проектиране, инженеринг и производство с цялостен контрол и мониторинг на всяка стъпка;

3D технологиите имат потенциал да осигурят по-добро планиране, по-добри резултати, по-кратко време на работа, по-ниска степен на усложнения, съкратен период на възстановяване и престой в болница и като резултат – по-добри грижи за пациентите;

Аддитивните технологии (3D печат) вече са и ще бъдат важна част от съвременната неврохирургична практика. Със своите неоспорими предимства при персонализацията и планирането, 3D технологиите имат потенциал да променят терапевтичното мислене, да преорганизират някои установени практики и да се дадат нови възможности за по-добро лечение на патологиите.

Разработен е специален метод за прилагане на хибриден подход при изготвяне на специфични импланти. Използват се технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология (материализация на негативно изображение) и формоване на необходимия имплант в този еднократен инструмент до втвърдяването му.

Предложеният метод за бързо физическо и виртуално прототипиране позволява в кратки срокове да се проектират и изработват животоспасяващи импланти, които дават възможност за все повече успешни трансплантации.

3. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ ПО РАЗЛИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ С ДОБАВЯНЕ ИЛИ ОТНЕМАНЕ НА МАТЕРИАЛ ТЕСТОВИ ОБРАЗЦИ НА СЛОЖНИ ФОРМИ ОТ ПЕРСОНАЛНИ ИМПЛАНТИ.

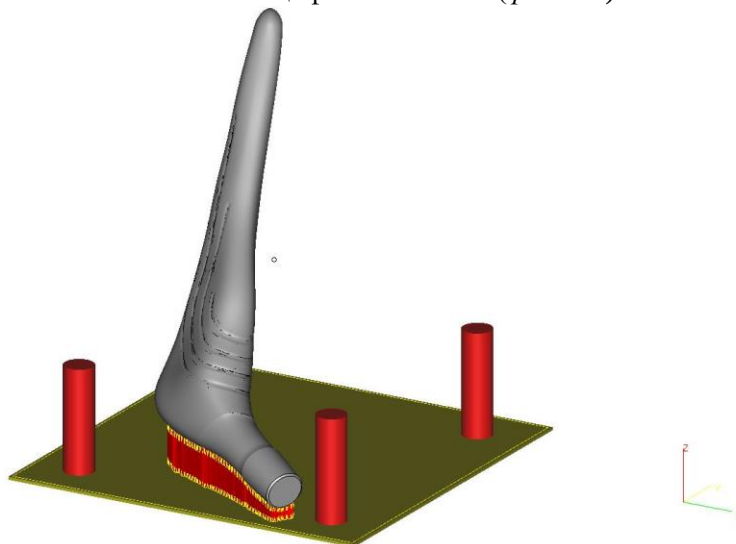
3.1. Цел на изследването

Три технологии за бързо прототипиране са сравнени за производството в зависимост от дадения имплант и неговия материал. Разгледани са две RP технологии, включващи добавяне на материал и една, свързана с отнемането му, като също са отбелязани предимствата им в производството на импланти.

Производство на бедреното стъбло, чрез SLM технология

От финалната версия на 3D CAD модела трябва да се създаде физически модел на ендопротезата. За да се произведе бедреното стъбло, ориентацията на импланта, поддържащите структури и параметрите на процеса се зареждат в AutoFab®, където се създава файлът на управляващата програма.

Ориентацията на бедреното стъбло трябва да бъде съобразена, така че площта на сеченията по слоеве да е възможно по-малка, но също така в съответствие с малката работна зона на SLM 125HL. Достатъчността на тези две условия дава оптималното положение на бедрената стъбла, като се има предвид работната зона на тази специфична машина (фиг. 3.1).



фиг. 3.1 Ориентация при принтиране на бедреното стъбло в SLM 125HL.

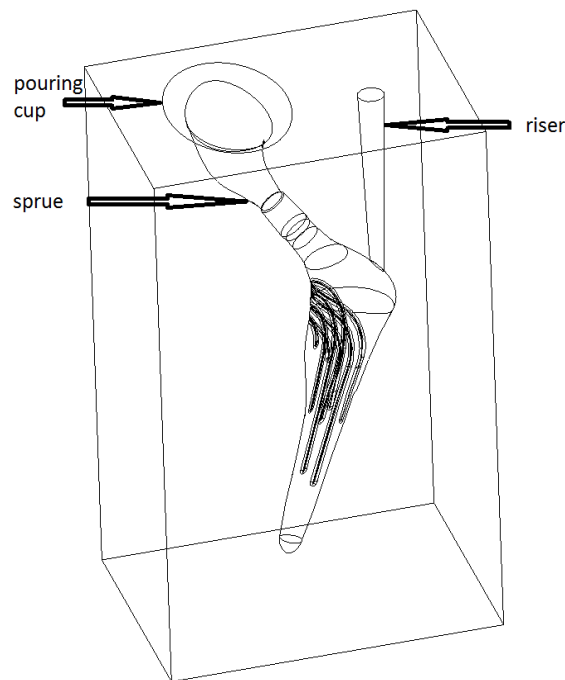
За да се постигне работен процес и да се получи качествена конструкция на импланта, трябва да се зададат правилните параметри. При задаване на дебелината на слоя на 30µm се изчислява, че общият брой на слоевете е 4002, при което поддържащите слоеве са 133. Останалите параметри са настроени по подходящ начин на Ti-6AL4V. (фиг.3.2)

☒ Machine costs		2274.79 €
Slice number	4002	
Support slices	133	
Contour distance	639.6684	m
Support distance	373.7531	m
Hatch distance	14400.0957	m
Idle distance	1239.4185	m
Contour speed	0.4250	m/s
Support speed	0.7000	m/s
Hatch speed	0.3750	m/s
Idle speed	12.0000	m/s
Recoating time	10.0000	s
Build time	22 44 52	h/m/s
Hourly rate	100.00	€/h
☒ Postprocessing		100.00 €
Total costs		2650.94 €
Close		

фиг. 3.2 SLM стойности на процесни параметри

Изработване на бедрено стъбло, чрез технология за отливане в адитивно произведени пясъчни форми

За да се изгради адитивно пясъчната форма за отливане на бедреното стъбло, първо трябва да се разработи CAD модел. Той съдържа всички елементи на леярската екипировка. В случая системата за леење се състои от чаша за изливане, леяк и мъртва глава (фиг. 3.3).



фиг. 3.3 CAD модел на пясъчна форма за отливане на бедрено стъбло

След като CAD моделът е готов, се генерира STL файл, използван за адитивното производство на леярската форма. Софтуерът Rapiх3D се използва за нарязване на матрицата на слоеве, чиято дебелина е равна на диаметъра на използвания прах – 30 μm . Когато нарязването е готово, софтуерът изчислява общия брой слоеве и времето за изграждане. Общият брой на слоевете е изчислен на 833 слоя и височината на горния слой е 249,9 мм. Времето за изграждане на леярската екипировка е 7 часа 24 мин.(таблица 3.1)

таблица 3-1 Параметри при производство на пясъчна форма за леене на бедреноо стъбло

Обем на формата	0,004 m ³
Обем на неслепения пясък	0,046m ³
Общ обем пясък	50m ³
Маса на общия използван пясък	8kg
Обем на свързващото вещество на фуран	0.135l
Общо време за изграждане	7h 30m
Цена на изграждане на час	35€
Обща цена на изработка	225€
Маса на бедреното стъбло	0,245kg.
Обща маса на титана (бедрено стъбло + мъртви глави)	0,4kg
Титан цена за кг.	30€
Титанова цена за отливане	12€
Разходи за леене	50€
Разходи за по-нататъшна обработка	40€
Обща цена за производство	~330€

Въз основа на времето, изчислено от софтуера при разделянето на модела на слоеве, се изчислява цена на изграждане. При общо време на изработка от 7 часа и 30 минути, общата цена за отпечатване на леярската форма е равна на 225 €. Това, обаче, не е общото време и цена за производство на импланта. Той ще бъде формулиран върху сумата от цената на леярската екипировка и разходите за отливането на бедреното стъбло от титан. Изчислява се от цените на материала за килограм и разходи за отливане. Поради грубата структура, получена при леене в пясък, някои от елементите на бедрената стебла ще изискват допълнителна обработка за постигане на по-добро качество и точност на повърхността.

Изработване на персонализирани ендопротези, чрез използването на различни стратегии при високоскоростни при 3-осна и 5-осна обработка

За механичната обработка на импланта е използвана машината SAUER Ultrasonic 20 linear, на DMG Mori, намираща се в Технически Университет София. която представлява 5-осен обработващ център за високо скоростно фрезование, като част от основните предимства на машината са линейните двигатели, гарантиращи висока точност, и технологията ULTRASONIC.

Подход 1

При първият подход избран за изработване на бедреното стъбло, за заготовка е избрана шина с размери 70x30 мм и дължина 180 мм. Заготовката е закрепена на масата на обработващия център, чрез винтове.

Груба обработка

Целта на грубите операции е да се премахне максимално количество материал за единица време.

Чиста обработка

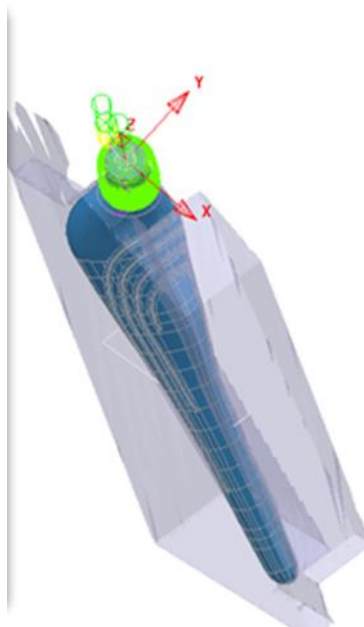
Целта на чистата обработка е да се постигне максимално висока точност и качество на повърхнините на импланта. При чистите обработки е критична точността от предходните инструментални преходи, при които останалата прибавка трябва да е равномерна. Използваният инструмент е радиусна фреза с диаметър 6 мм и 4 режещи ръба.

Чиста обработка при върха на бедреното стъбло

За ефективното обработване на тези повърхнини е необходимо да се приложи 5 осна стратегия на обработка, тъй като се наблюдава стеснение в удължената част, което не е достъпно при 3 осна обработка. (фиг.3.4)

Чистата обработка на тази част от импланта е особено отговорна, тъй като чрез нея се гарантира правилното прилягане на бедрената глава върху бедреното стъбло.

Използваният инструмент е радиусна фреза с диаметър 6 мм и 4 режещи ръба.



фиг. 3.4 –чиста обработка на върха на бедреното стебло

Подход 2

При този подход заготовката, която се използва е прът с кръгло сечение с диаметър 60 мм и работна дължина 175 мм. Тъй като заготовката е захваната в цангодържач е необходимо да се предвиди дължина по-голяма от минималната, в която имплантът се вписва.

При този подход, установката бива само една, а инструменталните преходи два.

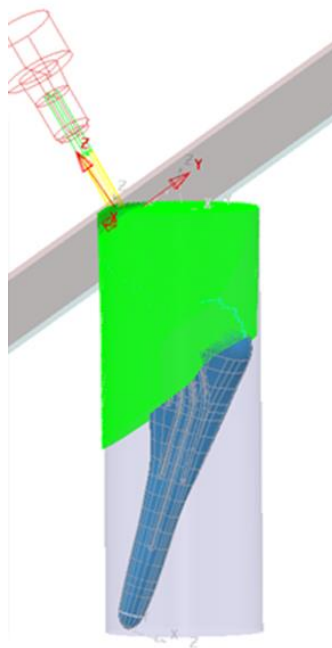
Инструментален преход при подход 2

Инструментален преход 1

При първата програма координатната система е разположена на върха на бедреното стебло, като оста Z съвпада с оста на конуса. Целта при тази обработка е свалянето на максимално количество материал, до това ниво по ос Z, до което ориентацията на инструмента е ефективна.(фиг.3.5)

Използваните режими за процеса на рязане са следните: скорост $V_c=50$ м/мин, подаване $s_Z=0.023$ мм/Z, дълбочина на рязане $T=1$ мм, стъпка между преходите $B=0.5$ мм.

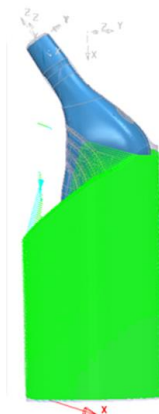
За финалния изчистващ пас, стъпката е 0.2 мм.



фиг. 3.5 Инструментален преход 1

Инструментален преход 2

При следващата операция се отстранява останалия материал, като се променя оста на захода на инструмента. Обработката се извършва при едновременни движения по 5 оси.(фиг.3.6)



фиг. 3.6 – Инструментален преход 2

Сравнителен анализ

За да се прецени кой подход е по-подходящ за изработването на бедреното стебло е необходимо да се направи сравнение на двата подхода на база време за изработка, необходим брой инструменти, брой установки, брой инструментални преходи и цена на заготовка.

Резултатите от направения сравнителен анализ са показани в таблицата 3.2 по-долу.

таблица 3-2 Сравнителен анализ

	Подход 1	Подход 2
Заготовка вид	Шина	Прът
Тегло на заготовка	1,6 кг.	2,5 кг.
Цена на заготовка при 80 лв./кг.	120 лв.	200 лв.
Брой установки	3	1
Брой инструментални преходи	8	2
Общо машинно време	6 часа и 2 мин.	10 часа и 8 мин.

Валидиране на подход 1

За да се валидират управляващите програми при избрания подход е изработен демонстрационен имплант от алуминий, като единствено режимите на рязане са адаптирани към материала. (фиг.3.7)



фиг. 3.7 имплант

От направената валидация може да се заключи, че подходът е адекватен и съобразен с възможностите и работната зона на машината. От това следва, че имплантът може да бъде изработен при същия подход и от медицински сертифициран титан.

3.2. Резултати

Изследвани са възможностите за изработване на персонализирани имплантни структури и костни репликации, както по технология, чрез отнемане на материал, така и чрез адитивни технологии и технология за отливане в силиконови матрици. Отбелязани са предимствата и недостатъците на различните методи, според сложността на геометрията, необходимият брой и целта на приложение. Резултатите са обобщени в блок диаграма.

Направено е сравнение на подходи при избор на заготовки и стратегии при изработване на импланти, чрез отнемане на материал на 5-осен обработващ център DMG-Mori Ultrasonic 20 Linear, като за оптимизация при избора са взети възпредвид машинно време, цена на заготовката и брой установки. Резултатите от подобна оптимизация се очаква да доведе до освен до редуциране на времето за изработка и на разходите при производство, но и постигането на оптимални резултати, визирайки точността, която е ключово важна при производството на импланти.

Изработен е имплант от типа бедрено стебло от титаниева сплав, при 5 основно фрезозване, което подпомага разкриването на възможности за повишаване на точността и сложността на конструкциите, както и получаване на по-добро качество на фрезозваните повърхнини респективно по-ниска грапавост поради динамичното поддържане на ъгъла между оста на инструмента и нормалата към повърхнината в точката на контакта, което оказва значимо влияние при комплексните форми на денталните импланти.

Посредством 5 основно фрезозване и правилно подбрани инструменти и режими може да се търси по-производителен процес или 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 (остатъка им до голяма степен се демпфира), което води до получаване на повърхнини с много голямо качество и висока точност на изпълнение.

3.3. Изводи към глава 3

Представено е сравнение на база маса и цена на заготовките, време за обработка, брой установки, брой инструменти, като са оценени и други силни и слаби страни на подходите.

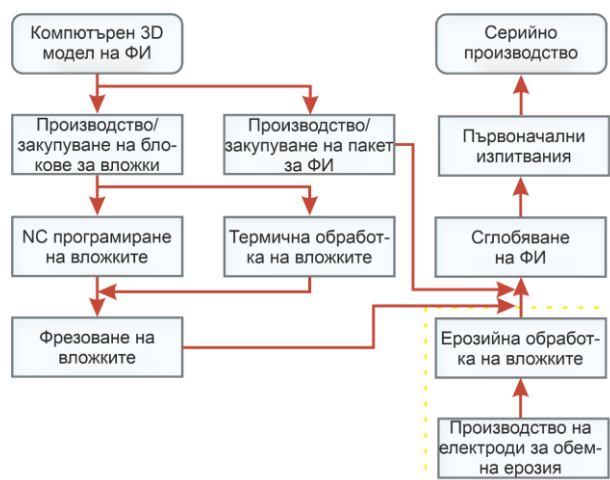
Сравнени са два характерни подхода, при които се използват различни заготовки с различно тегло и цена, време за обработка, брой установки, брой необходими инструменти, като тези елементи са оценени количествено. Резултатът е постигането на оптимално машинно време и повърхнини с високо качество и точност.

Може да се посочи, че е постигнат оптимизиран процес на изработване на примерния имплант, като е определен подходящият подход и установки при обработването. и други силни и слаби страни на подходите.

4. СЪЗДАВАНЕ НА МЕТОДОЛОГИЯ ЗА БЪРЗА МАТЕРИАЛИЗАЦИЯ НА СЛОЖНИ СТРУКТУРИ ОТ ФОРМООБРАЗУВАЩ ИНСТРУМЕНТ В УЛТРА КЪСИ СРОКОВЕ

4.1. Цел на изследването

В това изследване е направен преглед на производствения цикъл на формообразуващ инструмент за предпазни очила в изключително кратки срокове. Тази задача за проектиране, разработване и серийно производство на предпазни очила е възложена от Министерството на икономиката на Република България, свързана със ситуацията с COVID-19 и затрудненията при доставки на стоки. При изпълнението на задачата екипите и машинното оборудване на лаборатория „3D креативност и бързо прототипиране“ в София Тех Парк, лаборатория „CAD / CAM / CAE в индустрията“ във Машинно технологичния факултет в Техническият университет в София и българската индустриална компания Аресим инженеринг ЕАД. Договореният краен срок за започване на серийно производство е 14 дни от датата на заданието. За да бъде спазен уговореният срок е ревизирана класическата методика за изработване на формообразуващ инструмент и е разработена стратегия за съкратен производствен цикъл на формообразуващия инструмент.(фиг.4.1)



фиг. 4.1 Класическа методология по изработка на формовъщ инструмент

4.2. Методология за бърза материализация на сложни структури от формообразуващ инструмент в ултра къси срокове.

Стратегията предвижда производство на формообразуващи инструменти (ФИ) с първоначални временни вложки, произведени от инструментална стомана с предварителна термообработка до 30-35 HRC. Тези ФИ са предвидени за производство на 200 000 - 300 000 броя детайли. Цели се колкото е възможно повече от повърхнините на геометрията да бъдат произведени изцяло чрез CNC обработка с инструменти с малък диаметър, удължени фрези и фрези със специфична геометрия, тъй като електроерозийните обработки изискват установяване в друга машина и самият процес е времеемък. В случаите, когато във формата има малки повърхнини с труден достъп и дълбоки участъци, ерозионната обработка е неизбежна. За грубите обработки на вложките за матрицата и поансона се използва високоскоростно фрезование (HSM), като една от модерните технологии за механична обработка [41], като тя се явява особено ефикасна за бързо производство на формообразуващи инструменти. [42][81] Високоскоростната обработка осигурява два пъти по-ефективна производителност, която се постига първо със скоростта на рязане и второ със скоростта на подаване. [49] С отстраняването на електроерозийната обработка от производствения цикъл се избягва производството на електроди. Тази производствена стратегия позволява бързо създаване на ФИ с намалени разходи, като в същото време се постига висока точност, тъй като по време и след производствения процес се извършва валидиране на прецизността.

Междувременно времето, необходимо за производството на първоначалните серии от 200 000 – 300 000, се използва за създаване на електроди за механична обработка и съответно нови постоянни плочи на сърцевината и кухината, които ще заменят временните на вече произведената основа на матрицата. Разработената стратегия е обобщена на фиг. 4.2.



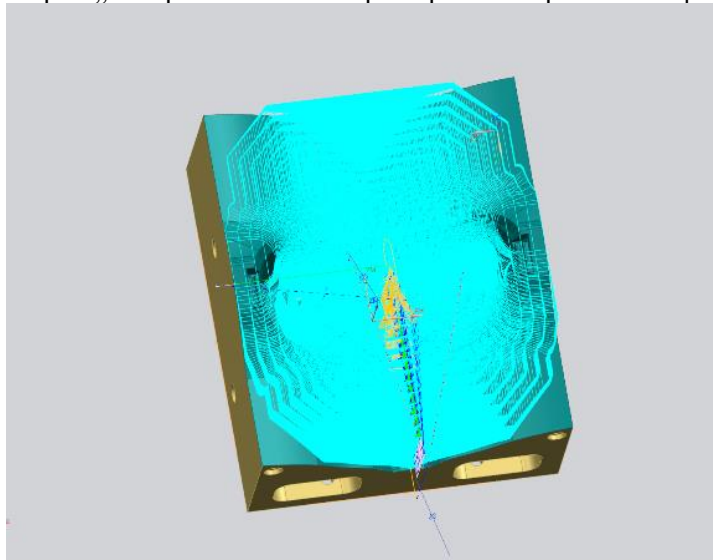
фиг. 4.2 Методология за изработване на ФИ в максимално кратки срокове

4.3. Производство на формообразуващ инструмент за предпазни очила

За производството на формообразуващия инструмент на предпазни очила се следва разработената методология.

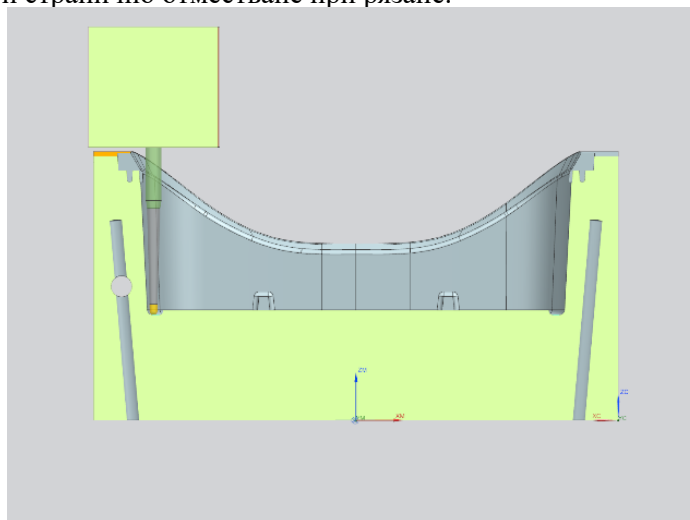
За да се изпълнят задачите навреме, работните процеси за неподвижната (матрица) и подвижната (поансон) плочи от формообразуващия инструмент се разделят. Съответно производството на подвижните плочи се произвеждат от Арексим инженеринг ЕАД, а паралелно неподвижните плочи - от екипа на лаборатория „3D креативност и бързо прототипиране”.

CAM софтуерът, използван за генериране на NC програми на неподвижната формообразуваща плоча е Siemens NX 12.0. Siemens NX е усъвършенствана CAD / CAM / CAE система на Siemens. Машината, използвана за процеса на фрезование, е DMG Mori Lasertec 65 3D, разположена в лаборатория „3D креативност и бързо прототипиране“ в София Тех Парк. (фиг.4.3)



фиг. 4.3 Репрезентация на инструменталния преход при грубите операции

Трудностите се появяват в участъците с малък радиус на закръгление и голяма дълбочина. Пример за такава зона на фрезование е каналът на дъното на формообразуващата плоча. Минималният радиус на закръгление в областта е 2 мм, а дълбочината по оста Z от най-високата повърхност на матрицата е 61 мм.(фиг.4.4) Тези условия налагат изисквания за фреза със сферична фреза с диаметър 3 мм и дължина извън държача на инструмента по-голяма от 61 мм, за да се гарантира, че няма да има колизии между държача на инструмента и детайла по време на фрезването. Постигането на добро качество на повърхността, производителността на рязане и запазването на целостта на инструмента е много чувствително към правилното подаване, скорости, дълбочини и странично отместване при рязане.



фиг. 4.4 Симулации при обработване на канала на неподвижната формообразуваща плоча

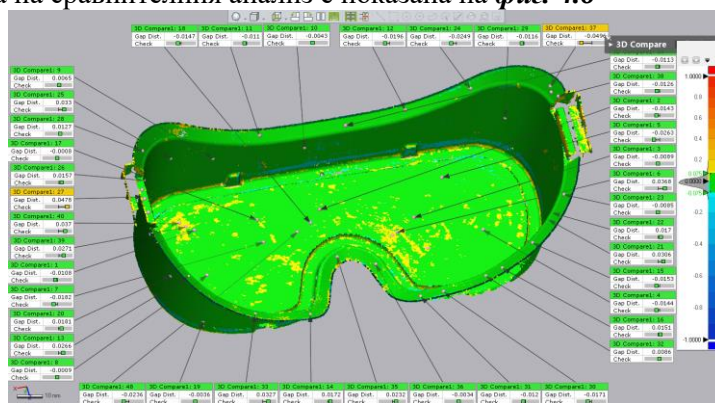
На фиг. 4.5 е показана произведената неподвижна формообразуваща плоча за предпазни очила.



фиг. 4.5 Неподвижна формообразуваща плоча за предпазни очила

Валидация на постигната точност

Проверката се осъществява чрез сравняване на STL файла, получен в процеса на сканиране, и параметричния 3D модел на неподвижната плоча. Получените резултати показват пълно съответствие на геометрията и постигната висока точност. Резултатите от измерванията са представени на следващите страници, включително цветна скала с граници [+1 мм, -1мм], видими от лявата страна на фиг. 4.6. Интервалът на зеления цвят е зададен на граници [+ 0,075 мм; -0,075 мм]. Екранна снимка на сравнителния анализ е показана на *фиг. 4.6*



фиг. 4.6 Анализ на постигната точност

След проверка на постигнатата прецизност, делителната повърхнина на матрицата се подлага на фина настройка в Аресим Инженеринг ЕАД, за да се осигури плътно затваряне на полуформите. След като приключат процедурите за монтаж на инструмента за формоване на машината за шприцоване, производственият процес може да започне.

4.4. Изводи към глава 4

Изследван и валидиран е ускорен производствен цикъл за създаване на предварителни или основен инструмент в изключително кратки срокове.

Постигнато е модифициране на конвенционалния цикъл на производство на ФИ, чрез иновативен производствен цикъл без междинна термообработка на заготовката преди финалните обработки, позволяващо отпадане на електроерозийните обработки, които изискват установяване в друга машина, а самият процес е времеосъществителен.

С отстраняването на електроерозийната обработка от производствения цикъл се избягва производството на електроди.

Цели се колкото е възможно повече от повърхнините на геометрията да бъдат произведени изцяло чрез CNC обработка с инструменти с малък диаметър, удължени фрези и фрези със специфична геометрия.

Предложена е стратегия за производство на ФИ с първоначални временни вложки, произведени от инструментална стомана с предварителна термообработка до 30-35 HRC като се използва единствено механична обработка на сложните формообразуващи повърхнини на една установка без пребазиране на заготовката.

Установено е експериментално, че високоскоростната обработка осигурява над два пъти по-ефективна производителност, която се постига първо със скоростта на рязане и второ със скоростта на подаване.

Тази производствена стратегия позволява бързо създаване на ФИ с намалени разходи, като в същото време се постига висока точност, тъй като по време и след производствения процес се извършва валидиране чрез 3D сканиране на точностните показатели.

Експериментално е доказано, че използването на инструментална стомана с предварителна термообработка до 30-35 HRC е остъчна за гарантиране на производство на 200 000 - 300 000 броя детайли.

Препоръчано е по времето, необходимо за производството на първоначалните серии от 200 000 – 300 000, да се използва за създаване на електроди за механична обработка и съответно изготвяне на нови формообразуващи вложки с голям ресурс за матрицата и поасона (кухината и сърцевината), които да заменят временните вложки на вече произведената основа на ФИ.

Разработената стратегия е внедрена в реалната практика чрез прилагане на методологията за конкретен случай за създаването на много необходимите за началото на пандемията от COVID-19 медицински защитни очила и са постигнати уникални къси срокове от старта до серийното производство на изделията в рамките на сумарно 12 дни.

5. РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ВАЛИДАЦИЯ НА ФОРМООБРАЗУВАЩИ ИНСТРУМЕНТИ И СЛОЖНИ СТРУКТУРИ

5.1. Цел на изследването

Това изследване има за цел да бъде разработена методология за валидация на функционалността и идентификация на износване на характерни повърхнини от формообразуващи инструменти, възможности за възстановяване на работоспособността и модифициране. При разработването на методологията е включено използването на най-модерни технологии и системи и обработване на данните със специализирани софтуери, като съвкупността от използването им дава по-акуратна преценка за състоянието на инструмента при диагностика и гарантира най-висока прецизност при ремонтни дейности, което рефлектира и върху качеството на произведените след това детайли.

5.2. Методология за валидация на функционалността и идентификация за износване на характерни повърхнини от формообразуващи инструменти.

Цикълът от измервания и валидация на функционалността и идентификация за износване на характерни повърхнини от формообразуващи инструменти, стартира, когато биват констатирани отклонения в регулярно провеждани измервания на извадки от производството на серии от даден детайл. Такива отклонения, които имат устойчив характер, индикират за възможно компрометиране на формообразуващия инструмент, вследствие от износване, удар или др. Предвид стойността на отклоненията, съпоставени с толерансите на размерите, се преценява дали да се пристъпи към инспекция на инструмента.

За да се установи, дали проблемът е породен от промяна в геометрията на формообразуващия инструмент, той бива подложен на процедури на валидация, започващи с разглобяването му и основно почистване на компонентите – матрица, поансон и вложки от замърсявания от всякакъв характер. Това е необходимо, както за да се извърши първоначалната визуална инспекция, така и за последващото провеждане на измервания и постигането на адекватни резултати.

При първоначалната визуална инспекция се правят първоначални изводи за състоянието на инструмента и отделните му компоненти, като именно при тази инспекция се избират кои от компонентите, да бъдат подложени на последващи прецизни измервания и анализи.

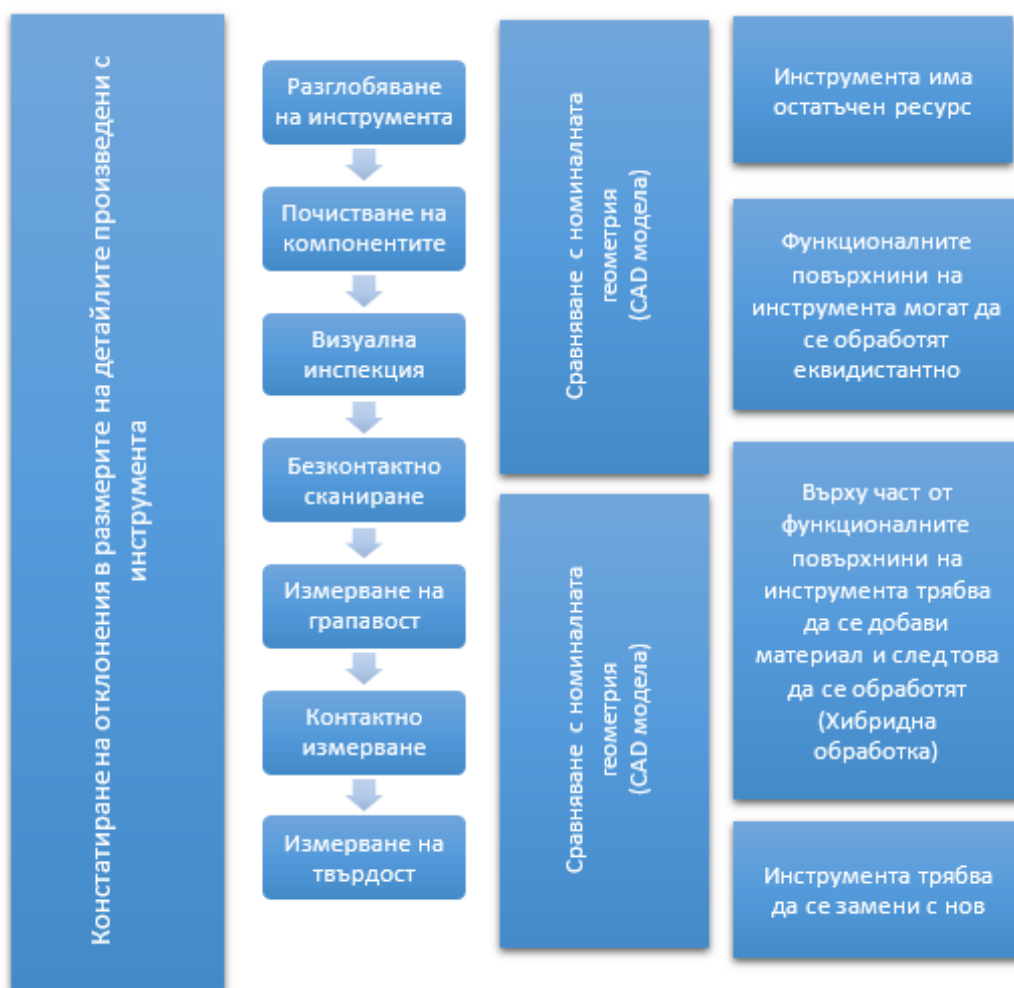
Следващият етап от методологията е свързан с подлагането на формообразуващия детайл на безконтактно 3D сканиране, като получената информация в суров вид, представлява облак от много на брой точки, снети от повърхнините на инструмента. Тази информация се обработва и почиства от шумове и се използва за изграждането на повърхнинен дигитален модел във файлов формат STL. Този файл се използва за анализ на отклоненията, спрямо номиналите, на база на съпоставка с 3D модела на формообразуващия инструмент. Тези резултати ни служат, като ориентир относно повърхнините, за които да бъде съсредоточено измерване, проведено,

посредством система за контактно измерване, с цел валидация на получените резултати за отклонения, както и определянето им с по-голяма точност.

Преди пристъпване към измерване на инструмента тактилно, идентифицираните повърхнини с най-големи отклонения се подлагат на изследване на грапавостта, с цел получаване на профилограма на повърхнините. Резултатите от това изследване се използват при избора на вида и размера на тактилния накрайник за контактно измерване.

За да се завърши цикъла по валидиране на геометрията на инструмента, се извършва контактно измерване, приоритетно на идентифицираните повърхнини с определяна степен на износване, посредством тактилни накрайници. Най-подходящо оборудване за провеждане на подобно измерване са координатно-измервателните машини. Формообразувачия инструмент се поставя и осигурява стабилно в работната зона на системата и се измерва по предварително генерирано NC управляваща програма по 3D модела. Измерването представлява снемане на голям набор от точки на малко разстояние, за максимално подробно описване на сложните повърхнини и постигане на най-точни резултати.

След извършването на всички измервания на геометрията на формообразувачия инструмент, той бива подложен на измерване на твърдостта на повърхнини от формообразувачия инструмент. Резултатите от измерванията дават индикация, ако термичната обработка се е повлияла при работата на формообразувачия инструмент.



фиг. 5.1 *Методология за валидация на функционалността и идентификация за износване на характерни повърхнини от формообразувачи инструменти*

След обстоен анализ на получената информация и обработка на данните с помощта на различни софтуерни пакети, се поставя цялостна оценка за състоянието на формообразувачия инструмент в оценъчни аспекти до следните основни стъпки:

Формообразувачия инструмент има остатъчен ресурс по отношение на геометрична точност и причината за отклонения в размерите на получените детайли следва да бъдат коригирани от параметрите на процеса

При констатиране на износени повърхнини от формообразувачия инструмент спрямо 3D модела над допустимото и те оказват непосредствено влияние върху размерите и качеството на повърхнините на получените детайли се налага корекция.

Износванията са в степен, такава че функционалните повърхнини на инструмента могат да се обработят еквиливантно, което ще доведе до възстановяване на пълната му функционалност без излизане от допусковите полета.

При констатиране на износени повърхнини с големи разлики в геометрията на инструмента, спрямо 3D модела. Инструментът е компрометиран неравномерно и има дълбоки следи от износване или удар и/или отчупени елементи.

В такъв случай формообразувачия инструмент може да бъде подложен на ремонтни дейности, посредством хибридна технология, използваща система за добавяне на материал за реконструиране на компрометираните повърхнини и последваща прецизна обработка, чрез отнемане на материал, за пресъздаване в най-голяма степен на оригиналната геометрия на инструмента.

Състоянието на формообразувачия инструмент е влошено до степен на неремонтопригодност или нерентабилност на ремонтния процес. Инструментът трябва да бъде заменен с нов.

Методологията е обобщена в блок диаграма на фиг. 5.1

5.3. Експериментални измервания на формообразувач инструмент, съгласно разработената методика

За изпълнението на целите на изследването е предоставен формообразувач инструмент от Арксим Инженеринг ЕАД (фиг.5.2). По инструмента има видими следи от износване, причинени от процесите на работа. Освен физическите образци, също така са предоставени и 3D моделите на инструмента, които са необходими, за генериране на управляващите програми за измервания, извършвани на координатно-измервателната машина, а също така и при сравняване на сканираните образци с 3D моделите.

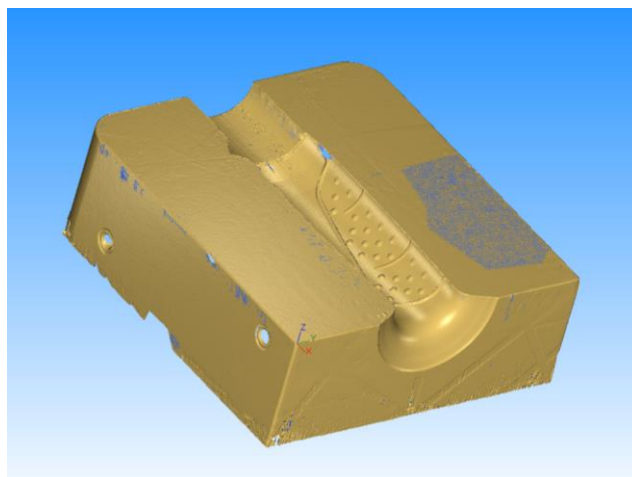


фиг. 5.2 Формообразувач инструмент, предоставен за целите на проекта

Дигитализиране на образците, чрез 3D сканиране, използвайки системата Romer Absolute Arm 7320 SI.

Експерименталните измервания започват с дигитализиране на образците, посредством системата Romer Absolute Arm 7320 SI. Целта е да се осъществи анализ на отклоненията от формата, да се идентифицира кои са областите с най-големи разминавания от номиналния тримерен модел, както и да се анализират преходите и сложни повърхнини, които трудно могат да бъдат измерени контактно.

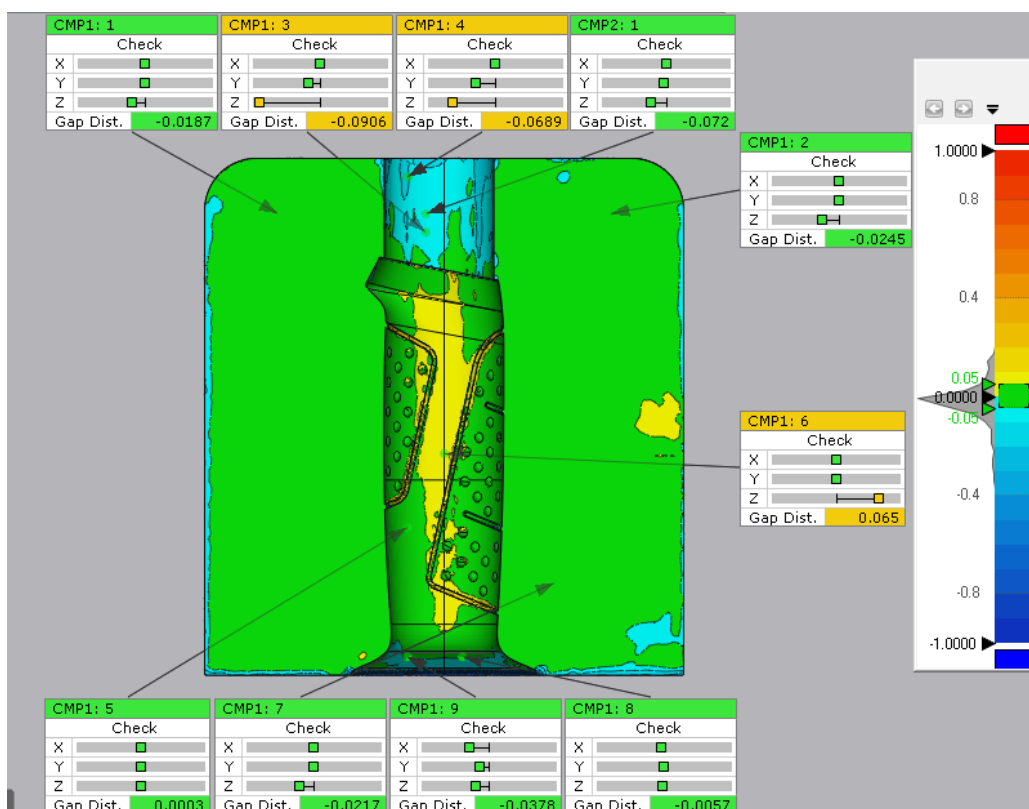
Полученият при сканирането облак от точки бива почистен и информацията от него се използва за изграждане на мрежа от триъгълници, избирайки съответните параметри. (фиг.5.3)



фиг. 5.3 Мрежа от триъгълници, изградена по почистения облак от точки, получен при 3D сканиране на матрица

Сравнителен анализ на дигитализирания модел, спрямо номиналния 3D модел

Файлт се запазва и експортира в STL формат и се прехвърля в специализиран софтуерен пакет за реверсивно инженерство, където се извършва сравнителния анализ на базата на номиналните 3D модели на формообразувания инструмент. Резултатите са показани на фиг. 5.4



фиг. 5.4 Сравнителен анализ на образец „матрица“, спрямо 3D модела

Тези резултати служат за ориентир, относно зоните, в които трябва да бъде съсредоточено измерването, проведено на координатно измервателната машина, където отклоненията в размерите, поради износване се определя с още по-голяма точност.

Измерване на грапавостта на износените повърхнините, посредством устройството RugoSurf 20

Преди да се извършат измервания, посредством системата Optiv Performance 664V, матрицата и поансона се подлагат на измерване на грапавостта на износените повърхнини. (фиг.5.5) С помощта на получената профилограма, се избира и подходящ накрайник за провеждане на тактилно измерване.



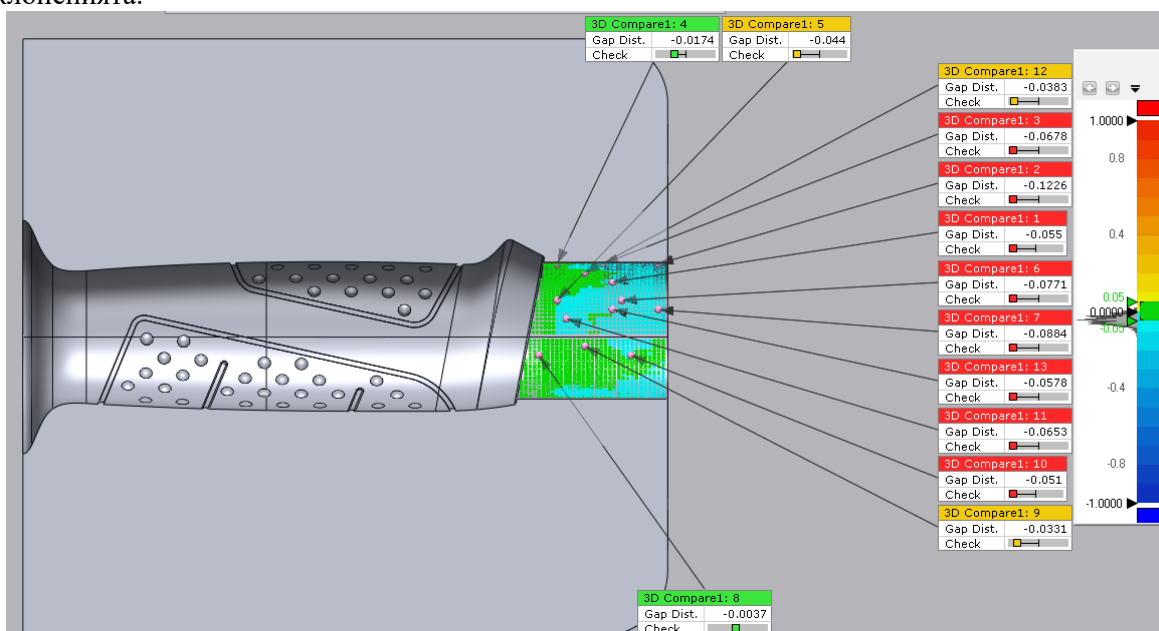
фиг. 5.5 Провеждане на измерване на грапавост на повърхнини при образец „поансон“

Спрямо резултатите от проведени измервания на грапавостта на повърхнини на образците, е преценено, че използването на сферичен тактилен накрайник с диаметър 1мм ще послужи за правилното провеждане на измерване, чрез системата Optiv Performance 664V.

Контактно измерване на износените повърхнини, посредством тактилни сонди и системата Optiv Performance 664V

Получените файлове от измерванията съдържат информация за координатите на всяка една от измерените точки, спрямо взетата в началото координатна система. Тези координатни системи съвпадат с координатните системи на 3D модели, което улеснява при последващо обработване на информацията. За тези цели е използван специализирания софтуерен пакет за реверсивно инженерство Geomagic Suite и функциите на инструмента „3D compare“, чрез който се сравнява 3D модела, спрямо резултатите от измерванията.

Резултатите от сравнителния анализ са видими на фиг. 5.6. В дясната част на фигурите се намира цветна скала с процентното разпределение на точките в граници [+1мм; -1мм]. Зелената зона индикира точките, които се намират в граници [+0.05мм; -0.05мм]. Разликата между 3D модела и измерването в отделни точки е изнесено в полета с абсолютни стойности на отклоненията.



фиг. 5.6 Сравнителен анализ на износена повърхнина при образец „матрица“, спрямо 3D модела

С тези анализи се изчерпва цикъла от измерване и валидация на геометричните характеристики на изследвания формообразуващ инструмент, следващ разработената методология. За да се осигури възможността различни повърхнини да бъдат измервани са необходими различни измервателни накрайници.

Измерване на твърдостта на образците, посредством устройството DynaRock II

За направата на окончателна оценка и заключение за състоянието и функционалността на инструмента, е проведено и измерване на твърдостта на образците, съгласно методологията, за да се определи дали е налична промяна в характеристиките на материала от високотемпературните работни процеси.

Измерената твърдост отговаря на изискванията – 484 по Бринел, което показва, че характеристиките на материала на инструмента не са повлияни и променени от процесите на работа.

Заклучения за състоянието на формообразувачия инструмент

След като са проведени всички измервания, предвидени в разработената методология за валидация на функционалността и идентификация за износване на характерни повърхнини от формообразувачи инструменти, получената и обработена информация, служи за оценка и доказване на функционалността на инструменти. На база на анализирания поотделно резултати от всяко от проведените изследвания, могат да се направят следните обобщения:

На всеки от предоставените образци – поансон и матрица – има видими следи от износване, причинено от триене между елементите.

Проведеното безконтактно 3D сканиране ни ориентира към повърхнините, с отклонения от номиналните, както и първоначални стойности на отклоненията.

Проведеното измерване на грапавостта показва по-груби повърхнини, отчетени при поансона, което означава, че износването при него е по-интензивно. Резултатите от проведените измервания, потвърди избора на инструмент за провеждане на прецизно 3D контактно сканиране на идентифицираните повърхнини.

Контактното 3D сканиране показва разпределение на отклоненията в двата образца, вписващи се в границите [0.05mm; -0.125mm]. Основната част от разпределението се намира в отрицателните стойности на скалата.

Измерената твърдост на материала, отговаря на изискванията и не е повлияна негативно от експлоатацията на формообразувачия инструмент.

На основата на тези обобщения, може да се направи заключение за състоянието на образците от формообразувач инструмент – констатираните отклонения в геометрията на образците „поансон“ и „матрица“ са в граници, които за момента не нарушават функционалността на инструмента и позволяват продължаването на експлоатацията му при същите условия и параметри на производствения процес.

Констатираните отклонения в регулярно провежданите измервания на детайлите, не са породени от идентифицираните износвания на инструмента и причината за тях следва да бъде търсена в параметрите на производствения процес.

Вследствие на бъдещи работни процеси, да се очаква нарастване на степента на износване на формообразувачия инструмент до такава, налагаща ремонтни дейности, посредством хибридна технология за добавяне и отнемане на материал. Препоръчва се регулярен мониторинг.

Към текущото състояние, инструментът има остатъчен ресурс и ремонтни дейности не са необходими.

5.4. Изводи към глава 5

Разработена е методология, използваща най-модерни технологии за диагностика и ремонт на формообразувачи инструменти, което гарантира бързата и акуратна преценка за състоянието на инструмента, като с помощта на различни софтуери, се поставя цялостна оценка за работоспособността му.

Съгласно получените резултати са оформени 4 основни варианта за работата на инструмента. При нужда от ремонтни дейности е предвидено използване на хибридна система за отнемане и добавяне на материал в една и съща работна зона, което гарантира най-висока прецизност при възстановяването на геометрията на инструмента.

В резултат на разработването на методологията от лаб. „Бързо прототипиране и 3D креативност“ се формулира нова услуга, която предстои да бъде предложена на компаниите в България и чужбина, занимаващи се с производство на пластмасови детайли и формообразувачи инструменти, включваща дейности по валидация на функционалността на формообразувачи инструменти (метрика, отклонения от формата, взаимното разположение), и идентификация за степента на износване.

На база на валидацията при идентифициране на отклонения, по-големи от допустимите, с наличната техника и технологии в лабораторията предстои разработване на следваща нова услуга за възстановяване на работоспособността, както и за модифициране на формообразуващи инструменти при необходимост от корекции.

6. ОБЩИ ИЗВОДИ

В работата са изследвани технологиите за изработване на сложни структури и импланти и се осъществява оптимизация на конкурентни технологии за изработването им.

Анализирани са предимствата на виртуалното прототипиране с използване на технологията на компютърното моделиране при проектирането и производството им в сравнение с традиционно използвания метод “проба- грешка”.

Разработен е специален метод за прилагане на хибриден подход при изготвяне на специфични импланти. Използват се технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология (материализация на негативно изображение) и формоване на необходимия имплант в този еднократен инструмент до втвърдяването му.

Предложеният метод за бързо физическо и виртуално прототипиране при изготвяне на специфични импланти позволява в кратки срокове да се проектират и изработват животоспасяващи импланти, които дават възможност за все повече успешни трансплантации.

Разгледани са и методите на симулация на процесите на CNC обработване при производство на изделия със сложни форми и персонални импланти.

Успоредно с изучаването на сложните процеси по проектиране и моделиране на формообразуващи елементи и импланти, фокусът е върху това как да се използват ефективно най-модерните CAD/CAM/CAE технологии.

Създадена методология за бърза материализация на сложни структури и форми в ултра къси срокове по технология с отнемане на материал и с помощта на хибридни технологии.

Изработени и валидирани са образци на персонални импланти, чрез използването на различни стратегии при високоскоростни при 3-осна и 5-осна обработка и е проведено измерване, за оценяване на постигнатите точности на най-важните части от сложната геометрия на импланта.

Получените резултати са използвани за избор на най-правилна стратегия, с цел оптимизация на време, постигната точност и разходи.

Изследван и валидиран е ускорен производствен цикъл за създаване на предварителен или основен инструмент в изключително кратки срокове.

Постигнато е модифициране на конвенционалния цикъл на производство на ФИ, чрез иновативен производствен цикъл без междинна термообработка на заготовката пред финалните обработки, позволяващо отпадане на електроерозийните обработки, които изискват установяване в друга машина, а самият процес е времеемък.

Анализирани са икономическите аспекти на изработване на сложни ормообразуващи инструменти са също обект на анализ. Разгледани са и накратко основните елементи на ФИ от типа шприцформи и начините за тяхното бързо и ефективно компютърно проектиране (CAD) и компютърно подпомагано производство (CAM).

Разработената стратегия е внедрена в реалната практика чрез прилагане на методологията за конкретен случай за създаване на много необходимите за началото на пандемията от КОВИД 19 медицински защитни очила и са постигнати уникални къси срокове от старта до серийното производство на изделията в рамките на сумарно 12 дни.

На основата на направен сравнителен анализ на получените по различни технологии с добавяне или отнемане на материал тестови образци на сложни форми от формообразуващи инструменти и персонални импланти са очертани областите на ефективно прилагане на технологиите при различни конкретни изисквания.

Разработена и апробирана е методология за валидация на формообразуващи инструменти и сложни геометрични структури.

7. ПРИНОСИ

7.1. Научни приноси

- Предложен е подход за избор на оптимална технология за изработване на персонализирани имплантни структури и костни репликации на базата на изследвани възможностите на трите най-популярни технологии- технология чрез отнемане на материал, чрез адитивни технологии и технология за отливане в силиконови матрици и оценяване на

предимствата и недостатъците им, според сложността на геометрията, необходимият брой изделия и целта на приложение.

7.2. Научно-приложни приноси

- Разработен е специален метод за прилагане на хибриден подход при изготвяне на специфични импланти. Използват се технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология (материализация на негативно изображение) и формоване на необходимия имплант в този еднократен инструмент до втвърдяването му.
- Предложен и валидиран е подход за производство на ФИ, като се използва единствено механична обработка на сложните формообразуващи повърхнини на една установка без пребазиране на заготовката, произведени от инструментална стомана с предварителна термообработка до средна твърдост от порядъка на 30 ± 3 HRC.
- Направено е сравнение на различни подходи при избор на заготовки и стратегии при изработване на импланти чрез отнемане на материал на 5-осен обработващ център, като за критерий за оптимизация са взети в предвид машинно време, цена на заготовката и брой установки.
- Доказано е, че резултатите от оптимизация на стратегията на обработване води до редуциране на времето за изработка и на разходите при производство над два пъти и постигането на оптимални резултати по отношение на точността, която е ключово важна при производството на импланти.
- Разработена е методология, използваща най-модерни технологии за диагностика и ремонт на формообразуващи инструменти, което гарантира бързата и акуратна преценка за състоянието на инструмента, като с помощта на различни софтуери, се поставя цялостна оценка за работоспособността му. Съгласно получените резултати са оформени 4 основни варианта за работата на инструмента.

7.3. Приложни приноси

Сравнени са два характерни подхода при изготвяне на имплант с отнемане на материал, при които се използват различни заготовки с различно тегло и цена, време за обработка, брой установки, брой необходими инструменти, като тези елементи са оценени количествено. Резултатът е постигането на оптимално машинно време и повърхнини с високо качество и точност.

Постигнато е модифициране на конвенционалния цикъл на производство на ФИ, чрез иновативен производствен цикъл без междинна термообработка на заготовката преди финалните обработки, позволяващо отпадане на електроерозийните обработки, които изискват установяване в друга машина, а самият процес е времеемък.

Посредством 5-осното фрезование на имплант и правилно подобрени инструменти и режими е доказано постигане на по-производителен процес и по-дълъг живот на инструмента над два пъти.

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 (остатъка им до голяма степен се демпфира), което води до получаване на повърхнини с много голямо качество и висока точност на изпълнение.

Установено е експериментално, че високоскоростната обработка осигурява над два пъти по-ефективна производителност, която се постига първо със скоростта на рязане и второ със скоростта на подаване.

Предложената иновативна производствена стратегия позволява бързо създаване на ФИ с намалени разходи, като в същото време се постига висока точност, тъй като по време и след производствения процес се извършва валидиране чрез 3D сканиране на точностните показатели.

Експериментално е доказано, че използването на инструментална стомана с предварителна термообработка до 30-35 HRC е остъчна за гарантиране на производство на 200 000 - 300 000 броя детайли.

Разработената стратегия е внедрена в реалната практика чрез прилагане на методологията за конкретен случай за създаване на много необходимите за началото на пандемията от КОВИД 19 медицински защитни очила и са постигнати уникални къси срокове от старта до серийното производство на изделията в рамките на сумарно 12 дни.

При нужда от ремонтни дейности за ФИ е предложено и валидирано използване на хибридна система за отнемане и добавяне на материал в една и съща работна зона, което гарантира най-висока прецизност при възстановяването на геометрията на инструмента.

В резултат на разработването на методология, използваща най-модерни технологии за диагностика и ремонт на формообразуващи инструменти от лаб. „Бързо прототипиране и 3D креативност“ се подготви нова услуга, включваща дейности по валидация на функционалността на формообразуващи инструменти (метрика, отклонения от формата, взаимното разположение) и идентификация за степента на износване, която предстои да бъде предложена на компаниите в България и чужбина, занимаващи се с производство на пластмасови детайли и формообразуващи инструменти.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД SCOPUS

Todorov, G., Y. Sofronov, T. Gavrilov, I. Ivanov, A.Todorov,
Strategy for Shortened Manufacturing cycle of mold tool in extremely short terms
(2020) 30th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2020

Публикации в списания и конференции

Гаврилов, Т., Я. Софронов. Валидация На Функционалността И Идентификация За Износване На Характерни Повърхнини От Формообразуващи Инструменти, (2020) 29-та международна научно-техническа конференция Автоматизация на Дискретното Производство“ АДП – 2020”

Гаврилов, Т. , Бърза материализация на малка серия репликации на костна структура от дигитализиран модел, създаден по компютърна томография
Сп. „Машиностроене и Електротехника“ бр. 05/2020, стр 118-121

Тодоров, Г., Т. Гаврилов, Я. Софронов, А. Тодоров.
Оптимизация на себестойността за изработване на персонализирана ендопротеза на CNC обработващ център, Сп. „Машиностроене и Електротехника“ бр. 10-11/2018, стр 14-22

Todorov, G., Y. Sofronov, B. Romanov, T. Gavrilov. New Product Development and Production in Extremely Short Terms – Safety Goggles

International conference on Creative Business for Smart and Sustainable Growth 9 - 11 June 2020

Полезни модели, свързани с изследването

Тодоров, Г., Б. Романов Я. Софронов, Т. Гаврилов, К. Трифонов, А. Кирянов.
Универсални защитни очила с гъвкава рамка за околоочната зона на лицето, Полезен модел 3793 UI15.07.2020

SUMMARY

REASERCH AND OPTIMIZATION OF THE MANUFACTURING PROCESSES, RAPID PRODUCTION AND VALIDATION OF COMPLEX GEOMETRY STRUCTURES AND IMPLANTS

MEng. Todor Gavrilov

Presented work is in the field of optimization of manufacturing processes of complex geometry parts, such as personalized medicine implants and cavity and core plates of injection molds.

A method for applying a hybrid approach in personalized implants manufacturing has been developed. Additive technologies are used for rapid production of disposable mold tool, which is used for shaping the necessary implant.

A comparative study of different approaches in the strategy and blank selection is provided for manufacturing a femoral stem implant on a 5-axis milling machine. In the optimization process, different factors are taken into account - machine time, workpiece price and number of workpiece installations.

A modification of the conventional production cycle of a mold tool has been achieved. The suggested innovative production cycle includes the elimination of the intermediate heat treatment of the workpiece and EDM treatments that require installation in another machine, and the process itself is time consuming.

The developed strategy is implemented in real practice by applying the methodology for a specific case to create much needed for the pandemic by COVID 19 medical goggles in extremely short terms from the task setting to the serial production within a total of 12 days.

A methodology has been developed using the most modern technologies for mold tools diagnostics and repair, which guarantees a rapid and accurate assessment of the condition of the tool and by means of various machine and software equipment, a comprehensive assessment of its condition. According to the obtained results, 4 options for mold tool repairing are suggested.

As a result of the developed methodology for mold tools repairing from the lab. a new service has been created by laboratory "3D creativity and Rapid prototyping" at R&D&I consortium (Sofia TechPark), including activities for validation of the functionality of mold tools (metrics, deviations from the shape, mutual arrangement) and identification of the degree of wear, to be offered to companies in Bulgaria and abroad, engaged in the production of plastic parts and mold tools.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва специални благодарности на:

На екипите и ръководствата на лабораториите „CAD/CAM/CAE в индустрията“, МТФ при ТУ-София и „3D Креативност и бързо прототипиране“, СНИРД към София ТехПарк, чието оборудване бе използвано при редица изследвания, описани в дисертационния труд;

На индустриалния партньор „Арексим Инженеринг“ ЕАД, по чиито проекти бяха направени част от внедряванията;

На „Национален център за мехатроника и чисти технологии“, създаден по договор No BG05M2OP001-1.001-0008, за възможността да се ползва наличното специализирано оборудване;

На научните ми ръководител проф.дн. Георги Тодоров и гл.ас. Явор Софронов за безценните съвети и съдействие по време на оформянето на дисертационния труд

На моите близки и приятели, които ми оказваха подкрепа за завършването на труда.