



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Машински факултет – Скопје



м-р Бетим Шабани, дипл. инж.

**Реверзибилно инженерство и адитивно производство во
проектирањето и производството на сложени делови**

- докторска дисертација -

Скопје, декември 2020



Ss. Cyril and Methodius University in Skopje
Faculty of Mechanical Engineering – Skopje



Betim Shabani, M.Sc.

**Reverse engineering and additive manufacturing in design and
production of complex parts**

- Doctoral dissertation -

Skopje, December 2020

Ментор:

Проф. д-р Владимир Дуковски
Машински факултет – Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Членови на комисија:

Проф. д-р Атанас Кочов, претседател
Машински факултет – Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р Глигорче Вртаноски, член
Машински факултет – Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Вонр. проф. д-р Филип Здравески, член
Машински факултет – Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р Анка Трајковска Петкоска, надворешен член
Технолошко-технички факултет – Велес
Универзитет „Св. Климент Охридски“ во Битола

Научна област:

Технички науки - Машинство

Датум на одбрана: 4.12.2020

ПРЕДГОВОР

Оваа докторска дисертација е подготвена како дел од обврските кои произлегуваат од докторската школа на Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“, Машински факултет - Скопје, Република Северна Македонија. Докторската дисертација се состои од шест главни поглавја и ги презентира нумеричките и експерименталните истражувања направени во периодот од 2016 до 2020 година, под менторство на проф. д-р Владимир Дуковски. За време на овој период, поминав неколку седмици и месеци во различни индустриски компании и институции, каде ги вршев експерименталните истражувања.

Би сакал да се заблагодарам на мојот ментор и на сите тимови во компаниите и институциите кои ми помогнаа во моето истражување.

Бетим Шабани

декември 2020

АПСТРАКТ

Генерално, во областа на развојот на производите, се појавија бројни технолошки промени. Ова главно се должи на високиот степен на автоматизација и брзината на имплементација. Истото може да се каже и за реверзибилното инженерство (РИ) и адитивното производство (АП). Во последните години, овие технологии се перцепираат како потенцијално прифатливи во различни индустриски сектори, но и како дел од актуелните истражувачки и академски активности. РИ и АП може да се користат во различни области, вклучително во денталната медицина и индустријата. Оваа докторска дисертација ја разгледува примената на РИ и АП во проектирањето и производството на два сложени дела: дентален мост и репроектиран индустриски дел. Двата избрани дела имаат сложени облици кои се соодветни за примена на РИ и АП. Денталниот мост е мерен со користење на 3D техника на скенирање и е предмет на примена на реверзибилното инженерство, додека оригиналниот дизајн на индустрискиот дел е оптимизиран со користење на метода за оптимирање на топологијата. Двата дела се произведени со користење на ласер со фузија во слој од прашок (Л-ФСП) (L-PBF - Laser Powder Bed Fusion), при што за денталниот пример е користен материјалот CoCrMo, а за индустрискиот дел материјалот AlSi10Mg. Споредбата на производството на овие делови со класичните технологии ќе ги даде придобивките и слабостите од практичната примена на овие технологии. Со цел да се направи посеопфатна анализа, во оваа теза се истражувани четири главни атрибути: време, трошок, квалитет и флексибилност. Оптимирањето на дизајнот, оптимизираните процесни параметри, распределбата на температурата и вкупната деформација на деловите, се добиени со користење на нумерички анализи. Добиените резултати се користени во експерименталното истражување. Предмет на експерименталното истражување се: процесот на производство, металографијата, споредбата на точноста и економските аспекти. Резултатите од овие истражувања се користени за споредбена анализа со класичните технологии на времето, трошокот, квалитетот, и флексибилноста. Денталниот и индустрискиот дел, проектирани и произведени со РИ и АП, се произведуваат поефтино и побрзо доколку работа на изработка се користи рационално, но не и при производство на едно парче. Деловите произведени со РИ и АП се поточни и целиот процес има поголема флексибилност во споредба со класичните технологии.

Клучни зборови: реверзибилно инженерство, адитивно производство, класични технологии, време, трошок, квалитет, флексибилност.

ABSTRACT

Many technological changes have occurred in relation to product development in general. This is due to the high degree of automation and speed of implementation. The same can be said for reverse engineering (RE) and additive manufacturing (AM). In recent years these technologies are being seen as potentially acceptable in different industrial sectors as well as part in actual research and academic activities. RE and AM can be used in different fields, including dentistry and industry. This thesis deals with the theoretical and scientific fundamentals of RE and AM and practical investigation of their use in the design and production of two complex parts: dental bridge and redesigned industrial part. Two selected parts have complex shapes which are appropriate for RE and AM. The dental bridge was measured using 3D scanning technique and reverse engineered, while the original design of the industrial part was optimized using the topology optimization method. Both parts were produced using the laser powder bed fusion (L-PBF) process, where for the dental case, CoCrMo material was used and for the industrial case, AlSi10Mg material was used. The comparison with the traditional technologies of these parts gives the benefits and weaknesses of their implementation in practical aspects. In this thesis, to present a more comprehensive analysis, four main attributes, time, cost, quality, and flexibility were investigated. The design optimization, optimized process parameters, temperature distribution, and total deformation of parts are investigated using numerical analyses. Obtained results were input for experimental work. The production process, metallography, accuracy comparison, and economic aspects are theoretically and experimentally investigated. The obtained results for time, cost, quality, and flexibility were used for comparative analysis with traditional technologies. The dental and industrial parts designed and produced with RE and AM are faster and cheaper produced only when the build job is rationally utilized, but not for single production. Parts produced with RE and AM are more accurate and the whole process is more flexible in comparison with traditional technologies.

Keywords: reverse engineering, additive manufacturing, traditional technologies, time, cost, quality, flexibility.

БЛАГОДАРНОСТ

За мене ќе беше невозможно да ја напишам оваа докторска теза, без помошта и поддршката на многу луѓе, на кои сум обврзан да им ја изразам мојата длабока благодарност.

Му изразувам искрена благодарност на проф. д-р Владимир Дуковски, кој беше ментор на мојата работа од самиот почеток, поднесувањето на образложението на темата во 2016 година. Уште од развојот на почетната идеја, па низ изминатите овие години, професор Дуковски покажа бескомпромисна поддршка за овој проект и за мене лично. Неговите совети во текот на целиот овој период, ми беа од исклучителна помош. Уште од почетокот на работењето под негово менторство, низ речиси секојдневна комуникација, тој наоѓаше решенија и насоки за проблемите и тешкотиите со кои се соочував. Професор Дуковски го смени мојот начин на размислување за науката и технологијата. Засекогаш. За мене беше чест и привилегија што професор Дуковски беше мој ментор.

Исто така, се заблагодарувам и до членовите на комисијата: проф. д-р Атанас Кочов, проф. д-р Глигорче Вртаноски, Вонр. проф. д-р Филип Здравески и проф. д-р Анка Трајковска Петкоска за нивниот вреден придонес. Реализацијата на овој труд ќе беше невозможна без поддршката на колегите во компаниите и релевантните институции кои ја овозможија мојата експериментална работа, за што сум посебно благодарен.

Без сомнение, на ова патешествие, посебна благодарност заслужува моето семејство, првенствено моите родители Авни и Фатиме Шабани, за нивната огромна поддршка и условите кои ми ги обезбедија. Посебна благодарност и за мојата сестра Блерта и помладиот брат Фитим, кои ми го направија целиот овој процес полесен и поинтересен.

На крајот, сакам да се заблагодарам на сите пријатели и колеги кои ми помогнаа во текот на ова истражување и биле дел од целиот овој процес.

СОДРЖИНА

ПРЕДГОВОР.....	iv
АПСТРАКТ	v
ABSTRACT.....	vi
БЛАГОДАРНОСТ	vii
ЛИСТА НА СЛИКИ.....	xi
ЛИСТА НА ТАБЕЛИ	xviii
ЛИСТА НА СИМБОЛИ	xxi
ЛИСТА НА КРАТЕНКИ	xxv
1. ВОВЕД	1
1.1 Основи на технологиите на реверзибилно инженерство и адитивно производство	1
1.2 Мотивација.....	9
1.3 Цели на истражувањето.....	10
1.4 Структура на тезата.....	11
2. НАПРЕДНИ ТЕХНОЛОГИИ КАЈ РЕВЕРЗИБИЛНО ИНЖЕНЕРСТВО И АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО	14
2.1 Преглед на литература.....	14
2.1.1 Реверзибилно инженерство.....	14
2.1.2 Адитивно производство.....	17
2.2 Теоретски основи	21
2.2.1 Мерење на облици и структура на РИ.....	21
2.2.2 Оптимирање на топологијата базирано на поставување на слоевите.....	29
2.2.3 Проектирање за АП.....	32
2.2.4 Материјали за АП.....	36
2.2.5 Л-ФСП процес	42
3. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И ОПТИМИРАЊЕ НА СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ ..	48
3.1 Реверзибилно инженерство и проектирање на делови	48
3.1.1 Реверзибилно инженерство на дентален дел.....	49

3.1.2	Проектирање и анализа со методата на конечни елементи (FEA) на индустрискиот дел	51
3.2	Оптимирање на дизајнот за АП	55
3.2.1	Оптимирање на топологијата и валидација со FEA (пример 1)	56
3.2.2	Оптимирање на топологијата и валидација со FEA (пример 2)	60
3.2.3	Избор на модел на индустриски дизајн за производство со АП и CNC.....	64
3.3	Моделирање и симулација на делови произведени со АП.....	68
3.3.1	Симулација на слојот за CoCrMo	69
3.3.2	Симулација на порозноста за CoCrMo	73
3.3.3	Симулација на слојот за AlSi10Mg.....	75
3.3.4	Симулација на порозноста за AlSi10Mg	78
3.3.5	Подготовка на индустрискиот дел за АП	79
3.3.6	Термичка и статичка анализа на индустрискиот дел.....	83
4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖУВАЊЕ НА ИЗБРАНИ СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ.....	94
4.1	Експериментална постапка и методологија	94
4.1.1	Процес на производство на дентален дел	94
4.1.2	Дентален дел (споредба на технологијата и обликот).....	97
4.1.3	Металографија на денталниот дел.....	105
4.1.4	Процес на производство на индустрискиот дел.....	110
4.1.5	Индустриски дел (споредба на точноста)	116
4.1.6	Металографија на индустриски дел	120
5.	ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ И СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА НА СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ.....	127
5.1	Економски модел.....	127
5.1.1	Анализа на трошокот на денталниот дел.....	133
5.1.2	Анализа на трошокот на индустрискиот дел.....	141

5.2	Споредбена анализа на АП и класичното производство.....	151
5.2.1	АП и КЛ.....	151
5.2.2	АП и CNC обработка по три оски	155
6.	ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ПОНАТАМОШНА РАБОТА.....	164
6.1	Заклучоци	164
6.2	Препораки за понатамошна работа.....	167
	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	169

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1.1: Атрибути за РИ и АП.	2
Слика 1.2: Формативно производство (лево); субтрактивно производство (средина); адитивно производство (десно) (преземено од Redwood, Schffer, and Garret (2017)).	3
Слика 1.3: Шема на работниот процес на РИ, со главните примени (адаптирано од Geng and Bidanda (2017); Buonamici, Carfagni, Furferi, Governi, et al. (2020)).	3
Слика 1.4: Патеки на податоците за АП (адаптирано од Gebhardt and Hötter (2016)).	5
Слика 1.5: Стратегии на проектирање за АП вклучувајќи ги примерите од истражувањео.	6
Слика 1.6: (горе) Класификација на АПЛ; (долу) процес на ласер топење (преземено од Paul, Jinoor, and Bindra (2018)).	7
Слика 1.7: Процесни проблеми кај АПЛ (адаптирано од Paul, Jinoor, and Bindra (2018)).	8
Слика 2.1: Триангулациски методи (адаптирано од Vukašinić and Duhovnik (2019)).	22
Слика 2.2: (лево) Технологија на структурирана светлина; (десно) технологија на ласерска триангулација (преземено од (LMI-Technologies)).	22
Слика 2.3: Различни облици на светлината (преземено од Raja and Fernandes (2007)).	23
Слика 2.4: Ласерска триангулација со една CCD (преземено од Raja and Fernandes (2007)).	24
Слика 2.5: 3D скенери со техника на структурирана светлина: (лево) 3Shape D900; (средина) Zirkonzahn S600; (десно) Go!SCAN 3D.	25
Слика 2.6: Индустриски дел: (а) мрежа со шумови; (б) мрежа исчистена од шумови..	26
Слика 2.7: Индустриски дел: (а) сегментирање со висока осетливост без претставување на топологијата на објектот; б) кохерентен резултат поврзан со геометријата на објектот.	27
Слика 2.8: Реконструкција на индустрискиот дел со користење на карактеристиките на површината: (а) почетна мрежа; (б) реконструкција со површината на В-кривата.	28
Слика 2.9: Реконструкција на индустрискиот дел со користење на волуменски (полни) форми: (а) извлечена форма – спој; (б) извлечена форма – пресек.	29
Слика 2.10: LS функција (адаптирано од Verbart et al. (2012)).	31

Слика 2.11: ОТ на индустрискиот дел со користење на методот на LS.....	32
Слика 2.12: Потпирање и формирање на згура (преземено од Goutianos (2017))......	33
Слика 2.13: Разни можности за поставување на делот во однос на насоката на изработка (адаптирано од Goutianos (2017)).	33
Слика 2.14: Конструкции на подржувачи: (а) полна; (б) решеткаста (адаптирано од Goutianos (2017)).	34
Слика 2.15: Само-подржувачка конструкција: (а) подржувачи се потребни; (б) подржувачи не се потребни (адаптирано од Goutianos (2017)).	35
Слика 2.16: Специфични облици кај печатењето со метал (преземено од Redwood, Schffer, and Garret (2017)).	35
Слика 2.17: EOSINT M 270.....	37
Слика 2.18: (а) Микроприказ на атомизираниот прашок; (б) попречен пресек на прашокот после нагризувањето (преземено од Mergulhão (2017)).	38
Слика 2.19: EMC слики на примероци од CoCrMo: (а) слика со ПРЕ; (б) слика со СЕ (преземено од Mergulhão (2017)).	38
Слика 2.20: Напон - напрегања кај испитувањето на истегање на примероци на CoCrMo за изработка во три ориентации (преземено од Bassoli and Denti (2018)).	39
Слика 2.21: Renishaw AM 400.	40
Слика 2.22: (а) Морфологија на прашокот од AlSi10Mg; (б) микроструктура на попречниот пресек на прашокот од AlSi10Mg (преземено од Aboulkhair et al. (2015)). 40	
Слика 2.23: Слики од EMC на примерок од AlSi10Mg во пресек YZ: (а) слика со ПРЕ; (б) слика со СЕ (преземено од Wu et al. (2016)).	41
Слика 2.24: Испитување на истегање за делови од AlSi10Mg добиени со Л-ФСП (преземено од Kempen et al. (2012)).	42
Слика 2.25: Процес на Л-ФСП (преземено од Rigo and Engel (2013)).	43
Слика 2.26: Шема на преносот на топлина (преземено од Zhou et al. (2019)).	45
Слика 2.27: Термичко однесување на слојот од прашок под дејство на зрачењето од ласерот (преземено од Li and Gu (2014)).	46
Слика 3.1: Дентален модел со носачи.	49
Слика 3.2: (лево) Скенирано (дентален модел со носачи); (десно) дентален мост.....	50

Слика 3.3: Графички приказ на STL формат на дентален мост.	50
Слика 3.4: Оригиналниот дизајн на држачот на ракавец.	51
Слика 3.5: Технички цртеж за оригиналниот дизајн.	52
Слика 3.6: Статичка анализа на ОД.	54
Слика 3.7: Модална анализа за ОД - 4ти облик на осцилирање.	55
Слика 3.8: Проектен простор за ОД: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.	56
Слика 3.9: STL модел од ОТ процесот: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.	57
Слика 3.10: Конечни CAD модели: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.	58
Слика 3.11: 48% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.	58
Слика 3.12: 58% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.	59
Слика 3.13: Проектен простор за ОД: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.	60
Слика 3.14: STL модел од ОТ процес: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.	61
Слика 3.15: Конечни CAD модели: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.	61
Слика 3.16: 40% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.	62
Слика 3.17: 50% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.	63
Слика 3.18: Модел со НМ од 40%: (а) анализа на аглите; (б) означена област.	66
Слика 3.19: Нацрт анализа за моделот со НМ од 50%.	67
Слика 3.20: Параметри на областа на топење (адаптирано од ANSYS (2020)).	70
Слика 3.21: Областа на топење долж слојот за стандардно процесните параметри.	72
Слика 3.22: Областа на топење долж слојот за процесните параметри на A8.	77
Слика 3.23: Делот поставен на основната плоча.	80
Слика 3.24: Области: (а) време на изработка; (б) подржувачи; (в) тенденција за дисторзија.	80
Слика 3.25: Оптимална ориентација: (а) 0 степени; (б) 45 степени; (в) 90 степени.	81
Слика 3.26: Ориентација на делот со подржувачи: (а) 0 степени; (б) 45 степени; (в) 90 степени.	82

Слика 3.27: Дијаграм за зависноста густина - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).....	84
Слика 3.28: Дијаграм за зависноста Јунгов модул - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).	84
Слика 3.29: Дијаграм за зависноста билинеарно изотропско зајакнување - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).	85
Слика 3.30: (а) Дел (слоевит метод со тетраедри), подржувачите и основната плоча (картезиан); (б) дел со обликување на мрежа.	86
Слика 3.31: Распределба на температурата на истражуваниот модел.	88
Слика 3.32: Распределба на температурата: (а) во првиот слој; (б) на крајот на подржувачите; (в) на процесот на изработка.	89
Слика 3.33: Вкупна деформација на делот произведен со АП, на крајот од процесот на производство: (а) изометриски приказ; (б) приказ на попречен пресек.....	89
Слика 3.34: Вкупна деформација: (а) по завршување на процесот на ладење; (б) по отстранување на основната плоча.	90
Слика 3.35: Вкупна деформација на делот по завршувањето на процесот на АП.....	90
Слика 3.36: Вкупна деформација со текот на времето.	91
Слика 3.37: Криви на максималните главни вредности за напрегањата и напоните со текот на времето.....	91
Слика 3.38: Напрегање - пластично истегнување во текот на времето.	92
Слика 4.1: Работен процес за изработка на денталниот мост со АП.....	95
Слика 4.2: Работен процес за изработка на дентален мост со КЛ.	96
Слика 4.3: Дентален мост (РМ).....	97
Слика 4.4: Работен процес на експерименталното истражување за споредба на технологијата и обликот на денталниот мост.	97
Слика 4.5: Л-ФСП (сива); ФП (црвена); КЛ (сина).....	98
Слика 4.6: (а) ДМЛС случај; (б) СЛА случај; (с). КЛ случај.	99
Слика 4.7: Споредба на точноста помеѓу трите различни технологии (пример за дентален мост).....	100
Слика 4.8: Дентален мост (внатрешни облици).....	100

Слика 4.9: (лево) Интервал меѓу печатење на два слоја (RMS во однос на облик); (десно) Tukey тест за облик.....	101
Слика 4.10: (лево) Интервал меѓу печатење на два слоја (RMS во однос на технологија); (десно) Tukey тест за технологија.....	102
Слика 4.11: (лево) Интеракција (технологијата и облик); (десно) интеракција (облик и технологијата).....	103
Слика 4.12: Дентален мост поставен на вилица со носачи: ДМЛС; СЛА; КЛ.....	104
Слика 4.13: Оптички слики на синтеруван CoCrMo во насоката на изработка Z: (а) зголемување (50x) и (б) зголемување (100x).....	106
Слика 4.14: Слики (зголемување 40x) на порозноста на работ од синтеруван дентален мост од CoCrMo.....	106
Слика 4.15: Микроструктура на синтеруван CoCrMo во насоката на изработка Z: (а) ниско зголемување (200x); (б) високо зголемување (500x).....	107
Слика 4.16: Темна област (пример на АП): (а) зголемување (80x); (б) зголемување (160x).....	107
Слика 4.17: Оптички фотографии на одлеанок од CoCrMo: (а) зголемување (50x); (б) зголемување (100x); (в) зголемување (200x).....	108
Слика 4.18: Темно поле (пример на КЛ): (а) зголемување (80x); (б) зголемување (160x).....	109
Слика 4.19: Л-ФСП процес (изработка на подржувачи).....	111
Слика 4.20: Процес на фузија кај Л-ФСП.....	111
Слика 4.21: Отстранување на прашокот од платформата за изработка.....	112
Слика 4.22: Делот заедно со подржувачите поставен на платформата за изработка.....	112
Слика 4.23: Рачно отстранување на подржувачите со отсекување од платформата за изработка.....	112
Слика 4.24: Пескарење со корунд процес.....	113
Слика 4.25: Индустриски дел произведен со АП (без завршна операција).....	113
Слика 4.26: Завршна операција за централниот отвор: (лево) САД склоп; (десно) физички дел произведен со АП поставен на машината.....	114
Слика 4.27: Готов индустриски дел произведен со АП.....	114

Слика 4.28: CNC обработка: (лево) алати; (десно) операција на глодање.....	115
Слика 4.29: Готов индустриски дел произведен со CNC обработка.	115
Слика 4.30: Процес на 3D скенирање: (а) антирефлектирачки спреј; (б) ознаки за локација на делот; (в) ознаки за локација во просторот; (г) податоци во облакот од точки после 3D скенирањето.	116
Слика 4.31: 3D споредба на димензионалната точност на делот произведен со АП со референтниот модел.	117
Слика 4.32: 3D споредба на димензионалната точност на делот произведен со CNC со референтниот модел.	117
Слика 4.33: 2D пресеци за споредба со специфичната референтна рамнина.....	119
Слика 4.34: АП-CNC 2D споредба за специфични пресеци.....	120
Слика 4.35: Конкретен попречен пресек на индустрискиот дел за металографската анализа.	121
Слика 4.36: Оптички слики на AlSi10Mg (по изработката) во насоката на изработка Z: (а) и (б) сферични пори на водород (означени со црвено); (в) хомогена структура во еден слој (под црвените стрелки).....	122
Слика 4.37: Некои слики (зголемување 100x) со порозност и структура со ефект на клучалка кај AlSi10Mg (по изработката) во различни точки од попречниот пресек. ...	123
Слика 4.38: Микроструктурата на AlSi10Mg по изработката во Z насока на изработка: (а) мало зголемување (200x); (б) големо зголемување (500x).	124
Слика 4.39: Оптички слики на алуминиумска легура 6082: (а) и (б) зголемување (100x); (в) и (г) зголемување (160x).	125
Слика 5.1: Дентален мост со подржувачи: (горе) симулација; (долу) АП дел.....	134
Слика 5.2: Распределба на трошоците за денталниот дел.	140
Слика 5.3: Вкупни трошоци при производство на различни количини (анализа на пример за дентален дел).	140
Слика 5.4: (лево) Платформа за изработка за примерот со индустриски дел (SLM 500); (десно) АП дел.....	142
Слика 5.5: Распределба на трошоците за индустрискиот дел.....	148
Слика 5.6: Зависност цена на машина – амортизација на машината.	148

Слика 5.7: Разлика на трошоците за различни машини и број на произведени парчиња (анализа на пример за индустриски дел).	149
Слика 5.8: Промени на избраните фактори кај АП со намалувања на трошоците за 50% и 75%.	150
Слика 5.9: Дентален мост (КЛ).	154
Слика 5.10: Споредба на АП и КЛ (време и трошок).	155
Слика 5.11: CNC обработка на деловите: (а) ОД; (б) 50% НМ.	157
Слика 5.12: Споредба помеѓу АП и CNC обработка.	161
Слика 5.13: Споредба помеѓу ОД (CNC обработка) и АП (50% и 75% намалено).	163

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 3.1: Механички карактеристики на AlSi10Mg и алуминиумска легура 6082. ...	52
Табела 3.2: Модална анализа за ОД.	54
Табела 3.3: Модална анализа за 48% НМ.	59
Табела 3.4: Модална анализа за 58% НМ.	60
Табела 3.5: Модална анализа за 40% НМ.	62
Табела 3.6: Модална анализа за 50% НМ.	63
Табела 3.7: Збирни резултати за различните модели на индустрискиот дел.	64
Табела 3.8: Карактеристики на материјалот CoCrMo*.	69
Табела 3.9: Резултати од симулацијата на слојот за CoCrMo.	71
Табела 3.10: Резултати од симулацијата на порозноста за CoCrMo.	74
Табела 3.11: Карактеристики на материјалот AlSi10Mg*.	75
Табела 3.12: Резултати од симулацијата на слојот за AlSi10Mg.	76
Табела 3.13: Резултати од симулацијата на порозноста за AlSi10Mg.	79
Табела 3.14: Степени на ориентација и соодветни вредности на параметрите.	81
Табела 3.15: Количината на користен материјал кај различна ориентација.	83
Табела 3.16: Процесни параметри на АП.	87
Табела 4.1: Хемискиот состав на материјалите.	95
Табела 4.2: Процесни параметри за примерот на дентален мост.	95
Табела 4.3: Споредба на обликот при производство со различни технологии.	101
Табела 4.4: Споредба на технологиите.	102
Табела 4.5: ANOVA резултати за меѓузависноста на технологијата и обликот.	103
Табела 4.6: Хемиски состав на материјалите.	110
Табела 4.7: Процесни параметри за индустрискиот пример.	110

Табела 4.8: Податоци за 3D споредба со референтниот модел за индустрискиот дел.	118
Табела 4.9: Состав на Келеровиот реагенс.	121
Табела 5.1: Општи податоци за машината SLM 125.	134
Табела 5.2: Коефициенти и други податоци за денталниот дел.	135
Табела 5.3: Оперативни времиња за дентален дел.	135
Табела 5.4: Амортизација на машината и индиректни трошоци за денталниот дел.	136
Табела 5.5: Амортизација на уредот и индиректни трошоци за денталниот дел.	136
Табела 5.6: Трошоци за РИ на денталниот дел.	137
Табела 5.7: Трошоци за подесување на дентален дел.	137
Табела 5.8: Трошок за материјал за дентален дел.	138
Табела 5.9: Трошоци за производство за дентален дел.	138
Табела 5.10: Трошоци за пост производство за дентален дел.	139
Табела 5.11: Вкупни трошоци за денталниот дел.	139
Табела 5.12: Општи податоци за машината SLM 500.	142
Табела 5.13: Коефициенти и други податоци за индустрискиот дел.	143
Табела 5.14: Оперативни времиња за индустрискиот дел.	143
Табела 5.15: Амортизација на машината и индиректни трошоци за индустрискиот дел.	144
Табела 5.16: Трошоци за проектирање на индустрискиот дел.	144
Табела 5.17: Трошоци за подесување на индустриски дел.	145
Табела 5.18: Трошок за материјал за индустриски дел.	145
Табела 5.19: Трошоци за производство за индустриски дел.	146
Табела 5.20: Трошоци за пост производство за индустриски дел.	146
Табела 5.21: Трошок за завршната обработка за индустрискиот дел.	146
Табела 5.22: Вкупни трошоци за индустрискиот дел.	147

Табела 5.23: Трошоци за КЛ за дентален дел.	153
Табела 5.24: Трошоци за CNC обработка за ОД.....	158
Табела 5.25: Трошоци за CNC обработка за 50% НМ.....	160

ЛИСТА НА СИМБОЛИ

Симбол	Значење	Симбол	Значење
g_0	функција на целта	$C_{(ВКУПЕН)}$	вкупен трошок
x	проектна променлива	$T_{(изработка)}$	време на изработка
y	променлива на состојбата	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	индиректен трошок
F	функција на целта	$C_{(ДИРЕКТЕН)}$	директен трошок
u	поле на состојбата	$H_{(годишно)}$	работни часови годишно
ρ	вектор на проектната променлива	C	цена на машина/уред
Ω	домен на проектирањето	I	каматна стапка
$g(\rho)$	функција на интерполација на густината	D	амортизација на машината
$f_0(u)$	функција на полето	$C_{пр}$	цена на проектантот по час
G_0	ограничувања на волуменот	C_{CAD}	трошоци по корисник за годишна лиценца за CAD
N	променлива на јазолното проектирање	C_{SAM}	трошоци по корисник за годишна лиценца за SAM
$\Phi(x)$	множеството на функции на ниво	n	години на експлоатација на машината
t	псевдо време	$T_{пр}$	време потребно за проектирање
V	функција на брзината	$T_{(работа)}$	време потребно за подготовка на работата
E_v	волуметриска густина на енергијата	$V_{(O+A+S)}$	волумен на делот
a	агол	$V_{(работа)}$	вкупен волумен на работата
P	моќност на ласер	T_{CAD}	број на часови на користење на CAD на годишно ниво
v	брзина на скенирање	T_{SAM}	број на часови на користење на SAM на годишно ниво
t	дебелина на слој	$C_{(опер)}$	цена по час на операторот за мерење (скенирање)

h	растојание на премини	T_M	време потребно за мерење (скенирање)
w	фокус на снопот	$C_{(пол)}$	трошок за полнење на садот
E_I	линерана влезна густина на енергијата	$C_{(подесување\ гас)}$	трошок за подготовка и проверка на комората (протокот на гас)
E_S	површинска густина на енергијата	$C_{(подготовка\ на\ површината)}$	трошок за подготовка на површината на платформата за изработка
E_L	линеарна густина на енергијата	$T_{(пол)}$	потребното време за полнење на садот
Q_a	енергијата на ласерот апсорбирана од страна на слојот од прашок	$C_{(обработка)}$	трошок на час за машината
ρ	густина на материјал	k_1	коэффициент
c	специфичен топлински капацитет	k_2	коэффициент
T	температура	k_3	коэффициент
t	време на интеракција	k_4	коэффициент
k_p	ефективна топлинска спроводливост	$T_{(производство)}$	време на производство
Q	генерирана топлина по единица волумен	$C_{(брусна\ плоча)}$	трошок за брусна плоча
T_0	почетна температура	$M_{(полнење)}$	количина на материјал за полнење на садот
S	површина поврзана со топлинскиот флукс	$M_{(дел)}$	количина на материјал за изработка на делот
n	нормален вектор	$M_{(подржувачи)}$	количина на материјал за изработка на подржувачите
Q_c	конвекција на топлина	$C_{(гас)}$	цена на гасот по m^3
Q_r	топлинско зрачење	$V_{(гас\ по)}$	вкупен волумен на гас за полнење на комората за изработка
h	коэффициент на конвекција на топлина	$G_{(чистење)}$	просечната потрошувачка на гас во процесот на чистење
σ	Штефан - Болцманова константа	$T_{(опер\ гас)}$	времето потребно на операторот за започнување и контрола на процедурата

ε	емисивност	$C_{(\text{гас ил})}$	трошокот на час за гасот кој се користи за време на изработката и ладењето
T_s	температура на површината на моделот	$V_{(\text{гас и})}$	просечна потрошувачка на гас за време на изработката
T_m	амбиентална температура	$C_{(\text{АП})}$	директниот часовен трошок на системот за АП
r	растојание до центарот на ласерската точка во реално време	$C_{(\text{прашок})}$	цена на прашокот
R	ефективен радиус на изворот на топлина	$C_{(M)}$	трошок за материјал
A	апсорбливост на материјалот во однос на енергијата од ласерот	w	процент на загуба на материјал
H	енталпија	$T_{(\text{изл})}$	време на изложеност
C	специфична топлина	$T_{(\text{загревање п})}$	потребно време за загревање на платформата за изработка
$[C]$	матрица за топлински капацитет	$T_{(\text{пом})}$	дополнителното време пред започнувањето на процесот
$[K]$	матрица за структурна крутост	$T_{(\text{полнење гас})}$	време потребно за полнење на комората со гас
$Q(t)$	топлински флуks	$T_{(\text{изл})}$	време кое е директно поврзано со изработката на делот во АП машината
$\{u\}$	пресметана деформација	$T_{(\text{ладење})}$	времето потребно за ладење на делот
$\alpha\Delta T$	термин за термичка експанзија	$C_{(\text{оп})}$	трошок за отстранување на подржувачите
$x_{1,i}$	точка на податоци за референтниот модел	$C_{(\text{пт})}$	трошок за пост третман
$x_{2,i}$	точка на податоци за тест моделот	$C_{(\text{пол})}$	трошок за полирање
n	број на мерења за сите избрани точки	$C_{(\text{EDM})}$	трошоци на час за EDM машина
θ	агол	$C_{(\text{пила})}$	трошоци на час за пила
Z	координатен систем	$v_{(\text{EDM})}$	продуктивност на EDM

X	координатен систем	$v_{(пила)}$	подуктивност на процесот на пилање
P_i	осветлена точка	$L_{(платформа)}$	должина на платформата за изработка
L	фиксна основна должина	$T_{(отст)}$	време потребно за рачно отстранување на подржувачите
F	фокална должина на камера	$T_{(неп)}$	непроизводно време
$N_{(пар)}$	број на парчиња во серија	$S_{(дел)}$	површина на платформата за изработка зафатена од делот
$C_{(РИ)}$	трошок за РИ	$V_{(дел под)}$	волумен (дел и подржувачи)
$C_{(ПР)}$	трошок за проектирање	$T_{(загревање n)}$	загревање на платформата
$C_{(ПО)}$	трошок за подесување	$T_{(пом)}$	нивелирање на платформата
$C_{(ПРЗ)}$	трошок за производство	$C_{(помошни)}$	помошни трошоци
$C_{(ПП)}$	трошок за пост производство	$C_{(загревање)}$	трошок за процес на загревање
$C_{(З)}$	трошок за завршна обработка	$C_{(енергија)}$	трошок за енергија
$C_{(И)}$	индиректен трошок по дел	$T_{(циклус)}$	време на циклусот
$M_{(маса)}$	маса на парчето	$C_{(П)}$	трошок за леење по дел
$C_{(БИА)}$	трошок за брза изработка на алат	$C_{(А)}$	трошок за алат по дел
D	домен	$L_{(серија)}$	број на парчиња во серијата

ЛИСТА НА КРАТЕНКИ

Кратенка	Значење
АП	адитивно производство
АПЛ	адитивно производство со ласер
ANOVA	анализа на варијансата
ASCII	Американски стандарден код за размена на информации
ASTM	Американска агенција за тестирање и материјали
СЕ	секундарен електрон
CMM	машина за мерење на координати
СЛТ	селективно ласер топење
CAD	компјутерски помогнато проектирање
CAM	компјутерски помогнато производство
CNC	нумерички управувана
ДР	држач на ракавец
EMC	електронски микроскоп за скенирање
EDM	обработка со електро ерозија
FEA	метода со конечни елементи
FDDS	стратегија на проектирањето ориентирана кон функционалноста
ФСП	фузија во слој од прашок
ФП	фотополимеризација
ГД	генеративен дизајн
НМ	намалување на маса
ISO	Меѓународна организација за стандардизација
КЛ	класично леење
ЛГЕ	линеарна густина на енергијата
Л-ФСП	ласер со фузија во слој од прашок
LS	level set метода

MDDS	стратегија на проектирањето ориентирана кон производството
ОД	оригинален дизајн
ОМ	оптички микроскоп
ОТ	оптимизацијата на топологијата
ОТ-БПС	оптимизацијата на топологијата базирана на поставувањето на слоевите
ПАП	проектирање за адитивно производство
ПРЕ	повратно расејување на електрон
РИ	реверзибилно инженерство
РМ	референтен модел
RMS	метод на најмали квадратни корени
STL	стандарден јазик на адитивно производство
ТИП	топло изостатичко пресување
УКИМ	Универзитет „Св. Кирил и Методиј“

1. ВОВЕД

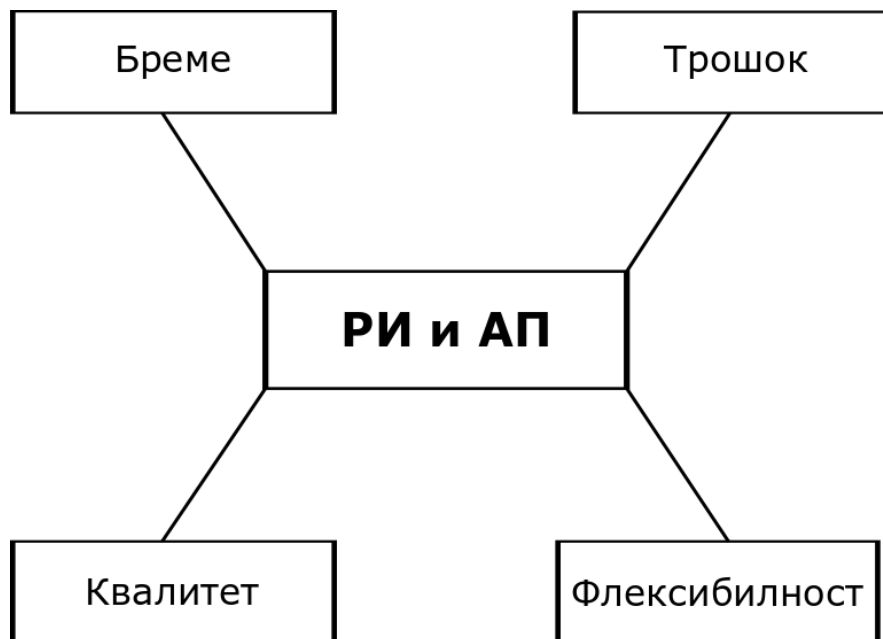
1.1 Основи на технологиите на реверзибилно инженерство и адитивно производство

Многу технолошки промени се појавиле во врска со развојот на производите. Ова е резултат на високиот степен на автоматизација и брзината на имплементација. Истото може да се и каже за реверзибилното инженерство (РИ) и адитивното производство (АП). Во последните години, овие технологии се гледаат како потенцијално прифатливи во различни индустриски сектори, но во случајот на АП и како дел од актуелните пристапи во циркуларната економија (Despeisse and Ford 2015; Despeisse et al. 2017; Sauerwein M. 2017), заедно со РИ (Shabani and Dukovski 2018a), како и во однос на поврзаноста на АП со Индустриската 4.0 (Galantucci et al. 2019; Butt 2020).

РИ е процес кој ги извлекува информациите за производот од самиот производ (Harston and Mattson 2010), и ги обработува и користи за понатамошна употреба. Овие информации може да бидат: геометриски, за материјалите, хемиски, електрични и сл. Најчесто, РИ се перцепира како процес на добивање на CAD модел од 3D точки со оптички скенер (Raja and Fernandes 2007). Wang (2010) го нарекува технологија на реинвенција, како процес кој води кон реконструкција и репродукција.

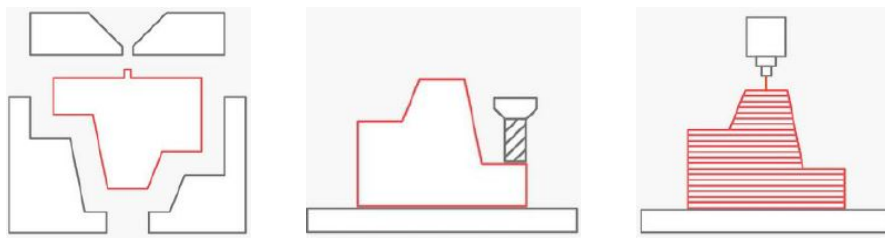
АП за прв пат е развиено од страна на Charles W. Hull (Hull 1986), и досега постојат многу дефиниции за него. Тоа е процес на спојување на материјали, обично слој по слој, за да се изработат делови од податоците од 3D модел, што е спротивно на методологиите на субтрактивното производство и формативното производство (ISO/ASTM 52900). Согласно категориите на процесот, АП е поделено на: прскање со врзивно средство низ млазница (binder jetting), директно градење со засебен дотур на материјал и енергија (directed energy deposition), екструзија на материјал (material extrusion), исфрлање на врзивен материјал (material jetting), фузија во слој од прашок (powder bed fusion), ламинирање на плочи (sheet lamination), и фотополимеризација (vat photopolymerization). Бидејќи ова истражување е категоризирано како АП со метал, конкретно со фузија во слој од прашок (ФСП) (PBF - Powder Bed Fusion), токму оваа техника ќе биде подетално елаборирана. ФСП е процес на АП во кој топлинската енергија селективно ги спојува областите од слојот со прашок (ISO/ASTM 52900).

Во повеќето случаи, РИ се третира како влез на АП (Lee and Woo 2000; Kumbhar, Pandey, and Rao 2007; Geng and Bidanda 2017; Shabani, Vrtanoski, and Dukovski 2018), како што е прикажано од страна на различни автори (Junk and Matt 2014; Paulic et al. 2014; Krznar, Pilipović, and Šercer 2016; Saurabh et al. 2016). Што се однесува до проектирањето и производството, важно е да се истражуваат одредени атрибути кои ги определуваат нивните перформанси. За РИ и АП, ќе бидат анализирани атрибутите како: време, трошок, квалитет и флексибилност. Ова ќе биде имплементирано врз два примери за анализа, дентален и индустриски. Сликата 1.1, ги покажува атрибутите за РИ и АП.



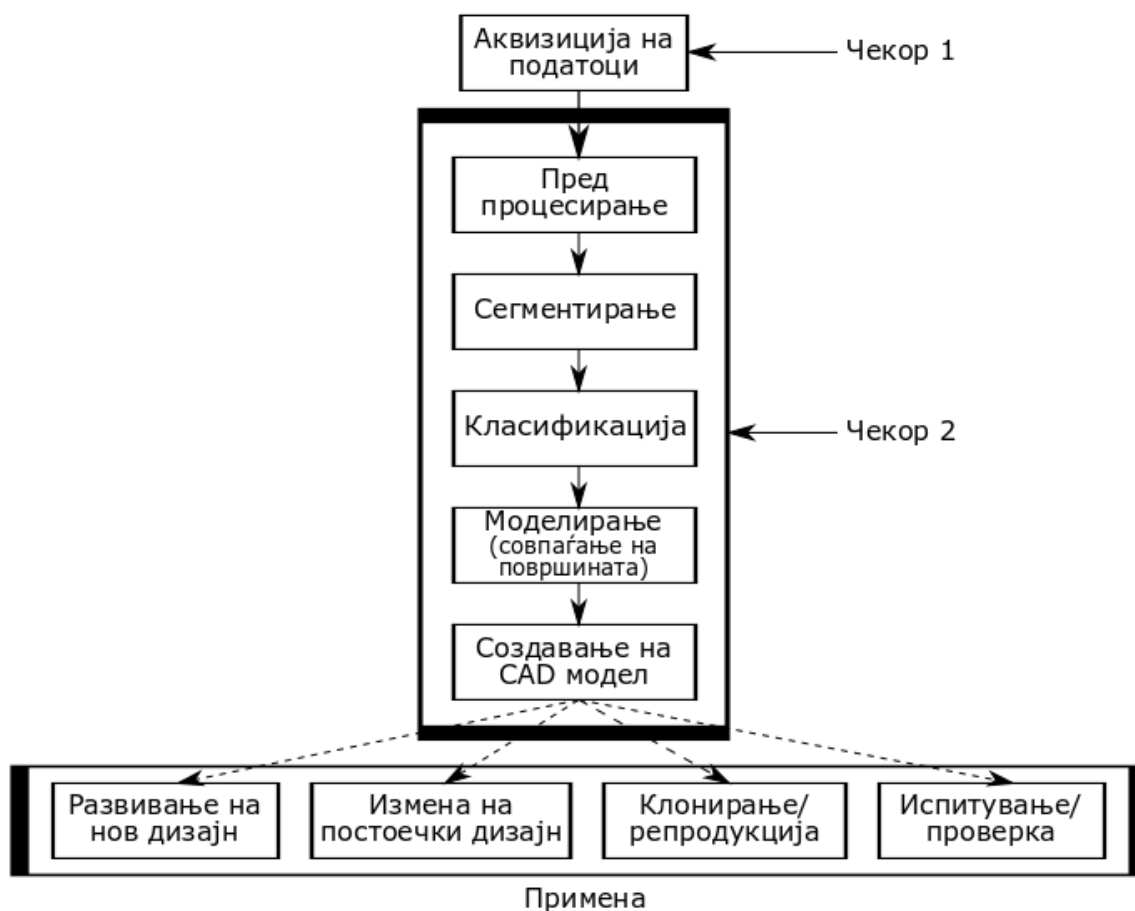
Слика 1.1: Атрибути за РИ и АП.

Според Сликата 1.1, прифатена за анализите на примерите во ова истражување, атрибутот време се однесува на: времето на мерење, времето на проектирање, времето за РИ, и времето за производство. Атрибутот трошок, се однесува на директниот и индиректниот трошок за производство, како и на трошоците за проектирање и РИ. Атрибутот квалитет, се однесува на точноста на обликот и анализите на микроструктурата, додека атрибутот флексибилност се однесува на можноста за прилагодување на дизајнот произведен со РИ и АП, и можностите за реконструкција со користење на АП. Сите четири атрибути се третирани за РИ и АП, и се споредени со класичните технологии како формативното и субтрактивното производство. Некои од аспектите на споредба на овие технологии, дадени се во Pereira, Kennedy, and Potgieter (2019). Визуелната презентација на овие три технологии е дадена на Слика 1.2.



Слика 1.2: Формативно производство (лево); субтрактивно производство (средина); адитивно производство (десно) (преземено од Redwood, Schffer, and Garret (2017)).

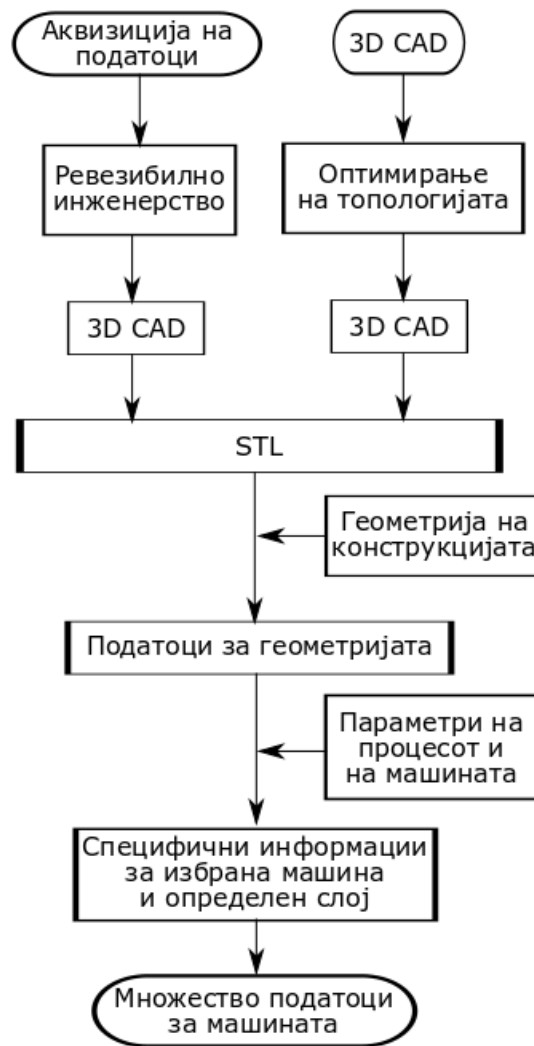
Важноста од поседувањето на приказот на постоечките производи во дигитална форма, довело до развој на многу техники за мерење и CAD реконструкција на производите, а РИ како процес го овозможува ваквиот пристап (Shabani and Pandilov 2017). Шемата на работниот процес на РИ е прикажана на Слика 1.3. Чекорот 1 вклучува трансформација од физички објект во дигитален објект, со користење на оптичко мерење, што е применето во ова истражување. Чекорот 2 (објаснет од Buonamici et al. (2017)), е интеракција, за конкретни случаи, со други производствени процеси.



Слика 1.3: Шема на работниот процес на РИ, со главните примени (адаптирано од Geng and Bidanda (2017); Buonamici, Carfagni, Furferi, Governi, et al. (2020)).

Кај пред процесирањето, се прават неопходните подбрувања во податоците од облакот од точки, се елиминираат можните грешки, и моделот се подготвува за чекорот на сегментирање. Кај сегментирањето, областите од моделот се делат согласно различните облици базирани на моделот. Ова е многу важен чекор кој прикажува информации за соодветните области. Чекорот на класификација е поврзан со процесот на сегментирање, но овде областите се унифицирани врз основа на некои правилни облици, како: рамнини, цилиндри, конуси, сфери и сл. Моделирањето (обликувањето на површината), е еден од најважните чекори, и тој зависи од избраната метода за CAD реконструкција на моделот. Вообичаено, за реконструкција се избираат две методи, метода базирана на облици и метода која не е базирана на облици. Кај методата базирана на облици, моделот се генерира како CAD параметарски, со користење на неколку стратегии, како: независно совпаѓање на површините, совпаѓање со ограничувања, 2D пресеци и скици и стратегија базирана на знаење. Кај методата која не е базирана на облици, се користат само стратегии со алатки за произволни површини. Конечно, создавањето на CAD моделот, претставува финален чекор од рамката на РИ, кој обично обезбедува завршни зафати за комплетирање на моделот, како генерирање на заоблувања, закосувања и поставување на ограничувањата на геометријата. Во чекор 2 не мора да се следат сите презентирани чекори. Во некои случаи, пред процесирањето е директно поврзано со соодветен софтвер за подготовка за АП, а во некои случаи, создавањето на CAD моделот се генерира во прелиминарниот чекор.

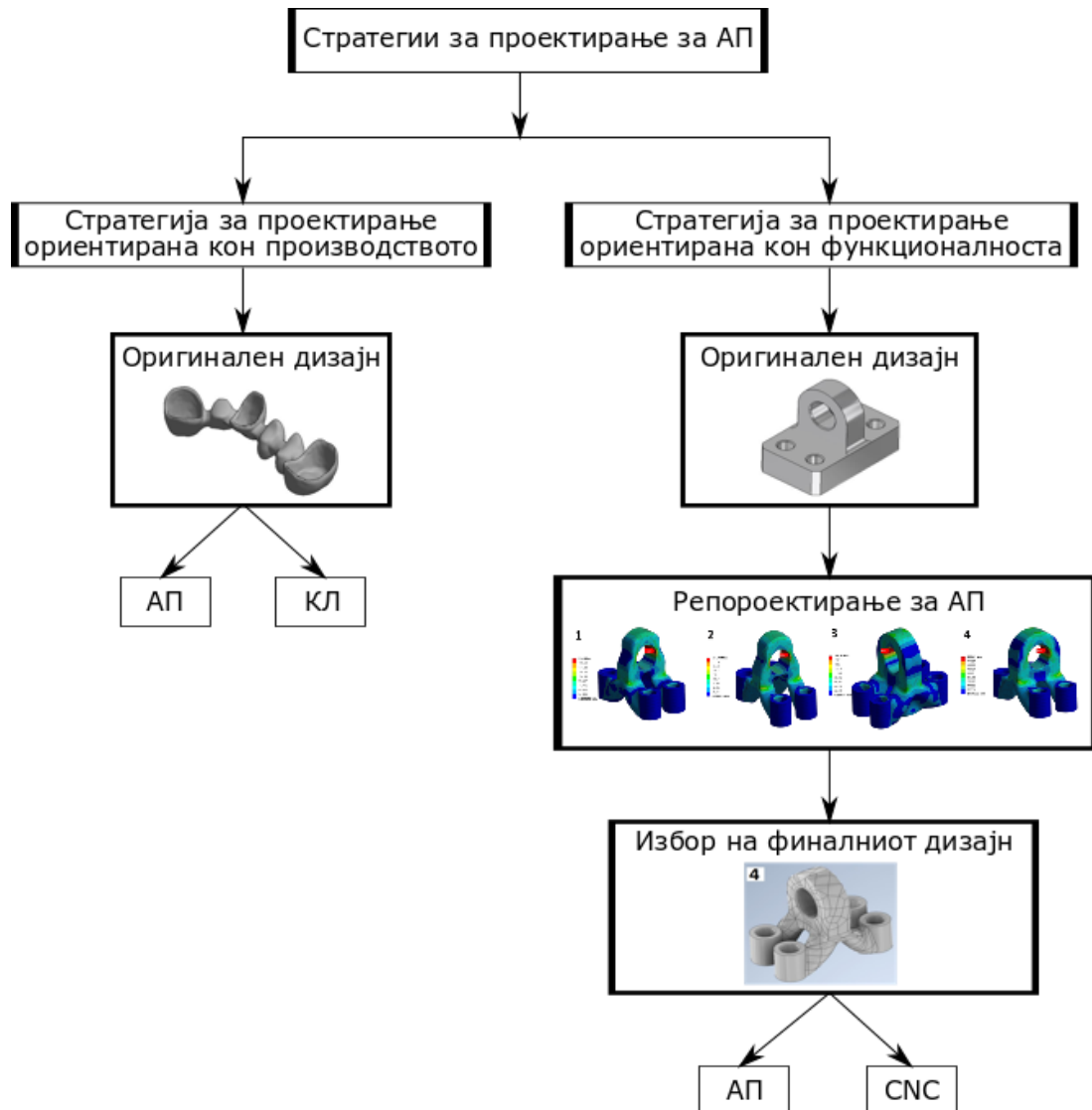
Со оглед дека РИ се смета како влез за АП, евидентно е скратувањето на патеката на податоците кон крајниот производ. Во некои случаи, потребно е да се избере метода за CAD реконструкција базирана врз геометријата на делот (Shabani, Vrtanoski, and Dukovski 2018), а во некои случаи, CAD моделите се генерираат преку онлајн платформи (Shabani and Dukovski 2018b). Исто така, важно е да се избере соодветен CAD софтвер за 3D моделирање (Shabani and Dukovski 2019), кој е потврден од страна на корисниците. Кога станува збор за интеракцијата помеѓу РИ и АП, постои процедура за пренос на податоците во машината за АП. Сликата 1.4, ја покажува патеката за двата типа на генерирање на CAD модел и подготовка за АП.



Слика 1.4: Патеки на податоците за АП (адаптирано од Gebhardt and Hötter (2016)).

Согласно Сликата 1.4, во оваа дисертација, првиот процес е прифатен за примерот од денталната медицина (аквизиција на податоци, РИ, и 3D CAD), додека вториот процес е прифатен за примерот за индустрискиот дел (3D CAD на оригиналниот дизајн, оптимизација на топологијата (вклучувајќи метода на конечни елементи (FEA - Finite Element Analysis) и валидација на дизајнот), и репроектирање на 3D CAD). Врз основа на способностите на АП, согласно Klahn, Leutenecker, and Meboldt (2015), може да се имплементираат две стратегии за проектирање за АП, стратегија на проектирањето ориентирана кон производството (MDDS - Manufacturing Design-Driven Strategy) и стратегија на проектирањето ориентирана кон функционалноста (FDDS - Function Design-Driven Strategy). Преку MDDS, АП се користи само како технологија на производство без промена на оригиналниот дизајн споредено со другите производни технологии. Од друга страна, FDDS ги користи сите можности во слободата на

проектирањето, за да се произведе дел без било какви геометриски ограничувања. Во овој случај, оригиналниот дизајн се менува со истовремено задржување на функционалноста.

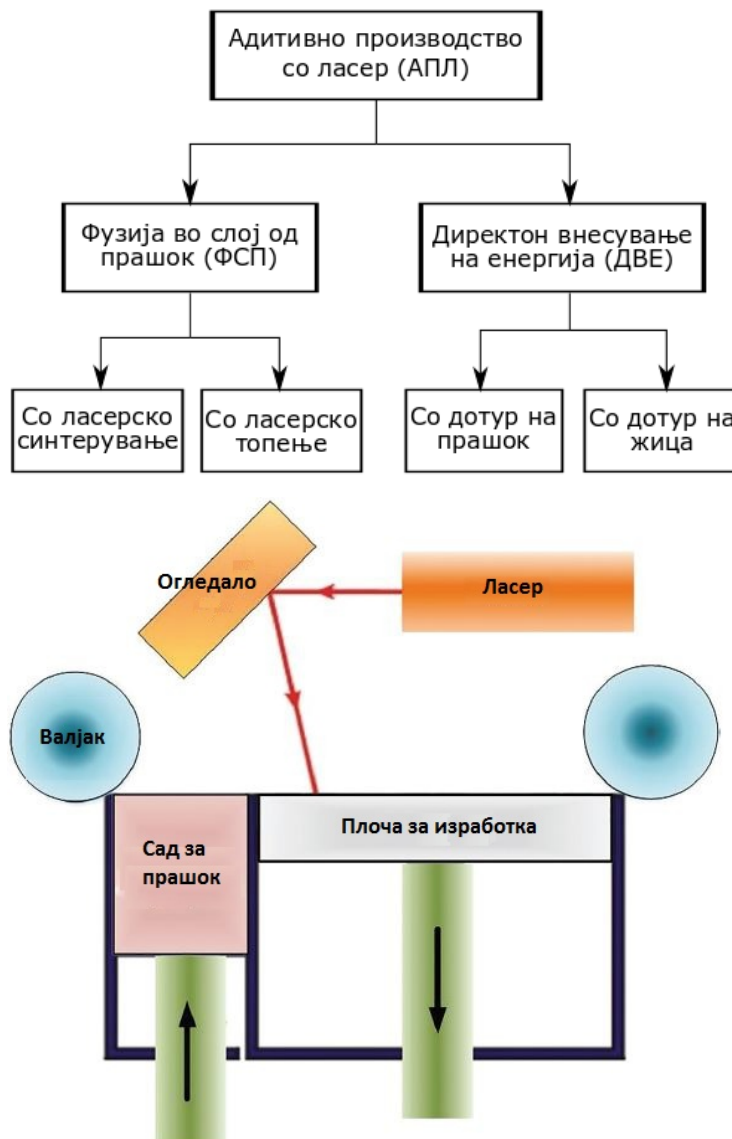


Слика 1.5: Стратегии на проектирање за АП вклучувајќи ги примерите од истражувањео.

На Сликата 1.5, денталниот мост како оригинален дизајн е избран за MDDS, а е произведен со две различни технологии, АП и класично леење (КЛ). За FDDS, избран е држач за ракавец како оригинален дизајн, кој потоа е репроектиран за да се добијат четири различни модели, од кои еден е избран за производство. Дизајнот е сложен и наменет е за производство само со АП, но заради споредба, тој е исто така произведен и со (CNC – Computer Numerical Control) CNC обработка. Техниките на проектирање за АП, имаат значаен напредок паралелно со технолошкиот развој, особено во областа на различни софтвери и алгоритми (Zhang et al. 2019). Резиме на опфатот и методологијата

на проектирањето за адитивно производство (ПАП) (DfAM - Design for Additive Manufacturing) се прикажани од Vaneker et al. (2020), вклучувајќи и сеопфатна анализа.

Како резултат на развојот на технологиите за АП, особено АП за метал, се зголемуваат барањата за сложени и уникатни производи. Со оглед дека веќе се развиени многу материјали за користење во АП, и примената во практиката се зголемува. Меѓу најкористените технологии на АП е адитивното производство со ласер (АПЛ) (LAM - Laser Additive Manufacturing). АПЛ се состои од три примарни подсистеми (Paul, Jinoor, and Bindra 2018): ласерски систем со висока моќност, систем за манипулирање со материјалот, и CNC управуван работен дел. Класификацијата на АПЛ системите и шемата на процесот на топење со ласер се прикажани на Сликата 1.6.



Слика 1.6: (горе) Класификација на АПЛ; (долу) процес на ласер топење (преземено од Paul, Jinoor, and Bindra (2018)).

Истражувањата во оваа дисертација се однесуваат на процесот на ласер топење со ФСП, со користење на два вида материјали: CoCrMo за примерот од денталната медицина и AlSi10Mg за индустрискиот дел, и притоа материјалите се топат комплетно, за разлика од ласерското синтерување. Резултати од истражувањето на развојот на ласер со фузија во слој од прашок Л-ФСП (L-PBF - Laser Powder Bed Fusion) се дадени од страна на Sing and Yeong (2020), додека Vuj-Corral, Tejo-Otero, and Fenollosa-Artés (2020) споредуваат неколку технологии на АП (предности и недостатоци), вклучувајќи го и селективното ласер топење (СЛТ) (SLM - Selective Laser Melting). Кај процесите на АПЛ, многу се значајни процесните параметри и некон специфични третмани, иако секој материјал различно се однесува. Сликата 1.7, ги прикажува различните проблеми кои се среќаваат при истражувањето на АПЛ.



Слика 1.7: Процесни проблеми кај АПЛ (адаптирано од Paul, Jinoor, and Bindra (2018)).

За секој од проблемите прикажани на Сликата 1.7, постојат одредени начини на делување во процесот на АПЛ, кои се елаборирани од страна на Paul, Jinoor, and Bindra (2018). Деламинацијата и пукнатините можат да се превенираат со предгревање на платформата и подесување на процесните параметри. Заостанатите напони обично се третираат со процесот на термичка обработка, а температурата зависи од видот на материјалот. Во врска со порозноста, која главно е присутна заради недоволна фузија и присуство на гасови, во повеќето случаи таа се решава со примена на топло изостатичко пресување (HIP - Hot Isostatic Pressing). Ефектот на создавање на капки може да биде

контролиран преку оптимирање на процесните параметри и управување со процесната атмосфера. Големината на обликот и квалитетот на површината може да бидат подобрани со користење на соодветни процесни параметри и примена на завршни операции. Презентираните интервенции не се конечни со оглед на сложеноста на производството и разновидноста на материјалите.

Во ова истражување, определувањето на процесните параметри е направено преку симулација во еден слој, со цел да се истражува областа на топење и процесот на порозност. Дефинирањето на процесните параметри за материјалите CoCrMo и AlSi10Mg, е реализирано со соодветна симулација на процесот. Поради сложеноста на индустрискиот дел, направена е макро симулација, со цел да се истражува распределбата на температурата и вкупната деформација по процесот на АП. За таа цел, користени се процесните параметри определени при разгледувањето на примерот за индустрискиот дел. Направено е експериментално истражување за двата примера, базирано на процесните параметри добиени од симулацијата на процесот на АП. Анализирани се микроструктурата и направена е споредба на точноста во однос на класичните технологии, и за двата примера. На крајот, анализирани се економските аспекти на производството на избраните делови со АП. Направена е споредба со КЈ и CNC обработката. Денталниот дел е споредуван како уникатен производ и во мали количини, додека индустрискиот дел (држач за ракавец) е споредуван за големи количини на производство. И за двата случаи направено е истражување за времето на проектирање, РИ и производство.

1.2 Мотивација

Истражувањето на проектирањето и производството на сложени делови со РИ и АП е многу значајно, имајќи во предвид дека деловите произведени со АП се разликуваат од оние произведени со субтрактивно и формативно производство во однос на атрибутите како: време, трошок, квалитет и флексибилност. Предностите и недостатоците се евидентни кога се прави споредба на овие атрибути кај производството на сложени делови. Долгото време за производство заедно со завршните операции, трошоците за машини и материјал и евентуалните дефекти во микроструктурата, се елементи кои треба да се земат во предвид при АП и класичните технологии. Поради овие причини, неопходна е споредба помеѓу АП и класичните технологии на производство, со цел да

се добие јасна претстава за употребата, придобивките и недостатоците на РИ и АП, при проектирање и производство на сложени делови. За таа цел избрани се два примера. Првиот пример се базира на РИ и АП без промена во оригиналниот дизајн. Истиот дизајн е произведен и со формативно производство. Вториот пример опфаќа репроектирање на оригиналниот дизајн за АП, и негова споредба со производството со субтрактивната технологија. Главните истражувачки предизвици во оваа дисертација, можат да бидат дефинирани како:

- Примена на оптички метод (3D скенирање) за процесот на РИ и истражување на сложени делови произведени со АП и класични технологии (формативно и субтрактивно производство).
- Користење на флексибилноста на АП за репроектирање на деловите за намалување на масата со користење на метода за оптимирање на топологијата.
- Оптимирање на процесните параметри за АП со користење на симулација, вклучувајќи истражување на областа на топење и порозноста за материјалите CoCrMo и AlSi10Mg.
- Макро симулација на сложени делови во однос на распределбата на температурата и вкупната деформација.
- Маталографско испитување за материјалите CoCrMo и AlSi10Mg за делови произведени со АП и со класични технологии (формативно и субтрактивно производство).
- Добро структуриран економски модел за АП кој вклучува: истражување на времето, трошокот за проектирање и РИ на деловите произведени со АП, и споредбени анализи со деловите произведени со формативно и субтрактивно производство.

Разбирањето на атрибутите за време, трошок, квалитет и флексибилност во проектирањето и производството на сложени делови со РИ и АП, е главниот предизвик на оваа теза.

1.3 Цели на истражувањето

Користењето на РИ и АП за проектирање и производство на сложени делови, како и споредбата со класичните технологии на производство, е главната цел на оваа теза. Практичниот придонес на оваа теза е поврзан со примената на РИ и АП во деналната

медицина (производство на дентален мост со CoCrMo), и во индустријата (држач за ракавец од AlSi10Mg).

Од ова истражување може подобро да се разбере:

- Процесот на РИ за сложени делови и репроектирањето на делови.
- Оптимирањето на процесните параметри за АП.
- Распределбата на температурата и вкупната деформација кај сложените делови.
- Микроструктурата на деловите произведени со АП и со класични технологии.
- Процесот на истражување на точноста базиран на техниката на 3D скенирање на сложени делови.
- Економските аспекти и аспектите на времето кај деловите произведени со АП, и споредбената анализа со класичните технологии на производство.

Во истражувањето се вклучени два методолошки пристапи:

- Нумерички пристап за оптимирање на дизајнот, средно ниво анализи за генерирање на оптимирани процесни параметри и макро анализи за разбирање на влијанието на распределбата на температурата и вкупната деформација по производството со АП.
- Експериментален пристап за проучување на процесот на производство, влијанието на процесните параметри, споредба на точноста помеѓу АП и класичните технологии за производство, и споредбена економска анализа на деловите произведени со различни технологии.

1.4 Структура на тезата

Тезата е поделена во шест поглавја, со соодветни подточки. Во продолжение е дадено резиме за секоја од нив.

Поглавје 1, содржи вовед со општо објаснување на технологиите на РИ и АП релевантни за ова истражување. Исто така, вклучени се мотивацијата, целите на истражувањето и придонесот од истражувањето. Презентирани се недостатоците во истражувањата во оваа област, особено кај АП, при што се идентифицирани можностите за понатамошна работа. Поконкретно, утврден е недостаток од структурирани истражувања за РИ и АП во однос на времето, тршокот, квалитетот и флексибилноста кај проектирањето и производството на сложени делови.

Поглавјето 2, го презентира напредокот кај РИ и АП, вклучувајќи и преглед на литература со хронолошка елаборација на уредите за аквизиција на податоци, примената на STL датотеки, 3D CAD реконструкција, проектирање за АП, и производство со Л-ФСП. Во теоретските основи, прикажан е и подетален преглед на процесот на мерење, структурата на РИ, методата за оптимирање на топологијата за репроектирање на индустрискиот дел, како и некои главни правила за ПАП. На крајот на ова поглавје се прикажани податоци за материјалите CoCrMo и AlSi10Mg, за процесот на производство со Л-ФСП и математичката формулација.

Поглавјето 3, ги третира нумеричка анализа и оптимизација на РИ процесот на денталниот дел и репроектирањето на индустрискиот дел преку оптимизација на топологијата со користење на level set (LS) методата. Притоа, денталниот мост е добиен дигитално преку 3D скенирање. За индустрискиот дел, оригиналниот дизајн е анализиран со статички и модални анализи со користење на FEA, а потоа со оптимирање на топологијата базирана на поставувањето на слоевите, неговата геометрија е оптимизирана со цел намалување на масата. За репроектираниот модел, направена е валидација со FEA. Добиеени се четири различни модели, од кои еден е избран за понатамошно истражување. Бидејќи процесните параметри се многу важни за АП, направена е симулација со различни комбинации. Во овој случај направена е симулација во еден слој и симулација на порозноста за CoCrMo и AlSi10Mg. Од двата примери, избрани се оптимизираните параметри за да се реализира производството на делот со АП, а на крајот е направена макро симулација за испитување на распределбата на температурата и вкупната деформација.

Поглавјето 4, го прикажува истражувањето на експериментален на делот со РИ и АП, како и споредбата со класичните технологии на производство. Прикажана е постапката на производство, точноста и споредбата на обликот со помош на мерење со 3D скенирање и металографското испитување за АП, леене и материјалите кои се добиваат со пластична деформација.

Поглавјето 5, ги покрива аспектите на времето и трошокот при производството на делови со РИ и АП, наспроти производството со класичните технологии. Економскиот модел за АП ги содржи сите неопходни чекори за пресметка, вклучувајќи: индиректен трошок, трошок за проектирање, трошок за РИ, трошок за подесување, трошок за материјал, трошок за производство, трошок за пост производство, и трошок за завршните операции. Треба да се истакне дека трошокот за проектирање е вклучен во

вкупните трошоци, исто како и трошокот за РИ. На крајот, направена е споредба помеѓу АП и другите технологии во однос на презентираната анализа за времето и трошокот.

Поглавјето 6, ги резимира заклучоците на тезата, вклучувајќи го нејзиниот главен придонес, како и препораки за понатамошна работа.

2. НАПРЕДНИ ТЕХНОЛОГИИ КАЈ РЕВЕРЗИБИЛНО ИНЖЕНЕРСТВО И АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО

2.1 Преглед на литература

Во оваа точка ќе биде елабориран прегледот на литература која е поврзана со областите во кои е фокусирано главното истражување. Прегледот на литература е поделен на два дела, РИ и АП. Но, пред деталната елаборација на прегледот на литература за РИ и АП, презентирани се некои основни извори како вреден придонес кон различните аспекти на овие две напредни технологии. Во однос на РИ, мора да се издвојат авторите како Ingle (1994), Raja and Fernandes (2007), и Wang (2010) кои имаат направено многу значајни истражувања за РИ и неговата примена. Во областа на АП, поголем број автори придонеле со своите истражувања преку објавени книги, како што се Liou (2007), Gebhardt (2011), Gibson, Rosen, and Stucker (2014), Srivatsan and Sudarshan (2015), Gebhardt and Hötter (2016), Milewski (2017), Yang et al. (2017), Niaki and Nonino (2018) и Diegel, Nordin, and Motte (2019).

Елаборацијата на прегледот на литература започнува со модерните методи на мерење базирани на 3D скенери. Потоа продолжува со дигиталните аспекти на геометрискиот процес на деловите, вклучувајќи ги постапките за креирање на податоците во облакот од точки, креирање на STL датотека (STL - Standard Tessellation Language) и 3D CAD модел. Првата точка го покрива објаснувањето за чекорите од мерењата до создавањето на 3D CAD моделот, додека втората точка ги третира проектирањето и производството и се базира на процесот на АП. Како воведна фаза пред анализата на производството, е подготовката на моделот врз основа на правилата за производство со АП, а со користење на ПАП. Процесот на АП со метални материјали ќе биде објаснето со опишување на технологијата на ФСП. Истражувањето исто така ги третира и материјалите кои се соодветни за оваа технологија, вклучувајќи ги техничките аспекти и чекорите до финализација на производот.

2.1.1 Реверзибилно инженерство

Wieczorowski, Ruciński, and Koteras (2010), го презентираат користењето на оптички скенер за мерење на сложени делови за време на производството на делови од

алуминиум наменети за автомобилската индустрија. Понатаму, прикажан е процесот на добивање на податоците од 3D скенерот и нивната практична примена, при што точноста и ефикасноста се многу важни параметри. Brajliah et al. (2011), ги покажува предностите на бесконтактното мерење во споредба со конвенционалните методи на мерење. Направена е споредба помеѓу 3D скенирањето и машина за мерење на координати (СММ - Coordinate Measuring Machine) имајќи го во предвид фактот дека СММ има висока точност, но ограничен работен простор и висока цена. Испитувањата и споредбите се направени за различни делови. Paulic et al. (2014), применуваат РИ со цел добивање на дигитален модел за производство на постоечки дел од возило. Идејата е да се следи целокупната постапка, почнувајќи од 3D скенирањето до креирањето на 3D CAD моделот. Една од причините поради која се користи 3D скенирањето е обликот на делот (сложеноста), но и можноста за полесно добивање на геометриските податоци. Gerbino et al. (2015), користат 3D скенер за испитување на различни делови во индустријата, со цел брза аквизиција на информациите за геометријата. Прикажани се неколку фактори кои влијаат врз квалитетот на податоците. Овие фактори се поделени на внатрешни и надворешни. Резолуцијата и точноста на скенерот се анализирани како внатрешни фактори, додека амбиенталното осветлување, карактеристиките на површината на објектот и сензорот за релативната положба на површината се анализирани како надворешни фактори. Идејата на оваа анализа е давање препораки за практична употреба. Анализирани е метална плоча со сложен облик и заклучено е дека позицијата на скенерот во однос на ориентацијата и позицијата на објектот, е главниот фактор кој влијае врз точноста на процесот на мерење.

Szilvsi-Nagy and Matyasi (2003), ги анализирале стандардните влезни податоци за АП, односно STL. Кај АП, производството се реализира со пресекување на STL моделот на слоеви (слој по слој), кои конечно го образуваат обликот моделот. Не секогаш STL моделот се генерира без грешки. Во некои случаи, постојат одредени празнини и дупки кои го спречуваат понатамошното производство. Во ова истражување, прикажана е методата која ги детектира можните дефекти. Chowdary, Sahatoo, and Bhatti (2007), презентираат одредени проблеми кои се појавуваат за време на конверзијата од CAD модел во STL датотека. Еден од главните фактори кои влијаат на овој процес е изборот на вистинската толеранција при конверзијата. Во овој случај, толеранцијата влијае врз големината на документот, бројот на триангуларни елементи, и бројот на грешки во STL датотеката. Истражувањето покажува дека со зголемување на толеранцијата, бројот на

грешки се намалува, а исто така мора да се истакне дека во ASCII (American Standard Code for Information Interchange) датотеките постојат повеќе грешки отколку во бинарните датотеки. Kumar, Jain, and Pathak (2012), ја анализирале примената на облак од точки и STL податоци во индустријата. Во повеќето случаи, STL се користи за размена на податоци помеѓу РИ и АП. Користењето на овие геометриски податоци е многу важно за зголемување на точноста и квалитетот на скенираниот модел. Во ова истражување се прикажани: постапката, методот на скенирање, примената, предностите и ограничувањата на управувањето со облак од точки и STL.

Varady (2008), прикажува модерен (state of the art) пристап во однос на процесот на реконструкција на обликот на физичките делови преку облаци од точки. Со оглед на фактот дека генерираниот модел не е секогаш ист со оригиналниот физички модел, вклученоста на корисникот треба да е колку што е можно сведена на минимум. Во ова истражување се прикажани две автоматски методи кои помагаат во решавањето на проблемот. Првата е базирана на создавање на топографска структура која е комплетна и конзистентна со полигоналната мрежа, а втората е поврзана со точноста на спојувањето на површината. Protopsaltis and Fudos (2010), ја елаборираат 3D реконструкцијата на моделите скенирани со 3D скенер. Постојат многу случаи кога е потребна реконструкција на напречниот пресек, следејќи ја геометријата добиена од облакот од точки. Вообичаено, напречните пресеци се прикажани преку правилни линии и криви во зависност од геометријата на моделот. Wang et al. (2012), во своето истражување се осврнуваат на реконструкцијата на различни модели кои имаат широка примена во инженерството, вклучително и во АП. Овде, прикажана е структура со четири компоненти, која ја претставува патеката на реконструкцијата на моделот од мрежата на површината на постоечкиот модел. Прво се користи пред процесирање, при што мрежата се филтрира, а потоа мрежата се дели на потребните сегменти. Понатаму се користат две интегрирани решенија, како што се волуменски форми и површински форми за реконструкција на основните форми – примитиви. Со операциите како Буловата алгебра (Boolean algebra) и дообработка на површините (рамнење) се добива конечниот модел. Кај генерираниот модел зачувана е историјата во однос на карактеристиките, ограничувањата и моделирањето, што е многу важно доколку е потребно да се направат промени. Volpe et al. (2018), презентираат пристап во реверзибилното инженерство за реконструкција на CAD модели од 3D податоци од мрежа, кој е базиран на шаблон. Процесот на реконструкција се темели на информации

од физичкиот објект, а врз основа на дрво на карактеристики и ограничувања на геометријата. Овде CAD шаблонот се совпаѓа со податоците од мрежата, ги оптимира параметрите во однос на димензиите и се ориентира согласно дадениот алгоритам. CAD параметарскиот модел, многу добро ги исполнува барањата во однос на геометријата и историјата на моделирањето, па затоа е прифатлив за корисниците. Montlahuc et al. (2019), истражуваат во областа на виртуелни техники на РИ, како потенцијална можност за генерирање на „како што се скенирани облаци од точки од CAD моделите за склопување. Ова се споредува со веќе познатиот модел на собирање податоци од реални физички објекти. Во случај кога е потребен облак од точки од CAD моделот, тогаш тој е можно да се обезбеди преку виртуелното РИ, на начин кој нуди многу побрзо генерирање на податоците кои потоа можат да бидат искористени за машинско учење под надзор. Buonamici, Carfagni, Furferi, Volpe, et al. (2020), презентираат стратегија за имплементација на процесот на РИ за реконструкција на параметарски CAD модел. Методологијата која се користи за оваа реконструкција се вика база на шаблони за CAD реконструкција (CAD reconstruction template base). Истражувањето е фокусирано на колку што е можно подобра адаптација на CAD моделот кон референтните податоци. Некои стратегии на оптимирање за постигнување резултати, вклучуваат два алгоритми и три формулации на цел, и истите се презентирани во цитираниот труд. Buonamici, Carfagni, Furferi, Governi, et al. (2020), ги анализираат можностите за идентификување на ограничувањата на факторите кои се појавуваат за време на компјутерски помогнатата поправка на механичките делови, врз основа на кои процесот зависи од вештините на корисникот и софтверот за РИ. Посочени се теоретските аспекти како и практичната перспектива за нивната примена.

2.1.2 Адитивно производство

Hällgren, Pejryd, and Ekengren (2016), ги анализираат аспектите на повторното проектирање за АП, базирано на намалувањето на масата на оригиналниот модел со што моделот станува соодветен за производство со АП. Се работи за некои варијанти на дизајнот, во вид на комбинации на промени на геометријата на моделот, но со задржување на неговата функционалност. Меѓу остнатото, презентирана е анализа на трошоците, со споредба на оригиналниот дизајн со наново проектираниот дел. Zwier and Wits (2016), во своето истражување ги испитуваат аспектите кои го карактеризираат

ПАП, особено во однос на операцијата на изработка. Ориентацијата на изработка има големо влијание врз квалитетот на делот и врз механичките карактеристики. Подетална анализа е посветена на алгоритмот кој овозможува таква ориентација на делот која ја минимизира употребата на поддржувачи и конструкции за потпирање. Thompson et al. (2016), го елаборираат влијанието на ПАП во однос на можностите за примена, ограничувањата и економските аспекти. Истакната е исто така неговата идна примена, во индустријата и во други области. Rias and Segonds (2016), ги објаснуваат методите кои се користат во текот на ПАП, а посебно се фокусираат на раната фаза на ПАП, при што предлагаат 5 креативни степени кои му помагаат на проектантот да истражува нов дизајн. Booth et al. (2017), презентираат упатство за процет кое е вклучено на една страница. Ова се разликува од другите истражувања кај кои главно упатството вклучува претпоставки дека корисникот го знае процесот. Во ова истражување, презентирани се ПАП работни листови за чести и постојани корисници, вклучувајќи и некои грешки кои се идентификувани од страна на експерти во областа. Овој работен лист им помага на корисниците да го одржуваат квалитетот преку индиректни информации за репроектирањето. Идејата е да се елиминираат пред производните проекти кои го обновуваат времето за проектирање и производство. Orquéra, Campocasso, and Millet (2017), ја елаборираат предноста на АП користено за намалување на масата на делот со истовремено задржување на крутоста и со формирање на сложена геометрија. Понатаму, анализите се базираат на презентирање на методологијата која ја зема во предвид мултифункционалната оптимизација за механичкиот систем. Прво, се предлага подобрување на производот врз основа на можностите на АП, а потоа преку основни промени во оптимизацијата на системот, се развива нов дизајн. За да се докаже ова, применета е анализа на пример, како можност за испитување на користената методологија. Zhu, Anwer, and Mathieu (2017), презентираат метод за моделирање врз основа на STL датотека, со цел да го утврдат отстапувањето помеѓу дигиталниот и физичкиот модел. Што се однесува до ПАП, тој се стреми да ја задржи конзистентноста помеѓу дигиталниот и финалниот производ, што е многу важно. Следствено на тоа, новата метода на трансформација на обликот е развиена врз основа на поместувањето на контурните точки. Оваа метода е добра можност за предвидување на можните отстапувања од површината на делот, што му помага на проектантот во подобрувањето на дизајнот. Oh, Zhou, and Behdad (2018), прават преглед на неколку трудови кои се групирани во пет категории, кои вклучуваат погодност за изработка (печатење), продуктивност, функционалност, уметност и флексибилност. Главната работа се базира

на нановото проектирање на склопот на оригиналниот модел произведен со АП, што се нарекува “разложување на делот“ (Part Decomposition). Оваа анализа е помалку вообичаена отколку онаа која се нарекува “консолидација на делот“ (Part Consolidation), и повеќе е поврзана со ПАП. Заради тоа, акцентот е ставен на проучување на „разложувањето на делот“ за мотиви и ограничувања кои се однесуваат на АП. Pradel et al. (2018), имаат собрано збирка од 81 труд кои го проучуваат ПАП, и презентираат јасен и концизен опис во истражувањето на процесот на проектирање. Ова истражување се базира на рамката која го дефинира процесот на проектирање, а која ги вклучува следните делови: концептуален дизајн, конструктивно оформување, детален проект, планирање на процесот, и избор на процесот. Vikas, Lianos, and Stavropoulos (2019), во својот труд презентираат рамка за проектирање за АП, која е водена од АП и која ги систематизира сите можности на проектирањето за АП. Моменталната ситуација на оваа рамка се базира врз CAD параметри и параметри поврзани со АП. Ваквата поделба влијае врз делот кој е избран за истражувањето, но и врз целиот процес. Предложената рамка, водена од АП, превенира појава на некои производствени проблеми во однос на соодветната геометрија, а особено на оние проблеми кои се генерираат кај класичното производство, со што АП има способност брзо да го усоврши саканиот и соодветниот дизајн. Zhang et al. (2019), презентираат алгоритам врз основа на анализата за пред производство за АП со ФСП. Прво, конструкцијата за подржување се генерира врз основа на ориентацијата на делот. Многу параметри од процесот на АП и ПАП се пресметани така да ја постигнат продуктивноста за различни ориентации на делот. Генерирањето и пресметувањето на параметрите на подржувачите, е поврзано со graphical user interface (GUI) преку множество од алгоритми базирани на геометријата, а опфатена е и можноста за детектирање на области кои е тешко да се произведат. Исто така, развиен е и алгоритам кој врши евалуација на отстранувањето на подржувачите за време на фазата на пост производство, и го определува оптималниот број на подржувачи. Развиените алгоритми и алатки се прикажани во две анализи на пример.

Frazier (2014), прави преглед на АП на метали, вклучувајќи ги: науката за материјалите, процесите, бизнис аспектите, како и другите аспекти поврзани со можноста за користење на АП. (Yap et al. 2015), објаснуваат некои физички феномени поврзани со АП, преку преглед на СЛТ. Авторите посебно се фокусираат на областите на примена на заклучоци и трендови за процесите кои се одвиваат кај СЛТ. Lewandowski and Seifi (2016), анализираат збир на трудови и податоци кои се однесуваат на

механичките карактеристики на металните материјали произведени со АП. Како дополнување на различните технологии, овде некои видови на материјали се наведени според техниката на производство. Презентирани се некои од најважните податоци во однос на механичките карактеристики вклучувајќи: трвдина, истегнување/збивање, жилавост, и пораст на појава на пукнатини поради замор, за случаите кога честичките се произведени и термички третирани во услови на топол изостатички притисок (HIP). Микроструктурата, дефектите, анизотропијата и препораките за понатамошна работа, исто така се предмет на елаборација. Bourell et al. (2017), во нивното истражување ја презентираат употребата на различни материјали за АП. Повикувајќи се на неодамнешни истражувања, тие вклучуваат неколку категории на полимери, метали, керамички материјали и композити. Исто така, прикажани се и некои аспекти на микроструктурата кои влијаат врз процесот на АП. Понатаму, појаснети се некои од карактеристиките на деловите произведени со АП, поточно физичките, механичките, оптичките и електричните карактеристики. DebRoy et al. (2018), направиле преглед на феномените кои се појавуваат за време на процесот на АП кај металните материјали, вклучувајќи ги тука и физичките процеси базирани на металургијата и карактеристиките на деловите. Прикажани се теретските и експериментални резултати на огноотпорните легури, благородните метали, легури со различна градација, како и значаен број легури користени во инженерството. Yakout, Elbestawi, and Veldhuis (2018), ги елаборираат главните аспекти на АП со метали, фокусирајќи се повеќе на процесните параметри, микроструктурата и механичките карактеристики. Треба да се спомене дека се анализирани некои од најчесто користените материјали во АП, вклучувајќи го и AlSi10Mg. Calignano, Galati, and Iuliano (2019), презентираат рамка за идентификување на факторите кои влијаат врз резултатите и стабилноста на процесот на ФСП. Ова се должи на барањето за доверливи и високо квалитетни делови кои се потребни за примена во индустријата. Овде се предлага процедура за квалификација која ќе обезбеди решенија за намалување на факторите кои би можеле да бидат ризични за време на развојот на процесот. Vock et al. (2019), направиле преглед преку анализирање на материјалот, а во случајот станува збор за прашок кај АП со ФСП. Притоа, постојат само општи знаења во врска со подлабокото разбирање на перформанците на процесот на АП. Целта на овој труд е да се направи преглед на најновите истражувања поврзани со овој аспект. Moshiri et al. (2019), презентираат истражување на машините за ФСП од прашок и нивната употреба. Целта е да се разбере влијанието на машината врз квалитетот на произведениот дел.

2.2 Теоретски основи

Многу значаен дел од истражувањето се теоретските аспекти, математичките формулации и анализираните процеси за одредени феномени. Анализирајќи ги релевантните развојни процеси, може да се заклучи дека РИ и АП се во процес на постојани подобрувања. Во оваа точка ќе бидат елаборирани некои нивни важни аспекти, релевантни за истражувањата во оваа дисертација. Се започнува со анализата на процесот на оптичко мерење, вклучувајќи ја структурираната светлина, ласерската триангулација, и чекорите кои се потребни за реконструкција на геометрискиот модел со процесот на РИ. Ќе биде објаснета имплементацијата на оптимизацијата на топологијата базирана на поставувањето на слоевите (ОТ-БПС) (LSTO - Level Set Topology Optimization), како метод кој овозможува репроектирање на тековната геометрија. Бидејќи репроектираните делови треба да бидат соодветни за производство со АП, ќе бидат презентирани некои проектантски правила за АП кои овозможуваат производство кое ќе ги задоволи бараните технички критериуми. Ќе бидат вклучени и материјалите кои се користат за АП, поконкретно CoCrMo и AlSi10Mg, со нивните карактеристики како и микроскопската анализа на нивната микроструктура. На крајот, ќе биде презентирани АП процесот, поконкретно производството со Л-ФСП, вклучувајќи ги факторите кои влијаат врз целиот процес и параметрите за моделирање, симулација и производство.

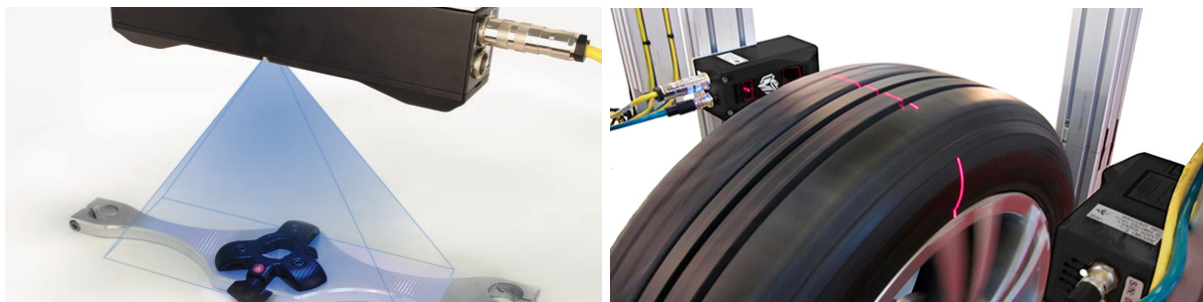
2.2.1 Мерење на облици и структура на РИ

Еден од најважните процеси за време на примената на РИ, е изборот на соодветен метод на мерење на обликот. Со текот на годините, развиени се повеќе вакви методи со соодветна класификација (Vukašinović and Duhovnik 2019). Постои поделба на активни и пасивни методи. Кај активните методи, сигналот се испраќа до објектот за да добие информација од него, а кај пасивните методи информацијата се добива од околината. Во однос на барањата за висока точност, во предност се активните методи. Постои и понатамошна поделба на контактни и бесконтактни методи. Контактните методи бараат контакт со делот кој треба да биде мерен, додека бесконтактните методи не бараат физички контакт помеѓу делот што се мери и уредот кој го врши мерењето. Кога станува збор за бесконтактните методи, најчесто се користат оптичките методи, особено триангулациските методи, кои потоа се поделени на методи со структурирана светлина

и ласерска триангулација. Аквизицијата на обликот ги вклучува триангулациските методи (Слика 2.1, Слика 2.2).



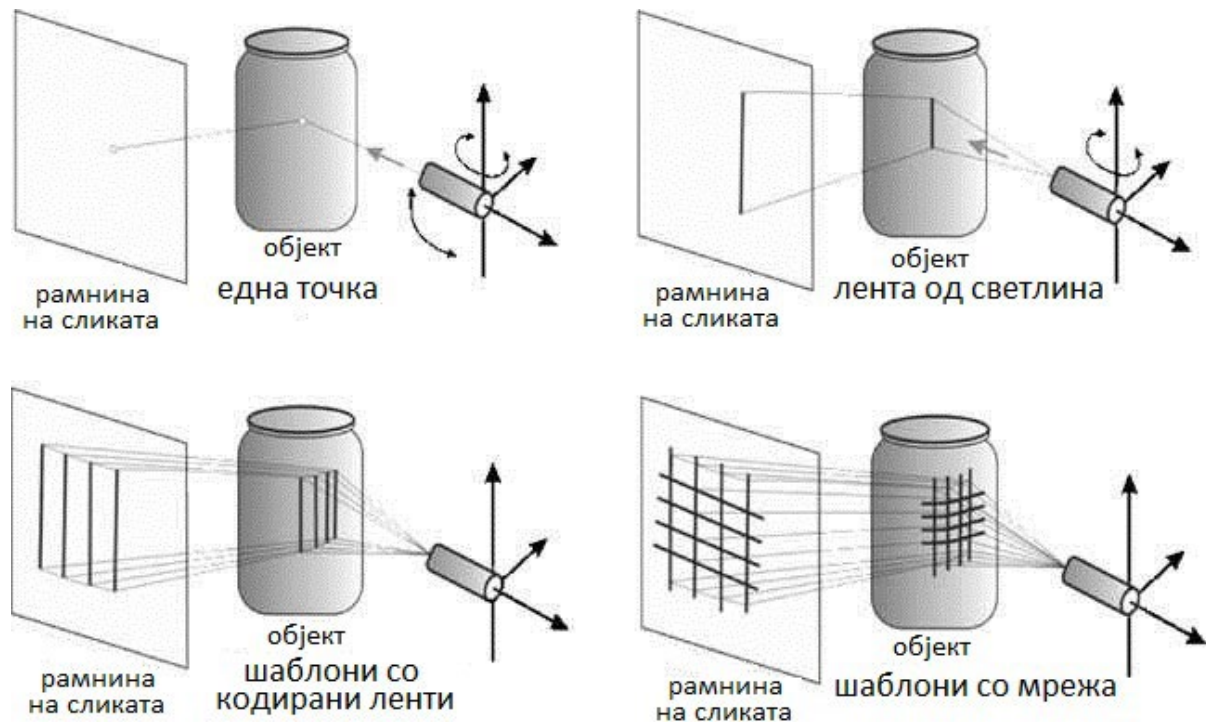
Слика 2.1: Триангулациски методи (адаптирано од Vukašinić and Duhovnik (2019)).



Слика 2.2: (лево) Технологија на структурирана светлина; (десно) технологија на ласерска триангулација (преземено од (LMI-Technologies)).

Структурираната светлина е техника која како принцип на работа ја има проекцијата на светлината врз површината на објектот под познат агол, при што се генерира и се снима рефлексивната светлина од површината на објектот. Податоците за координатите на објектот се пресметуваат од сликата (Raja and Fernandes 2007). Многу автори (Chen and Kak 1987; Caspi, Kiryati, and Shamir 1998; Park, DeSouza, and Kak 2001; Rocchini et al. 2001; Salvi, Pagès, and Batlle 2004; Robinson, Alboul, and Rodrigues 2004;

Xin, Wenguang, and Naoliang 2008; Rodrigues et al. 2013; Buchon-Moragues et al. 2016) имаат продонесено за развојот на оваа техника во различни форми. Притоа, многу важен елемент е текстурата на структурираната светлина, која може да биде: единствена точка, површина од светли и темни ленти, мрежа, или покомплексен облик како што е кодирана светлина (Raja and Fernandes 2007) (Слика 2.3).



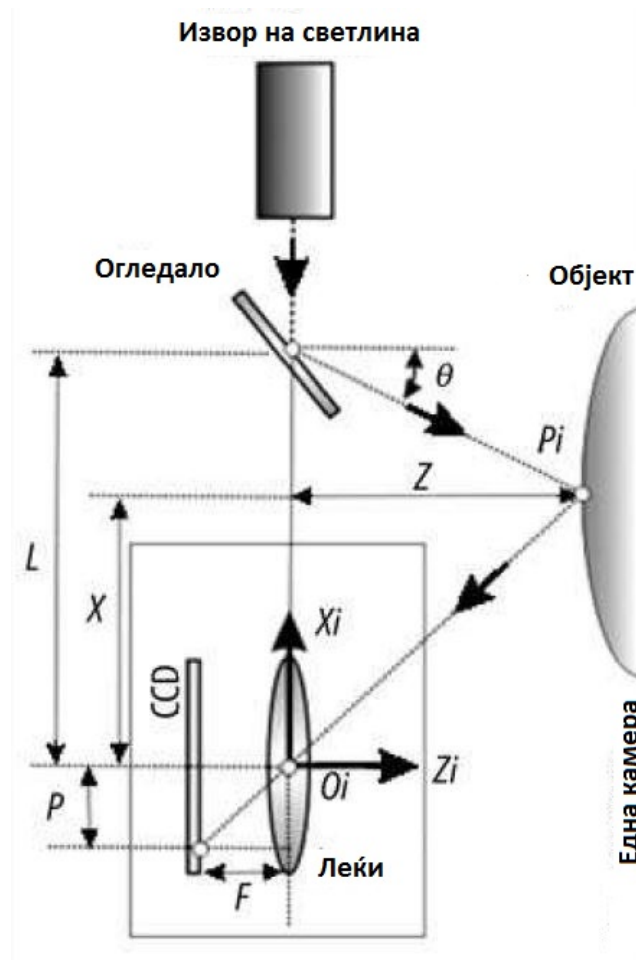
Слика 2.3: Различни облици на светлината (преземено од Raja and Fernandes (2007)).

Несомнено, еден од најзначајните и широко користените облици е оној со кодирани ленти, каде што видот на кодирање игра важна улога во однос на брзината, резолуцијата и точноста на примањето на податоци од објектот. Bell, Li, and Zhang (2016) ги поделиле различните облици на светлината во неколку кодификации:

- 2D псевдослучајни кодификации
- Бинарно структурирани кодификации
- N-та кодификации
- Триангуларни фазни кодификации
- Трапезоидни фазни кодификации
- Континуирани синусоидални фазни кодификации

Споредено со техниките на структурирана светлина, ласерската триангулација е широко распространета техника на мерење во некои сличаи, особено за објекти со мали

димензии, а уредите за мерење работат на мали растојанија. Кај методот на ласерска триангулација, принципот на работа се базира на фокусирање и проектирање на светлосниот извор (точка или линија) на површината на објектот под одреден агол. Фоточувствителниот уред е всушност (CCD) камера (CCD - Charge-Coupled Device) (Raja and Fernandes 2007). Шемата на ласерската триангулација со една CCD камера е прикажана на Слика 2.4.



Слика 2.4: Ласерска триангулација со една CCD (преземено од Raja and Fernandes (2007)).

Како што е прикажано на Сликата 2.4, светлосниот сноп, под агол θ , е проектиран врз површината на објектот. Рефлексијата на светлината од осветлената точка на површината на објектот е регистрирана од страна на фоточувствителниот уред. За да се пресметаат координатите Z и X на камерата, особено позицијата на осветлената точка P_i , треба да бидат познати фиксната основна должина L , аголот θ , фокалната должина на камерата F и координатите на осветлената точка P (Park and N. DeSouza 2005). За време на процесот, некои од параметрите мора да бидат прецизно дефинирани, затоа што во спротивно ќе се појават некои проблеми во генерираниот модел, посочени од

Boehler, Heinz, and Marbs (2002), кои вклучуваат точност, рабови и влијание на материјалот. Некои ефекти кои се појавуваат за време на процесот на скенирање, вклучувајќи повеќекратна рефлексивност, грешки во триангулацијата, разлики во рефлексивната на површината, и други состојби, подетално се разработени од Vukašinović and Duhovnik (2019).

Поради предностите на системите со структурирана светлина во однос на ласерските системи, кои вклучуваат многу брза аквизиција на податоците, информации со текстура во боја и не користењето на ласер (Raja and Fernandes 2007), експерименталната работа во овој труд ќе се базира на технологиите на структурирана светлина. Во примерот со денталниот дел, избрани се два 3D скенери со техника на структурирана светлина: 3Shape D900 (3Shape, Данска) (Слика 2.5 лево) како уред за мерење и Zirkonzahn S600 (Zirkonzahn GmbH, Германија) како уред за димензионална проверка (Слика 2.5 средина), додека за примерот со индустрискиот дел, за димензионална проверка е избран Go!SCAN 3D скенерот (Creaform, Inc., Канада) (Слика 2.5 десно), исто така со технологија на структурирана светлина. За секој од нив, користен е соодветен софтвер. За процесот на РИ на денталниот дел, користен е софтверот 3Shape (3Shape, Данска), додека за димензионалната проверка во двата случаи е користен Geomagic Control X (3D Systems, Inc., САД).

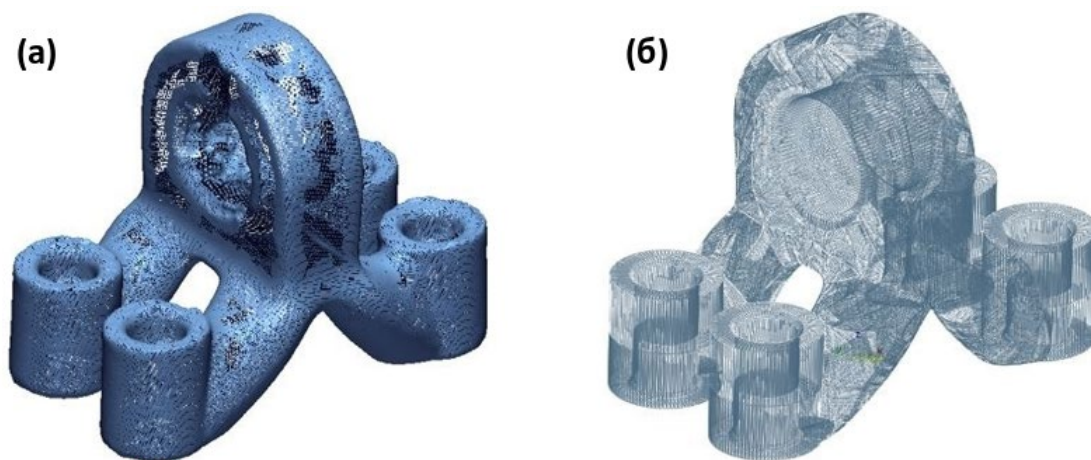


Слика 2.5: 3D скенери со техника на структурирана светлина: (лево) 3Shape D900; (средина) Zirkonzahn S600; (десно) Go!SCAN 3D.

По мерењето на физичкиот објект, се добива моделот од облакот од точки, претставен како површинска мрежа. Важноста на претворањето на постоечките физички објекти во дигитални модели, е утврдена уште пред многу години кога се појавила

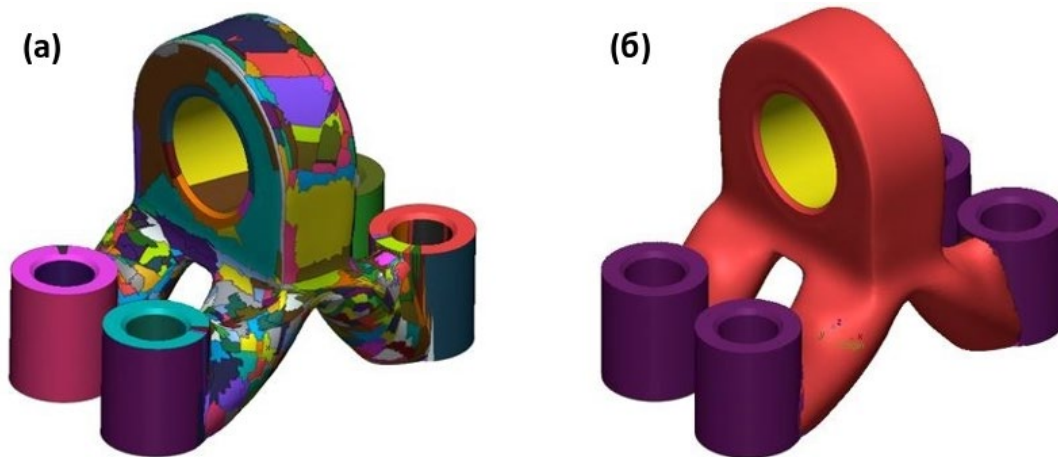
потреба од дигитализација на одредени модели, поради репродукција или реконструкција. Со развојот на оптичките техники на мерење, се зголемува потребата од создавање на процедура за процесот на РИ, почнувајќи од податоците за точките до креирањето на 3D CAD модел (Bernardini et al. 1999; Varady and Martin 2002; Varady 2008; Protopsaltis and Fudos 2010; Bey et al. 2011; Wu et al. 2013; Wang et al. 2013; Buonamici et al. 2017). Wang et al. (2012) развиле систематска процедура со неколку чекори кои овозможуваат генерирање на реконструиран модел врз основа на процесот на РИ, почнувајќи со облак од точки, па се до геометриски 3D CAD модел. Прво, постапката започнува со пред процесирање на мрежата преку чистење на шумовите од моделот од облак од точки, а потоа се продолжува со сегментирање на мрежата. Следната фаза се однесува на реконструкцијата, при што се применуваат операции за реконструкција на обликот и моделирање. На крајот, се генерира реконструираниот геометриски модел врз основа на процесот на РИ. Сите овие чекори се поедноставени со цел да се објасни реконструкцијата на индустрискиот дел во рамките на ова истражување, а во практичните истражувања е користен софтверот Geomagic Desing X (3D Systems, Inc., САД).

Пред процесирањето на мрежата се прави по завршување на процесот на 3D скенирање, и по добивањето на моделот од облак од точки за постоечкиот објект. Вообичаено, по овој процес, во мрежата на површината се појавуваат одредени шумови (Слика 2.6а). Ова предизвикува грешки и оневозможува добра реконструкција на моделот. Отстранувањето на точките со шумови од мрежата се вика “чистење на шумовите“ (Слика 2.6б) при што се користат техниките на пребарување на анизотропското опкружување и совпаѓање на површината.



Слика 2.6: Индустриски дел: (а) мрежа со шумови; (б) мрежа исчистена од шумови.

Сегментирањето на мрежата се применува за претворање на одредени делови од површинската мрежа во засебни области кои се блиску до било какви геометриски облици. Овој процес во принцип се разликува кај моделите со правилна форма и кај моделите со сложена форма. За овие два случаи, се предлагаат три облици на сегментирање, кои вклучуваат: рамна, квадратна и слободна форма. На Сликата 2.7, е прикажано сегментирање на две одделни подобрувања на границите за идентификација на областите.

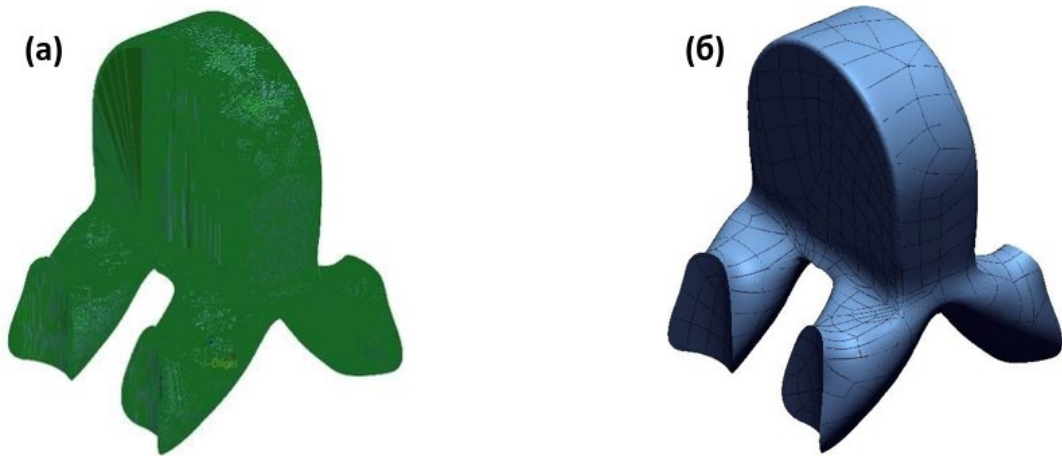


Слика 2.7: Индустриски дел: (а) сегментирање со висока осетливост без претставување на топологијата на објектот; б) кохерентен резултат поврзан со геометријата на објектот.

Реконструкцијата на обликот на површината може да се користи со примена на различни површини преку рамнење на геометријата на воуменскиот облик. Вообичаено, овие површини можат да бидат: рамни, квадратни и со слободна форма.

- *Совпаѓање на површината на квадратите со користење на минимизација на растојанието* се користи за реконструкција на квадратните површини како цилиндер, конус и сфера. Техниката може да се примени во случаите кога квадратната површина е независна во рамките на делот.
- *Обликот со квадратна површина* се користи во случаите кога кај делот постојат некои површини со одредени геометриски ограничувања. Во овие случаи, се користи метод за совпаѓање на површината базиран врз ограничувањата.
- *Површината со слободен облик* ја користи методата за реконструкција базирана на грешката во адаптирано совпаѓање на површините. Овде постои одреден почетен број на контролни точки, при што најмалите квадрати со површината на В-кривата, се преклопуваат со влезните точки, и се пресметува грешката на

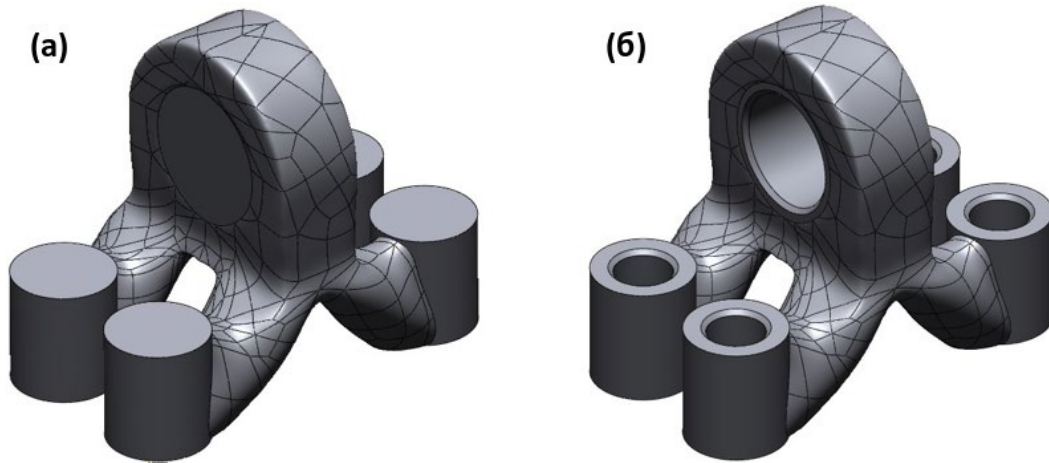
совпаѓањето. Треба да се спроведат детални чекори со цел започнување на процесот на подготовка за совпаѓање на влезните точки P со површината на B -кривата.



Слика 2.8: Реконструкција на индустрискиот дел со користење на карактеристиките на површината: (а) почетна мрежа; (б) реконструкција со површината на B -кривата.

Реконструкцијата на волуменските форми може да се користи за реконструкција на моделите со помош на формите на волуменските примитиви како што се извлекување (extrude), ротирање (revolve), пресликување (sweep), и извлекување низ различни профили (loft). Секоја од овие форми се користи во одделни случаи, во зависност од геометријата на моделот.

- *Извлечена форма* се генерира од 2D контура во одредена насока и должина, но насоката е секогаш нормална на рамнината од 2D контурата.
- *Ротираната форма* се генерира со ротирање на 2D контура во однос на одредена оска и со одреден агол.
- *Пресликаната форма* се генерира со пресликување на 2D контурата долж креирана патека. Вообичаено постојат два начина на генерирање. Првиот начин е кога профилот е цело време нормален на креираната патека, а вториот е кога профилот цело време останува паралелен во однос на почетокот.
- *Формата извлечена низ различни профили* се генерира со спојување на неколку 2D контури низ определена должина. Може да се користат различни 2D контури, или да бидат подесени со цел совпаѓање со одредена област од моделот што треба да биде реконструиран.



Слика 2.9: Реконструкција на индустрискиот дел со користење на волуменски (полни) форми:
(а) извлечена форма – спој; (б) извлечена форма – пресек.

2.2.2 Оптимирање на топологијата базирано на поставување на слоевите

АП и напредокот на техниките на FEA отворија многу можности во однос на проектирањето и валидацијата. Имајќи предвид дека со АП може да биде произведена речиси секоја геометрија, тогаш оптимизацијата на топологијата (ОТ) е многу добра и ефективна опција за репроектирање на различни делови. Постојат неколку истражувачи на ОТ во областа на АП (Brackett, Ashcroft, and Hague 2011; Langelaar 2016; Mirzendehtdel and Suresh 2016; Gebisa and Lemu 2017; Allaire et al. 2017; Guo et al. 2017; Fetisov and Maksimov 2018; Junk et al. 2018; Orme et al. 2018; Yu et al. 2020; Zhang, Ibadode, et al. 2020). ОТ како своја основна цел ја има минимизацијата или максимизацијата на одредени барања, кои се базираат на вообичаените ограничувања како што се масата, поместувањето или фреквенцијата. Авторите Bendsoe and Kikuchi (1988) и Bendsoe and Sigmund (2013), имаат значаен придонес во објаснувањето на основите на ОТ. Основната идеја е да се направи конструкција која на најдобар начин ќе одговори на оптоварувањата. Söderhjelm (2017) ја презентира општата математичка интерпретација на оптимизација на носечките структури како:

$$(CO) \left\{ \begin{array}{l} \text{минимизирај } g_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \text{ во однос на } \mathbf{x} \text{ и } \mathbf{y} \\ \text{предмет на } \left\{ \begin{array}{l} \text{бихевиорални ограничувања на } \mathbf{y} \\ \text{проектни ограничувања } \mathbf{x} \\ \text{рамнотежни ограничувања} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2.1)$$

каде што g_0 е функција на целта, која обично е избрана како проблем на минимизација, \mathbf{x} е проектна променлива и се менува за време на оптимизацијата, \mathbf{y} е променлива на состојбата и одговара на конструкцијата.

Една од неколкуте методи за ОТ кои се користат, е и методата на поставување ниво (LS - Level Set) (Liu and Korvink 2008; van Dijk et al. 2010; Verbart et al. 2012; Herrero, Martínez, and Martí 2013; Karpouzas and De Villiers 2014; Wang and Kang 2017; Wang, Gao, and Kang 2018). LS методата се позиционира околу границите на структурата и ја поврзува нивната имплицитна претстава преку изо контура од соодветната LS функција (Plocher and Panesar 2019). Математичките модели за ОТ и LS претставени од страна на (Sigmund and Maute 2013) се:

ОТ може да се формулира со користење на ефикасни алгоритми за оптимизација базирани на градиенти, вклучувајќи разумен број на итерации, од десетици до илјадници, за постигнување на конвергенција. Проблемот на ОТ, математички може да биде прикажан на следниот начин:

$$\left. \begin{aligned} \min_{\rho} : F(\mathbf{u}(\rho), \rho) &= \sum_i \int_{\Omega_i} f(\mathbf{u}(\rho_i), \rho_i) dV \\ \text{s. t.} : G_0(\rho) &= \sum_i v_i \rho_i - V_0 \leq 0 \\ &: G_j(\mathbf{u}(\rho), \rho) \leq 0, \quad j = 1, \dots, M \\ &: 0 \leq \rho_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

каде F е функција на целта, која треба да биде минимизирана со распределба на материјалот, \mathbf{u} е поле на состојбата кое треба да задоволи линеарна или нелинеарна равенка на состојбата, ρ е вектор на проектната променлива со должина N , Ω е домен на проектирањето, $f(\mathbf{u}(\rho), \rho) = g(\rho)f_0(\mathbf{u})$ е интерполација помеѓу густината и карактеристиката на материјалот зависна од пристапот, $g(\rho)$ е функција на интерполација на густината, $f_0(\mathbf{u})$ е функција на полето за материјалот на волуменската форма, G_0 ограничувања на волуменот и можни други M ограничувања G_j , додека N е променлива на јазолното проектирање.

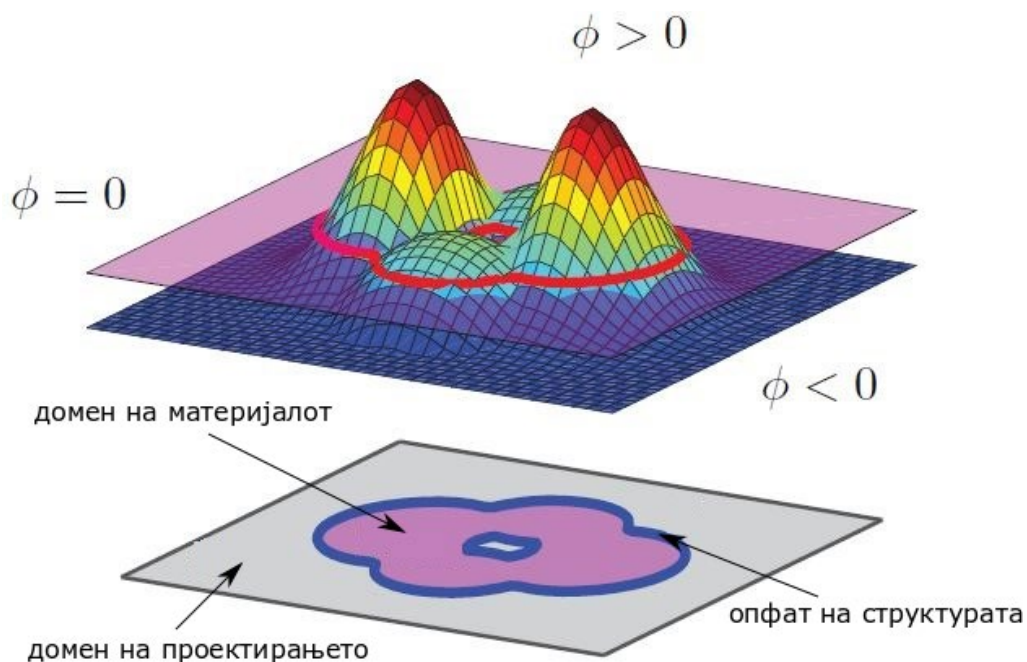
LS пристап. Овде границата на конструкцијата е дефинирана со контура на ниво „нула“ од множеството на функции на ниво $\Phi(\mathbf{x})$, а структурата е дефинирана со доменот каде LS функцијата има позитивни вредности:

$$\rho = \begin{cases} 0 : \forall \mathbf{x} \in \Omega : \Phi < 0 \\ 1 : \forall \mathbf{x} \in \Omega : \Phi \geq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

На Слика 2.10 прикажана е LS функцијата $\Phi(\mathbf{x})$. Горе е LS функцијата пресечена со рамнината на ниво нула, а долу се појавува доменот на материјалот и опфатот на структурата опишани преку LS функцијата, прикажани во доменот на проектирањето. Понатаму, LS функцијата е надградена преку решението на Хамилтон-Јакобиевата равенка, прикажана подолу:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + V|\nabla \Phi| = 0 \quad (2.4)$$

каде што t е псевдо времето кое ја претставува еволуцијата на проектот низ процесот на оптимизација, а V е функција на брзината.

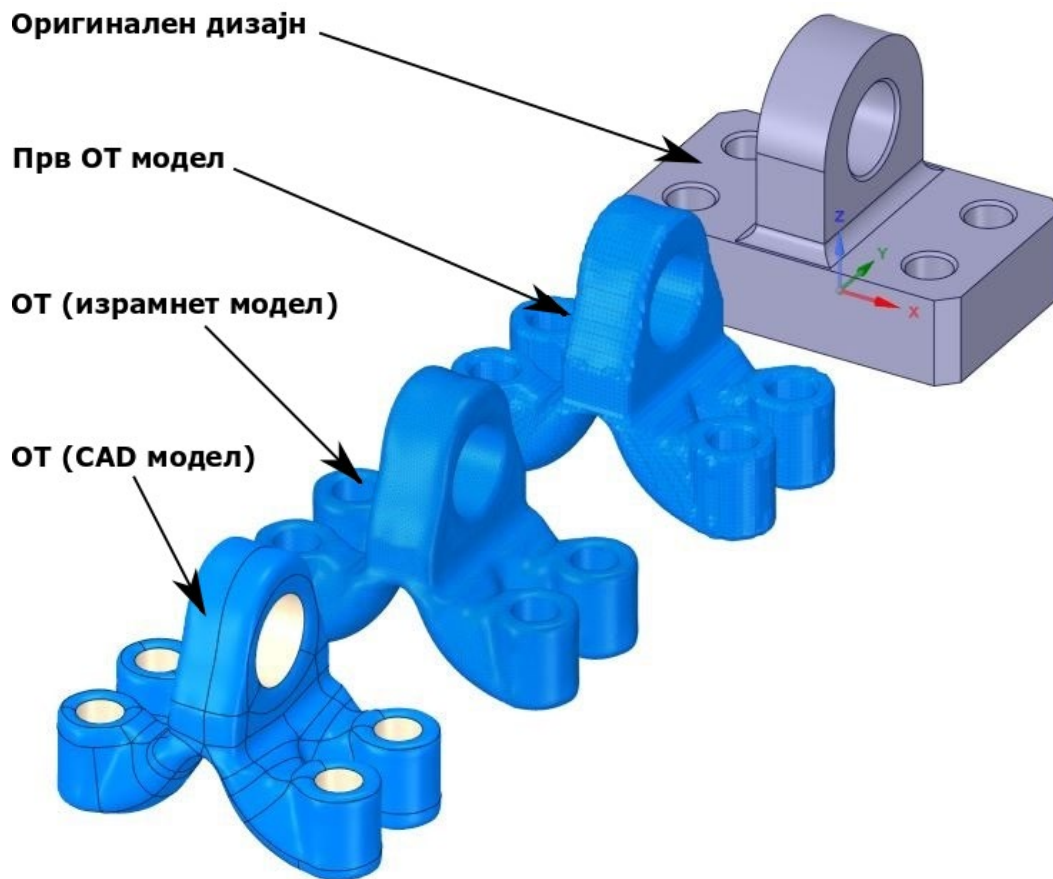


Слика 2.10: LS функција (адаптирано од Verbart et al. (2012)).

Предностите на овој метод се очигледни кај различни употреби, особено со добивањето на прецизен облик на геометријата на делот кај секој чекор од процесот и зачувувањето на одделните области со нивно контролирање. Во ова истражување, за репроектирање на индустрискиот дел се користи ОТ-БПС (Слика 2.11) со софтверот ANSYS (Ansys, Inc., САД).

Сликата 2.11, ја покажува промената на геометрискиот облик на оригиналниот дизајн преку примената на ОТ-БПС. Бидејќи е важно отворите да бидат заштитени од отстранување на материјал, зададена е областа односно максималната област на заштита за сите отвори. Основната идеја е овие области да бидат под контрола во текот на

процесот на оптимизација на прецизен начин. По завршувањето на процесот, се генерира првиот ОТ модел во STL формат. Моделот треба да биде подобрен, па затоа се креира и ОТ (израмнет модел), исто така во STL формат. На крајот, се генерира финалниот ОТ модел (CAD модел) кој е подготвен за валидација и други анализи

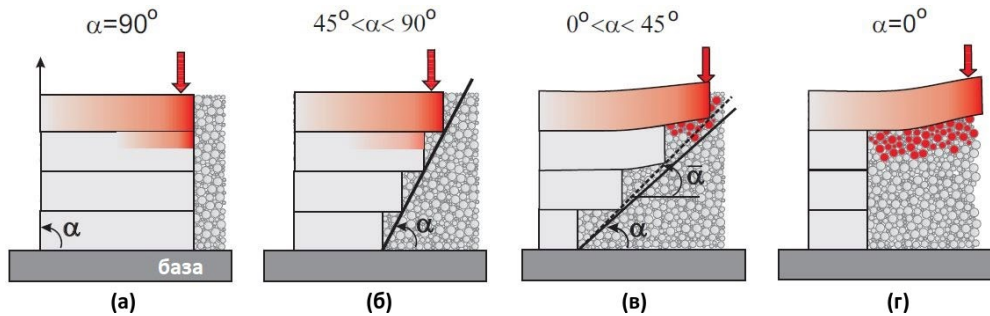


Слика 2.11: ОТ на индустрискиот дел со користење на методот на LS.

2.2.3 Проектирање за АП

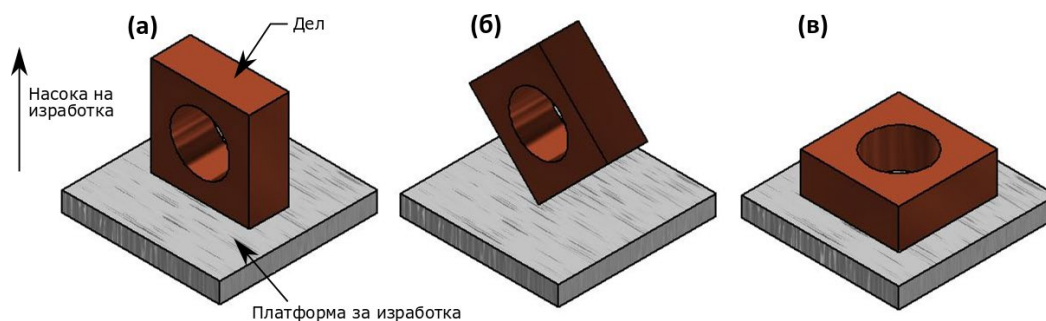
Врз основа на можностите за проектирање кои ги нуди АП, и предностите во однос на класичните технологии, постојат одредени ограничувања кои мора да бидат почитувани за да се добие бараниот дел. Многу истражувачи ја презентираат и елаборираат својата работа во оваа насока (Thompson et al. 2016; Booth et al. 2017; Pradel et al. 2018; Zhang et al. 2018; Vikas, Lianos, and Stavropoulos 2019) вклучувајќи ја имплементацијата, предностите и ограничувањата на ПАП. Некои аспекти кои треба да се земат во предвид за време на проектирањето, особено кај производството со Л-ФСП, меѓу другите се и: потпирањето, насоката на изработка, поддржувачите и специфичните ограничувања на обликот.

Потпирањето се појавува во најголемиот број на случаи кај АП. Некои типични примери се презентирани од Goutianos (2017), и прикажани се на Слика 2.12.



Слика 2.12: Потпирање и формирање на згура (преземено од Goutianos (2017)).

Кај привиот случај, прикажан на Слика 2.12а, може да се забележи дека топлината е дистрибуирана во значителни количини во претходниот слој со што се минимизира дисторзијата. Кај вториот случај (Слика 2.12б) дисторзијата обично е во рамките на толеранцијата, а претходниот слој обезбедува добро спроведување на топлината. Кај третиот случај (Слика 2.12в), кога делот повеќе се потпира на областа со прашок отколку на цврстиот материјал, има помало спроведување на топлината и затоа делот ги надминува зададените толеранции. Кај четвртиот случај (Слика 2.12г), растопена е значителна количина на материјал, што предизвикува проблем, односно зголемување на степенот на дисторзија и намалување на квалитетот на површината. За да се најде оптимално решение, во многу случаи се продолжува со насока на изработка која ги елиминира проблемите како оној под (в) и (г) од Сликата 2.12. Некои од можностите за насоки на изработка на дел со едноставна геометрија се прикажани на Слика 2.13.

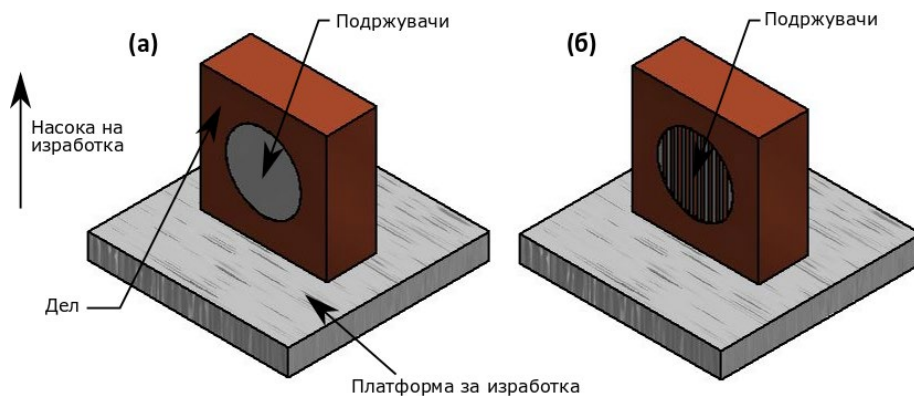


Слика 2.13: Разни можности за поставување на делот во однос на насоката на изработка (адаптирано од Goutianos (2017)).

Од Сликата 2.13, може да се видат три можности за насока на изработка кај еден ист дел. На сликата под (а) е делот со структура на потпирање со агол $\alpha = 0^\circ$, под (б)

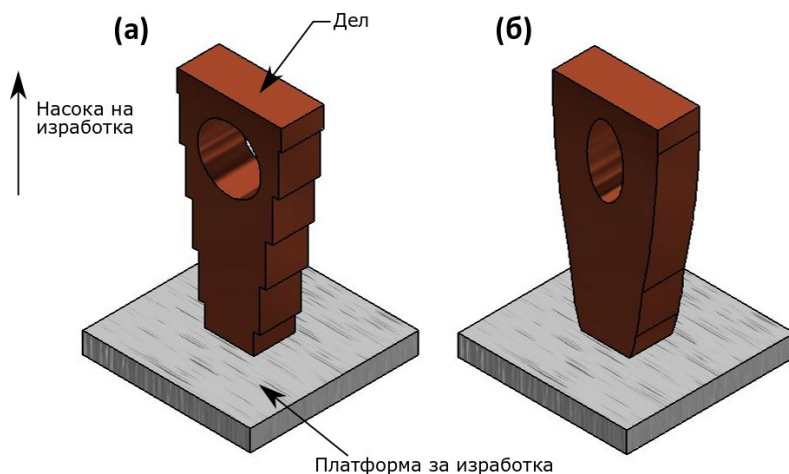
$\alpha > 45^\circ$, квалитетот на делот значително се зголемува, но е потребно поголемо потпирање, и под (в) е прикажана уште една можност со $\alpha = 90^\circ$ а делот може да биде со подобар квалитет. Кога се определува насоката на изработка, мора да бидат анализирани и економските аспекти, бидејќи ориентацијата на делот со највисоката насока (б), влијае врз времето на производство, а соодветно на тоа и врз трошокот.

Подржувачите се речиси неизбежни кај многу технологии на АП, особено за деловите произведени со Л-ФСП. Тие овозможуваат круто поврзување помеѓу делот и платформата за изработка. Исто така, тие се употребуваат во случаите кога има потпирање кај деловите. Сликата 2.14, покажува два главни типови на подржувачи.



Слика 2.14: Конструкции на подржувачи: (а) полна; (б) решеткаста (адаптирано од Goutianos (2017)).

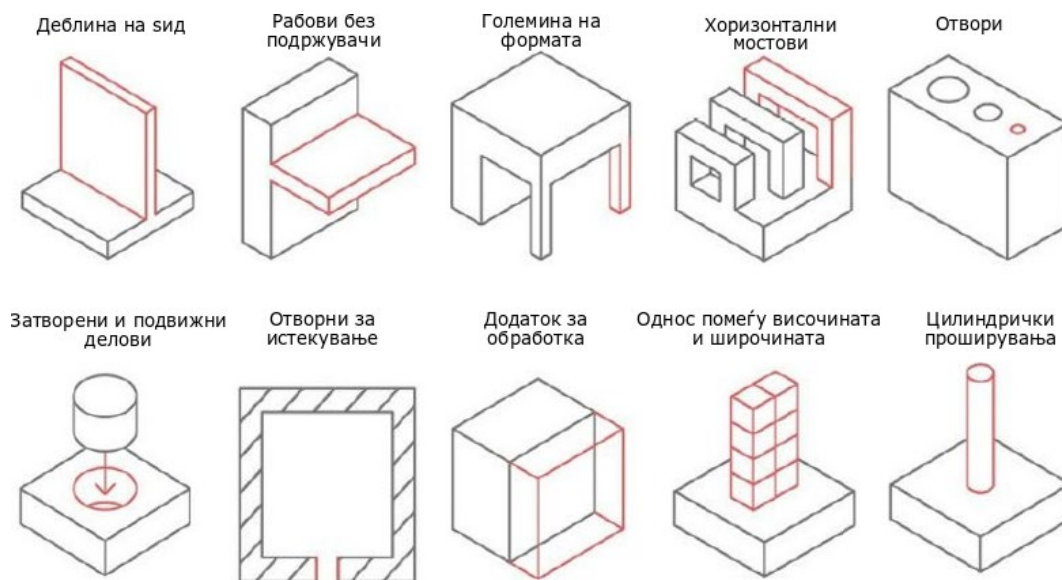
Подржувачите прикажани на Слика 2.14а го исполнуваат целиот простор каде се потребни подржувачи. Вообичаено, овие подржувачи се користат многу ретко, поради продолжувањето на времето за производство и дополнителна употреба на материјал, што исто така влијае и врз трошокот за дел. Кај приказот под (б) од Сликата 2.14, прикажани се типични подржувачи (решеткасти подржувачи), кои во пракса често се користат. Нивната предност е во ефикасното користење на материјал, заштеда на времето на производство и лесно отстранување од делот што обично се прави со различни операции и рачно. За време на проектирањето, подржувачите треба да бидат минимално користени, поради претходно споменатите причини. Тоа може да се постигне со промена на геометрискиот облик на делот, и во однос на внатрешниот и надворешниот облик. Доколку обликот на отворот (Слика 2.15а) прикажан на делот, кој има улога да ја минимизира масата на конструкцијата, нема некое особено значење, тогаш тој може да се промени од кружен во елипсовиден, а подржувачите ќе бидат непотребни.



Слика 2.15: Само-подржувачка конструкција: (а) подржувачи се потребни; (б) подржувачи не се потребни (адаптирано од Goutianos (2017)).

Истото може да се направи и кај надворешниот облик. Чекорите (Слика 2.15б) може да бидат репроектирани вклучувајќи радиус и лакови кои би ја елиминирале потребата од подржувачи.

Ограничувањата на обликот се присутни за време на проектирањето за АП, и важно е да се разберат ограничувањата на технологијата и можностите за производство на деловите без дефекти. Redwood, Schffer, and Garret (2017) презентираат неколку стандардни примери (Слика 2.16) за ограничувањата на процесите на производство со Л-ФСП.



Слика 2.16: Специфични облици кај печатењето со метал (преземено од Redwood, Schffer, and Garret (2017)).

За секоја од формите прикажани на Слика 2.16, дадени се следните препорачани вредности:

- *Дебелина на сид* – минимум вредност од 0.4 mm за да се обезбеди точност на печатените сидови.
- *Рабови без подржувачи* – максималната должина која може да биде печатена без подржувачи е 0.5 mm.
- *Големина на формата* – формите помали од 0.6 mm не можат соодветно да бидат синтерувани.
- *Хоризонтални мостови* – минималното дозволено растојание на мостот е 2 mm.
- *Отвори* – минималната димензија на отворот која може да биде точно произведена е 1.5 mm.
- *Затворени и подвижни делови* – процесот не е соодветен за затворени и подвижни делови
- *Цилиндрични проширувања* – минималниот прифатлив дијаметар на цилиндричните проширувања е 1 mm.
- *Отвори за истекување* – се користат за отстранување на вишокот прашок, и имаат дијаметар од 5 mm.
- *Додаток за обработка* – додаток од 0.5–1 mm треба да биде вклучен кај сите површини.
- *Однос помеѓу височината и широчината* – максималниот однос помеѓу вертикалната височина на печатење и широчината е 8:1.

2.2.4 Материјали за АП

Од неодамна, материјалите за АП се развиваат и применуваат во различни компании во индустријата. Во овој контекст, особен напредок е забележан кај металите за АП, кои се подобруваат и во однос на производствениот процес и во однос на нивните карактеристики. Во ова истражување се користат материјалите CoCrMo и AlSi10Mg, и затоа во продолжение тие ќе бидат подетално објаснети. Во однос на легури на CoCrMo, некои автори имаат значаен придонес во објаснувањето на феномените кој се појавуваат во текот на нивното користење (Kim et al. 2016; Abdullah et al. 2017; Han, Sawada, et al. 2018; Wang et al. 2018; Seki et al. 2019; Kazantseva et al. 2020). Што се однесува до легура на AlSi10Mg, неколку автори ја истражуваат нивната примена и

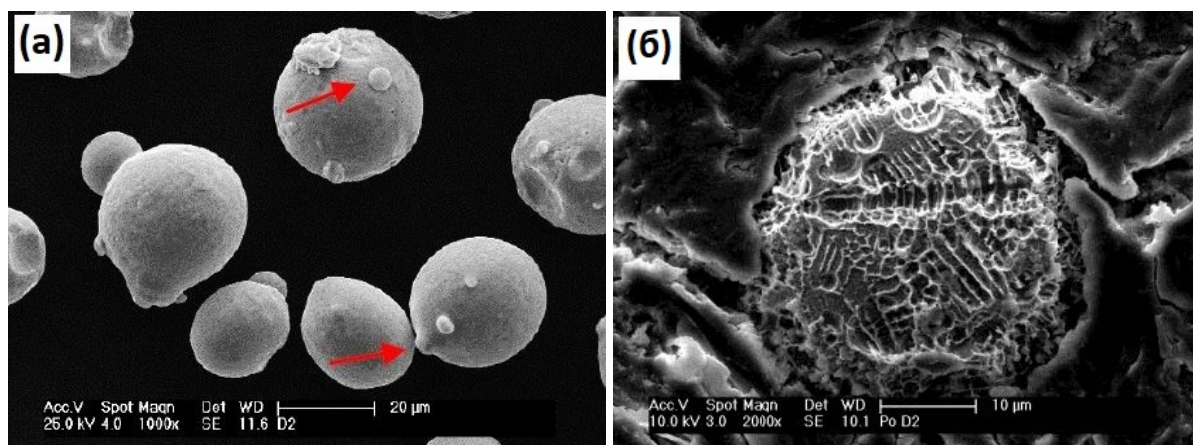
дефектите (Awd et al. 2018; Galy et al. 2018; Cabrini et al. 2018; Dong et al. 2018; Han, Gu, et al. 2018; Maamoun, Elbestawi, et al. 2018; Uzan et al. 2018; Hamidi Nasab et al. 2019; Zavala-Arredondo et al. 2019; Li et al. 2019; Aversa et al. 2019; Wang et al. 2019; Aboulkhair et al. 2019; Chen et al. 2020).

Легурата CoCrMo е материјал со добри механички карактеристики и отпорен на корозија, кој се применува во многу области, особено во медицината и стоматологијата. Развојот на прашкастата металургија овозможи CoCrMo да се користи и во АП. Многу производители кои користат комерцијални машини (EOS GmbH, Renishaw plc, SLM Solutions Group AG, etc.) го користат овој материјал со технологијата на производство со Л-ФСП. Во ова истражување, за анализата на пример од областа на денталната медицина, избран е материјалот CoCrMo, добиен со машината од EOS GmbH. Опремата е прикажана на Слика 2.17.



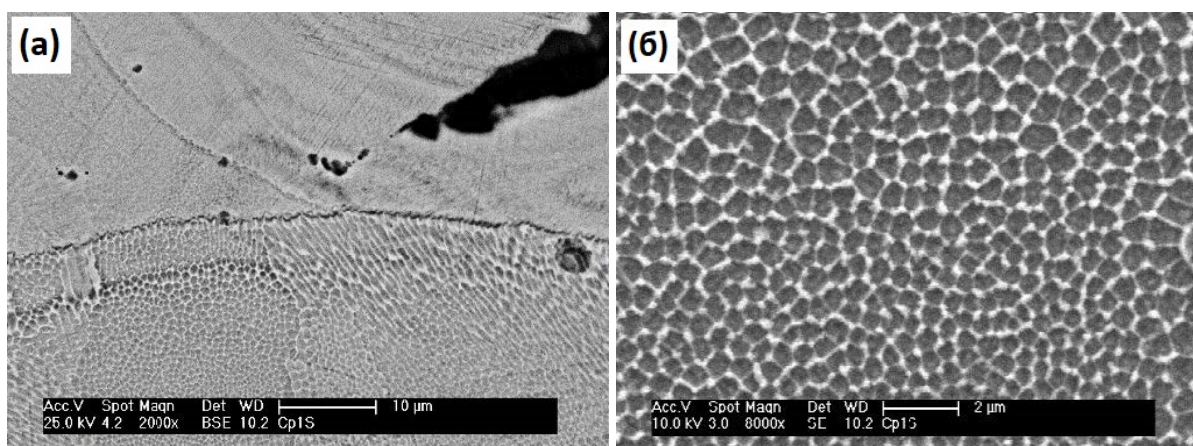
Слика 2.17: EOSINT M 270.

Деталната анализа за производството на производи од CoCrMo со постапка на СЛТ, е прикажана од Mergulhão (2017). Анализата на процесот на производство на прашокот на овој метал со постапка на атомизација (распрскување) на гас, регистрирана со електронскиот микроскоп за скенирање (ЕМС) е прикажана на Слика 2.18.



Слика 2.18: (а) Микроприказ на атомизираниот прашок; (б) попречен пресек на прашокот после нагризувањето (преземено од Mergulhão (2017)).

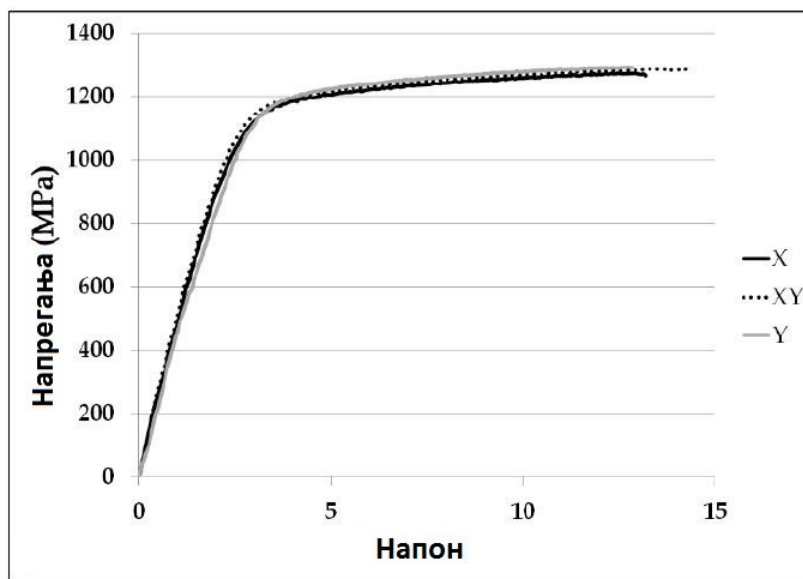
Од Сликата 2.18а, се гледа дека прашокот се состои од сферични честички и има присуство на сателити (прикажани со црвени стрелки). Ова се појавува како резултат на процесот на ладење за време на атомизацијата на гасот. Обликот на честичките влијае врз карактеристиките поврзани со компакцијата, протокот и компресибилноста. На сликата под (б), е прикажано како по брзото зацврстување на распрсканиот гас, се формира дендритна морфологија со примарни гранки и разгранувања. По производството со СЛТ, во микроструктурата на примерокот се појавуваат мали зрна, што е резултат на брзото зацврстување (кристализација). Анализите со ЕМС, со повратно расејување на електрон (ПРЕ) (BSE - Backscattering Electron) и со секундарен електрон (СЕ) (SE - Secondary Electron), презентрани од Mergulhão (2017) се прикажани на Слика 2.19.



Слика 2.19: ЕМС слики на примероци од CoCrMo: (а) слика со ПРЕ; (б) слика со СЕ (преземено од Mergulhão (2017)).

Сликата 2.19а и б, покажува дека примерокот произведен со СЛТ, има фини зрна кои не покажуваат примеси од различни други елементи. Фините зрна се добиени во насоката на ласерското синтерување. Овде микроструктурата е формирана со мали зрна што е карактеристично за брзото зацврстување (кристализација). Исто така, се забележува хомогена матрица со CoCrMo елементи како и морфолошка формација на ласерското топење.

Друг важен дел се механичките карактеристики, а едно такво истражување е направено од Bassoli and Denti (2018). Дијаграмот од испитувањето на истегање е прикажан на Слика 2.20.



Слика 2.20: Напон - напрегања кај испитувањето на истегање на примероци на CoCrMo за изработка во три ориентации (преземено од Bassoli and Denti (2018)).

Од Сликата 2.20, може да се види дека просечната максимална затегачка цврстина е помеѓу 1280-1300 MPa, а напонот помеѓу 13-14. Притоа, напрегањата се зголемуваат со промената на ориентацијата на изработка од X насока кон Y насока, но тие разлики не се големи. Sing, Huang, and Yeong (2020), ги испитувале механичките карактеристики и микроструктурата на примероци од CoCrMo произведени со СЛТ. Веднаш по изработката, примероците имаат анизотропски карактеристики, но по термичката обработка тие покажуваат изотропски карактеристики. Во YZ-рамнината, постои повисока микро тврдина споредено со XY-рамнината.

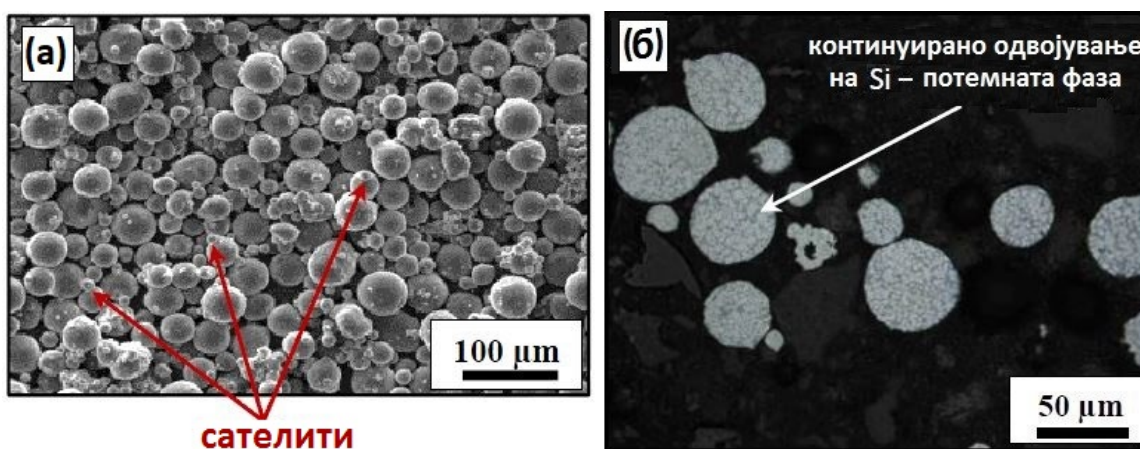
Легурата $AlSi10Mg$ е широко користена во индустријата. Алуминиумските материјали кој е користен во класичните технологии е веќе добро развиен и насекаде

има практична употреба. AlSi10Mg е во процес на консолидација во однос на производството со Л-ФСП, а неколку производители користат комерцијални машини за изработка со овој материјал на одредени делови (EOS GmbH, Renishaw plc, SLM Solutions Group AG, etc.). За анализата на пример од индустријата, кој е предмет на ова истражување, избрана е машинијата на Renishaw plc (Слика 2.21), за добивање на делови од AlSi10Mg.



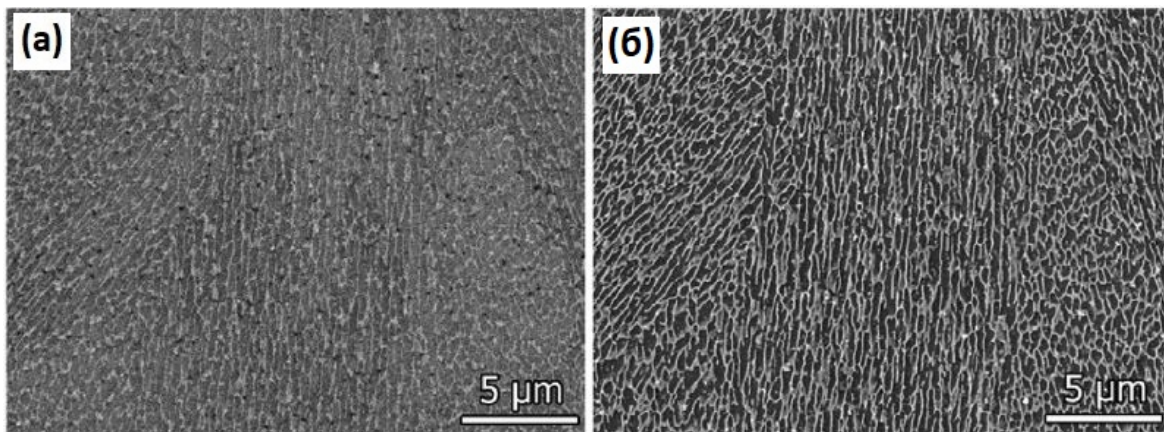
Слика 2.21: Renishaw AM 400.

Aboulkhair et al. (2015), ја анализирале морфологијата и попречниот пресек на прашокот од AlSi10Mg, а резултатите се прикажани на Слика 2.22.



Слика 2.22: (а) Морфологија на прашокот од AlSi10Mg; (б) микроструктура на попречниот пресек на прашокот од AlSi10Mg (преземено од Aboulkhair et al. (2015)).

Сликата 2.22а, ја покажува сферичната форма на честичките од прашокот, што претставува предност во производството со СЛТ, поради густината на компакцијата. Постојат и некои други предности во однос на прашоците со неправилни облици. Релативната густина за прашокот со сферичен облик е 99.62%, наспроти 97.74% кај прашок со неправилни облици на честичките, за исти процесни параметри. На сликата под (б), во микроструктурата на прашокот е прикажана цврста смеса на α -Al, со одвојување на Si по границите на Al зрната. Овој прашок се лади побрзо во однос на прашок со неправилна форма за време на процесот на атомизација. Минималната инхерентна порозност е набљудувана во попречниот пресек на прашокот. Евентуалната инхерентна порозност ќе доведе до пренесување на порозноста кај произведените делови. Друга важна работа се гасните пори, кои може да се припишат на влагата во прашокот и растворените гасови во честичките. Wu et al. (2016), во нивното истражување за микроструктурата на материјалот AlSi10Mg, со користење на СЛТ, ја прикажуваат анализата со ЕМС, со користење на ПРЕ и СЕ (Слика 2.23).

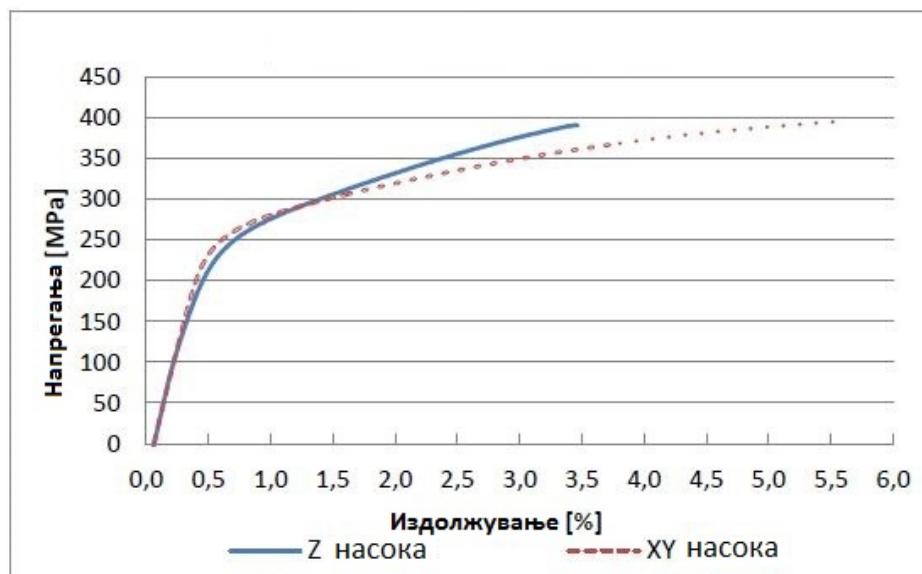


Слика 2.23: Слики од ЕМС на примерок од AlSi10Mg во пресек YZ: (а) слика со ПРЕ; (б) слика со СЕ (преземено од Wu et al. (2016)).

Врз основа на ова истражување, прикажано на Сликите 2.23а и б, е утврдено дека субќелијските структури се во редот на величина од 500 nm. Aboulkhair et al. (2015) во своето истражување ја презентира анализата која го има истиот пристап, при што грубите ќелии во границите на областа на топењето се во опсег од околу 650 nm, а оние пофините кои се во центарот на областа на топење се во рангот од околу 500 nm, што е во согласност со Сликата 2.23.

Покрај аспектите на микроструктурата, важни се исто така и механичките својства. Направена е анализа од страна на Kempen et al. (2012), каде што се испитувани

примероци произведени со СЛТ во Z и XY насока. Кривата напон - напрегања, од испитувањето на истегање, е прикажана на Сликата 2.24.



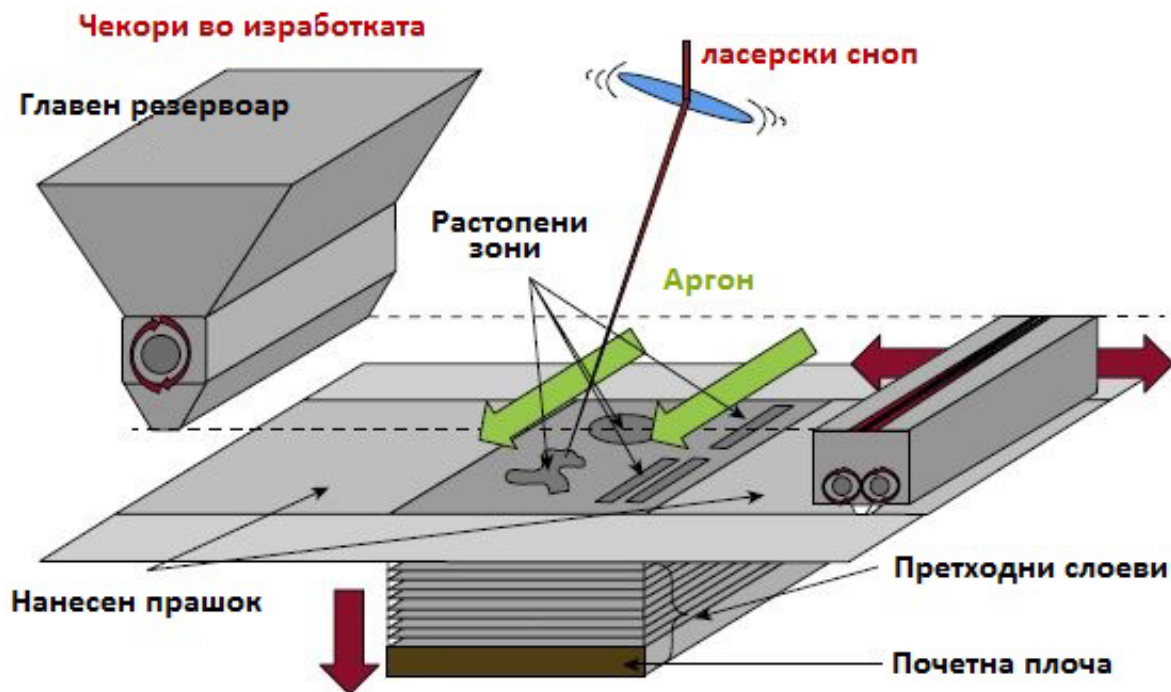
Слика 2.24: Испитување на истегање за делови од AlSi10Mg добиени со СЛТ (преземено од Kempen et al. (2012)).

На Сликата 2.24, може да се види анизотропскиот ефект како резултат на различните насоки на производство. Деталната анализа на анизотропијата е презентирана од Ullah et al. (2020). Во нивното истражување, тие креираат и испитуваат иновативна процедура за евалуација на анизотропијата на деловите од AlSi10Mg, произведени со техниката на Л-ФСП. Сите произведени делови покажуваат значителен степен на анизотропија. Процесните параметри го диктираат анизотропскиот ефект. За различните апликации презентирани во ова истражување, меѓу другите, параметрите како температурата на подлогата, влезната енергија, градиентот на температурата и преклопувањето на контурите на површината кај стратегијата на скенирање, влијаат врз намалување или зголемување на анизотропијата кај конкретниот дел. Подобрувањата водат до ПАП во рамките на прифатлива анизотропија.

2.2.5 Л-ФСП процес

Процесот на Л-ФСП има неколку чекори кои мора да бидат координирани за да се произведе бараниот дел, кој се генерира директно од 3D CAD моделот. Ласерот го топи прашокот и го претвора во цврст материјал. Во зависност од височината на моделот, слојот на прашок се нанесува во однос на претходното ниво за дебелина од еден слој, се

додека не се комплетира целата геометрија. Комората каде што се произведува делот е во заштитена атмосфера на инертен гас и помага во спречување на оксидацијата. Прашокот се нанесува во работниот простор преку обратно ротирачки валјак, при што се испушта контролиран волумен на прашок. Неколку автори (Salonitis 2016; Lee and Zhang 2016; Gouge and Michaleris 2017; Le, Tang, and Wong 2018; Khorasani et al. 2019; Yakout, Elbestawi, and Veldhuis 2019; Promopattum and Yao 2020; Tran et al. 2020; Zhang, Tan, et al. 2020; Sing and Yeong 2020; Boschetto et al. 2020) имаат свој придонес во истражувањето на Л-ФСП, особено во областа на моделирањето и симулацијата, експерименталните аспекти, процесните параметри, итн. Процесот на Л-ФСП е шематски прикажан на Слика 2.25.



Слика 2.25: Процес на Л-ФСП (преземено од Rigo and Engel (2013)).

За да се добие успешно произведен дел кој ќе ги задоволува сите услови, неопходно е да се контролираат многу параметри кои влијаат врз процесот. Врз основа на процесите кои се случуваат кај Л-ФСП, според Aboulkhair et al. (2014), процесните параметри се поделени во четири главни групи, со соодветни подгрупи, како што следува:

- *Процесни параметри поврзани со ласерот:* моќност на ласерот, бранова должина, големина на точката, времетраење на импулсот, фреквенција на импулсот

- *Процесни параметри поврзани со скенерот:* брзина на скенирање, растојание на скенирање, облик на скенирање
- *Процесни параметри поврзани со прашокот:* големина и дистрибуција на честичките, облик на честичките, густина на слојот од прашок, дебелина на слојот, карактеристики на материјалот
- *Процесни параметри поврзани со температурата:* температура на слојот од прашок, температура на дозаторот на прашок, нееднаквост на температурата

Некои од клучните променливи генерирани од процесните параметри може да бидат користени за управување на производниот процес (Sun, Brandt, and Easton 2017):

- Волуметриска густина на енергијата (E_v , J/mm³):

$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (2.5)$$

каде што P е моќност на ласерот (W), v е брзина на скенирање (mm/s), t е дебелина на слојот (mm), и h е растојанието на премините (mm). Оптималното растојание на премините е $h = 0.7 \cdot w$, каде што w е фокусот на снопот.

- Линерна влезна густина на енергијата (E_l , J/mm³):

$$E_l = \frac{4P}{\pi v \cdot d^2} \quad (2.6)$$

- Површинска густина на енергијата (E_s , J/mm²) е густина на енергијата која е нанесена на површината на слојот од прашок:

$$E_s = \frac{P}{vd} \quad (2.7)$$

- Линеарна густина на енергијата (ЛГЕ) претставува влезна моќност по единица брзина (E_L , J/mm):

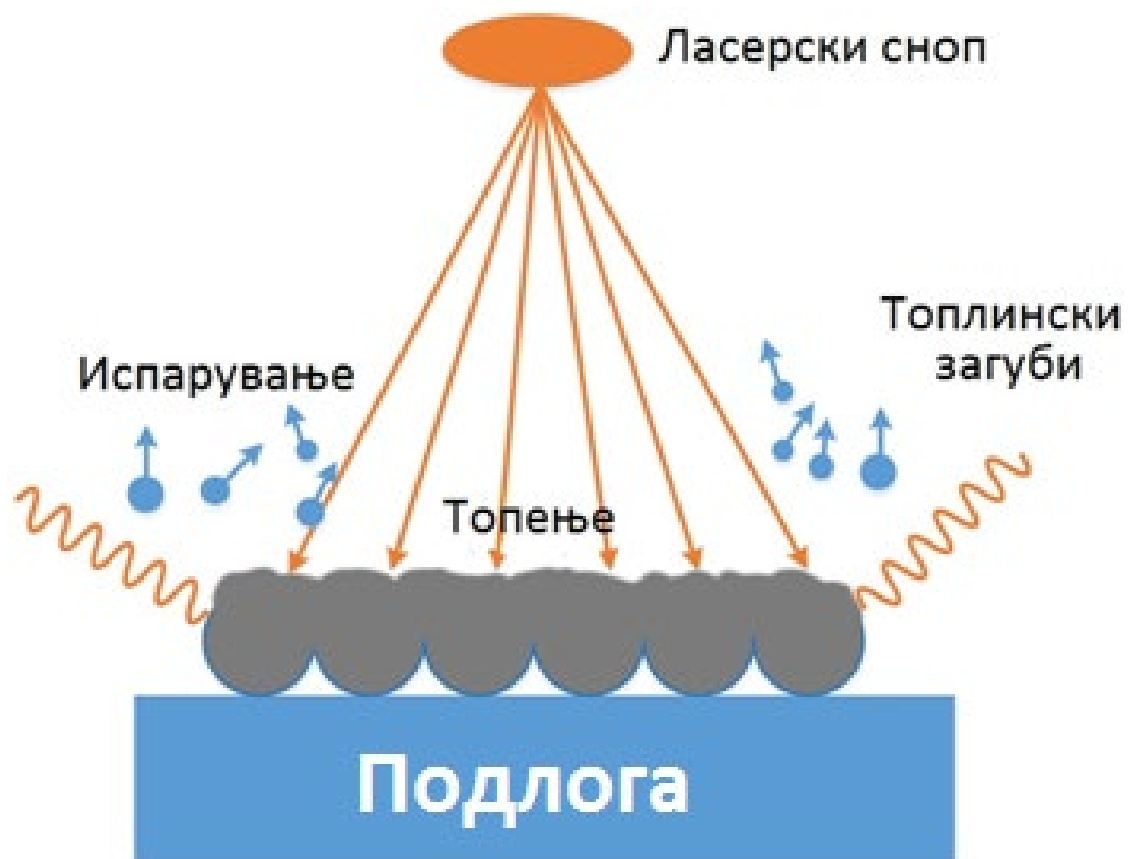
$$E_L = \frac{P}{v} \quad (2.8)$$

Обезбедувањето на неопходната и доволна енергија на ласерот за производство на деловите од метални материјали, со Л-ФСП, е еден од главните фактори за добивање на квалитетен дел. За време на процесот, апсорпцијата на енергија е поврзана со енергијата од ласерот апсорбирана од страна на слојот од прашок. Потрошувачката на

енергија е поврзана со топењето, испарувањето на материјалот и топлинските загуби (Слика 2.26). Zhou et al. (2019), имаат развиено математички равенки за пресметување на билансот на енергијата кај процесот на СЛТ. Општата форма на равенката е дадена како:

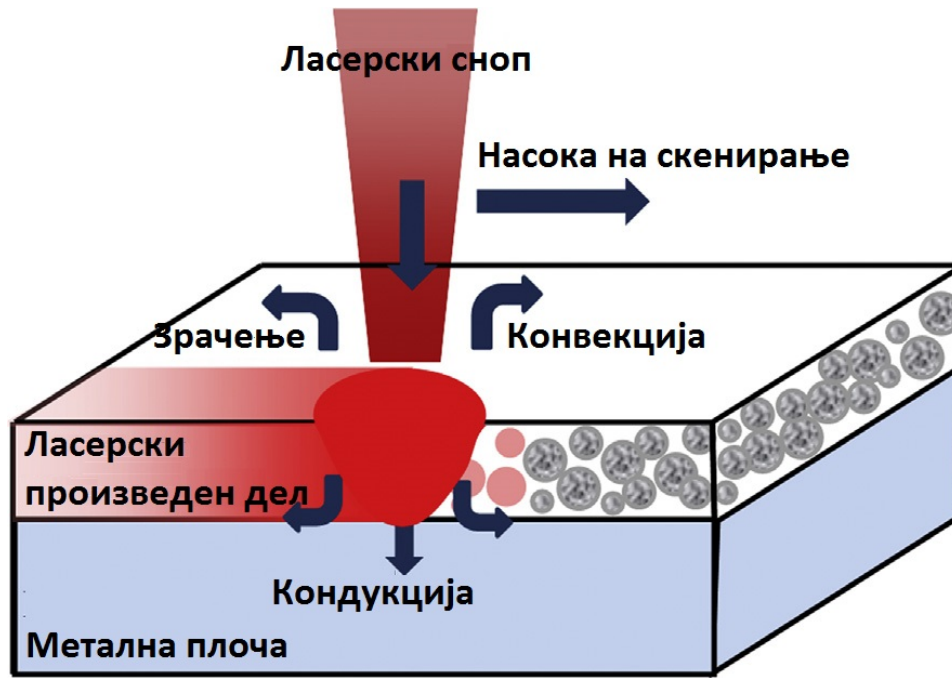
$$Q_a \geq Q_{\text{топење}} + Q_{\text{испарување}} + Q_{\text{топлински загуби}} \quad (2.9)$$

каде што Q_a се однесува на енергијата на ласерот апсорбирана од страна на слојот од прашок, $Q_{\text{топење}}$ е енергијата потрошена за топење на материјалот, $Q_{\text{испарување}}$ е енергијата потрошена за испарување на прашокот, а $Q_{\text{топлински загуби}}$ е загубата на енергија како резултат на топлинската конвекција и зрачење помеѓу слојот од прашок и околината, како и спроведувањето на топлина помеѓу слојот од прашок и подлогата.



Слика 2.26: Шема на преносот на топлина (преземено од Zhou et al. (2019)).

За време на процесот на СЛТ (Слика 2.27), помеѓу ласерот и прашокот се појавуваат две фази. Првата е поврзана со рефлексијата и апсорпцијата на зракот на површината на материјалот, а втората е помеѓу честичките на материјалот, делот што се произведува, и опкружувањето. Li et al. (2018), преку нивното истражување, имаат развиено равенки за преносот на топлина и енергијата на ласерот.



Слика 2.27: Термичко однесување на слојот од прашок под дејство на зрачењето од ласерот (преземено од Li and Gu (2014)).

Кај Картезиановиот координатен систем, температурното поле од доменот D , вклучувајќи ја просторната и временската дистрибуција, се прикажани со следната 3D диференцијална равенка за пренос на топлина:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (x, y, z \in D) \quad (2.10)$$

каде што ρ е густина на материјалот (kg/m^3), c е специфичен топлински капацитет ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$), T е температурата ($^\circ\text{C}$), t е времето на интеракција (s), k_p е ефективната топлинска спроводливост на слојот прашок, и Q е волуменската топлина која е генерирана по волумен во компонентата (W/m^3).

Почетната температура, T_0 , во слојот од прашок и металната плоча е со соодветни минимални и максимални вредности (2.11):

$$k_p \frac{\partial T}{\partial n} = Q + Q_c + Q_r, \quad (x, y, z \in S) \quad (2.11)$$

каде што S ја означува површината поврзана со применетиот топлински флуks, n е нормалниот вектор на површината на прашокот, Q е влезниот топлински флуks од ласерот, $Q_c = h(T_s - T_m)$ е конвекцијата на топлина, и $Q_r = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_m^4)$ е топлинското зрачење. Коефициентот h , е коефициент за конвекција на топлина, σ е Штефан-

Болцманова константа, ε е емисивност, T_s е температура на површината на моделот, T_m е амбиенталната температура.

Ласерскиот сноп го топи материјалот за време на процесот на СЛТ, а дистрибуцијата на неговиот интензитет е во согласност со Гаусовата зависност. Равенката е:

$$Q(r) = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (2.12)$$

каде што P е моќност на ласерот, r е растојанието до центарот на ласерската точка во реално време, R е ефективниот радиус на изворот на топлина на површината на материјалот каде што густината на енергијата е намалена на $1/e^2$ во центарот на ласерската точка, и A е апсорбливост на материјалот во однос на енергијата од ласерот.

Латентната топлина на фазната промена е важна и се изразува преку енталпијата (J/m^3). Равенката за нејзиното пресметување е:

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho C dT \quad (2.13)$$

каде што T е температурата, а C е специфичната топлина.

3. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И ОПТИМИРАЊЕ НА СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ

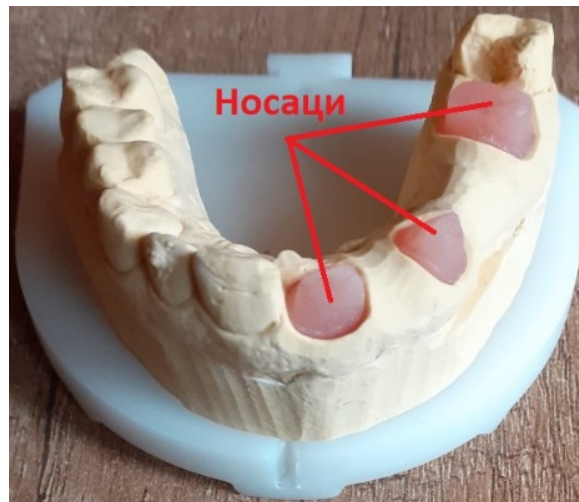
3.1 Реверзибилно инженерство и проектирање на делови

РИ денес е присутно секаде каде што има потреба, во различни области на инженерството и медицината, а особено се применува во индустријатата и денталната медицина. Како резултат на барањата за брзи и точни податоци, особено во фазата на мерење на физичките модели кај комплексни делови и модели со слободни површини, постојано расте потребата од користење на оптичка опрема за мерење. Овој метод е трошковно поефикасен и бара помалку време за целиот процес, во споредба со контактните и томографски системи (Budzik et al. 2019). Како што е познато, 3D скенер е уред кој овозможува аквизиција на геометриските податоци од физичките модели во дигитална форма без контакт. Добиените дигитални податоци се процесираат во софтвер со цел понатамошно нивно користење (Brajlih et al. 2018). Кога ќе се направи овој чекор, кој се состои од добивање на податоци од постоечките физички модели (модел на облак од точки), следниот чекор е испраќање на избраниот модел од облак од точки до соодветниот софтвер за понатамошна анализа. Во некои случаи, моделот е потребно да се корегира во однос на појава на евентуални грешки. Веќе постојат многу софтверски пакети кои ја прават оваа корекција, по што се добива конечниот модел, односно STL датотека. Конечниот STL модел може директно да се користи за производство со било која технологија од областа на АП, или да се интервенира врз него преку РИ. Моделот, а потоа и конечниот модел ќе биде зачуван како CAD модел кој овозможува изведување на понатамошни анализи преку компјутерски помогнато инженерство (CAE - Computer Aided Engineering).

Во ова истражување се користи процесот на РИ за проектирање на денталниот дел и методот за оптимирање на топологијата за репроектирање на оригиналниот дизајн од индустрискиот дел. Во случајот на денталниот дел, се користи 3D скенер за добивање на податоците за производот, по што следи процесот на РИ, до создаден на конечниот модел. За индустрискиот пример, оригиналниот дизајн е подготвен во софтверот CAD, а потоа со користење на методата за оптимирање на топологијата, се врши репроектирање на оригиналниот дизајн.

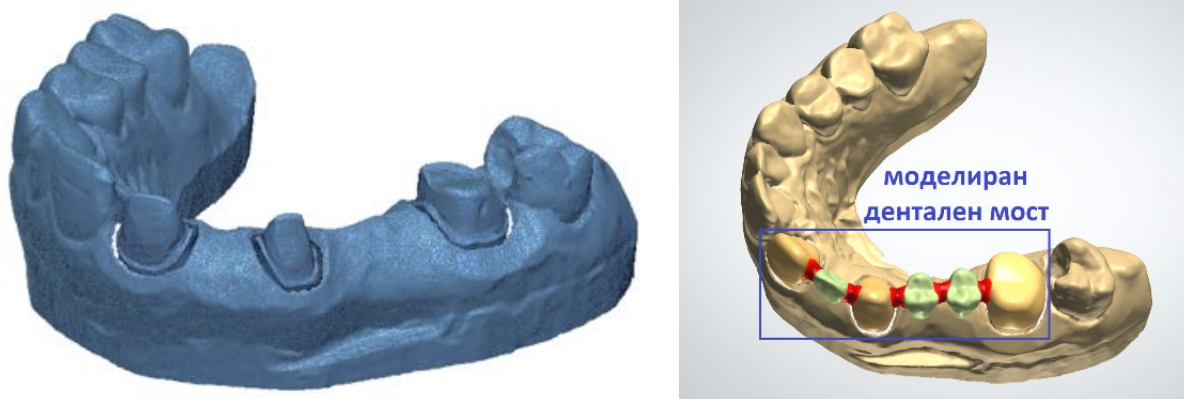
3.1.1 Реверзибилно инженерство на дентален дел

Избраниот модел за ова истражување, е дентален мост кој има три носачи на долната вилица. Постапката започнува со создавање на негатив отпечаток, на денталниот модел од дентален силикон, а потоа денталниот модел (позитив), ќе биде изработен од гипс (Слика 3.1). Трите носачи (Слика 3.1) каде што ќе биде поставен денталниот мост се моделирани со дентална смола mega DUR Kalpolymerisat (Megadental GmbH, Германија) рачно, врз основа на 20 годишно професионално искуство на техничарот. Носачите се поставени во денталниот модел и ваквиот склоп е поставен во комората на 3D скенерот 3Shape D900 (3Shape, Данска) заради скенирање. Како што е познато, забот е физички објект со комплексна форма и невозможно е да се добијат податоци без користење на професионална опрема (Ghafoor 2018). Избраниот скенер 3Shape D900 (Слика 2.5 лево, Точка 2.2.1) работи со посредство на конфокална микроскопија, со брзо време на скенирање, при што изворот на светлина обезбедува начин на осветлување со осцилации на светлината врз објектот, и со точност во опсегот од 7-8 микрони (Atia, El-Gheriani, and Ferguson 2015).



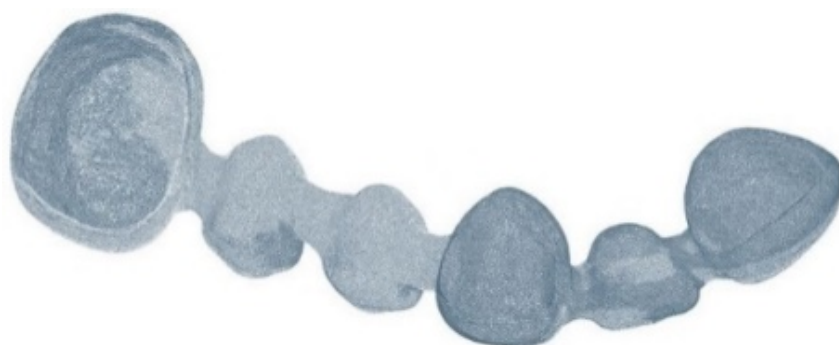
Слика 3.1: Дентален модел со носачи.

Постапката продолжува до добивање на комплетен скениран модел (дентален мост со носачи) како што е прикажано на Слика 3.2 лево. Софтверот 3Shape (3Shape, Данска) е користен за процесот на РИ, и исто така овозможува добивање на надворешниот облик на трите носачи, односно трансформација на овој надворешен облик на носачите во внатрешен облик на денталниот мост со дополнителна толеранција на зјајот (0.05 mm). Моделираниот дентален мост е дел од ова истражување, и е прикажан на Слика 3.2 десно.



Слика 3.2: (лево) Скенирано (дентален модел со носачи); (десно) дентален мост.

Откако ќе се направат чекорите кои се бараат од страна на 3Share софтверот, денталниот мост минал низ процесот на РИ, генериран е САД моделот, и одвоен е како посебен дел (Слика 3.3). Добиениот модел (дентален мост) е зачуван во дигитален STL формат (составен од 41698 точки и 83392 површини, без грешки во моделот).

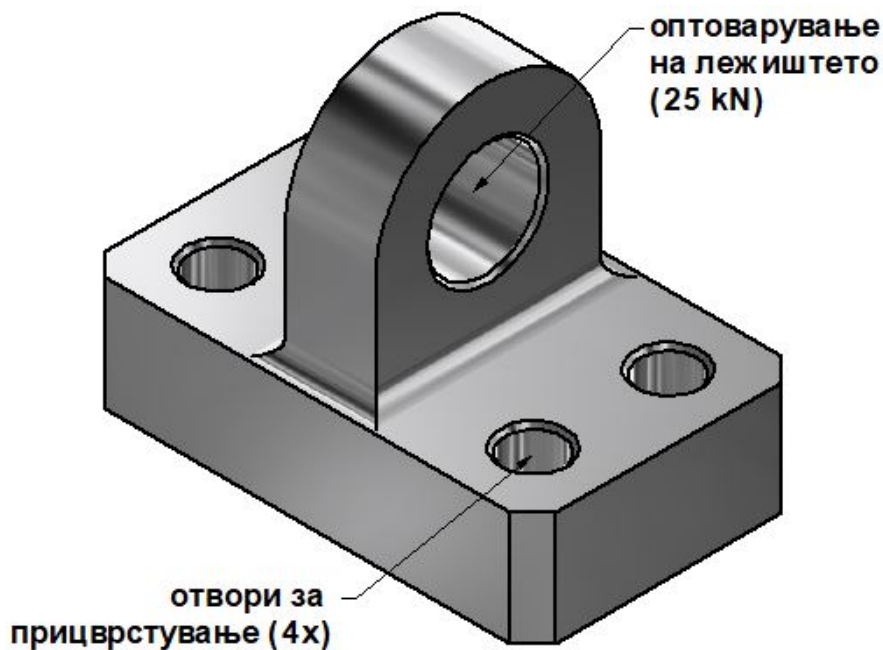


Слика 3.3: Графички приказ на STL формат на дентален мост.

Следниот и краен чекор е подготовката за производство, каде истата STL датотека (дентален мост) се обработува во 3Share CAMbridge софтверот (3Share, Данска) и се подготвува за адитивно производство, вклучувајќи ја насоката на изработка и создавањето на поддржувачите. Избрани се две технологии на производство, Л-ФСП и фотополимеризација (ФП) (Vat Photopolymerization). Истата STL датотека на денталниот мост кој е генериран во процесот на РИ, се користи за производството кај двете технологии. Исто така, овој STL модел ќе се користи за испитување на точноста со користење на 3D скенер. Деталната постапка е објаснета во Точката 4.1.2. Користењето на истиот модел за производство и проверка, ја прикажува флексибилноста и интегрираноста на РИ и АП во проектирањето и производството на сложени делови. Мерењето со користење на 3D скенер и процесот на РИ се направени во денталната лабораторија Alp Dental (Косово).

3.1.2 Проектирање и анализа со методата на конечни елементи (FEA) на индустрискиот дел

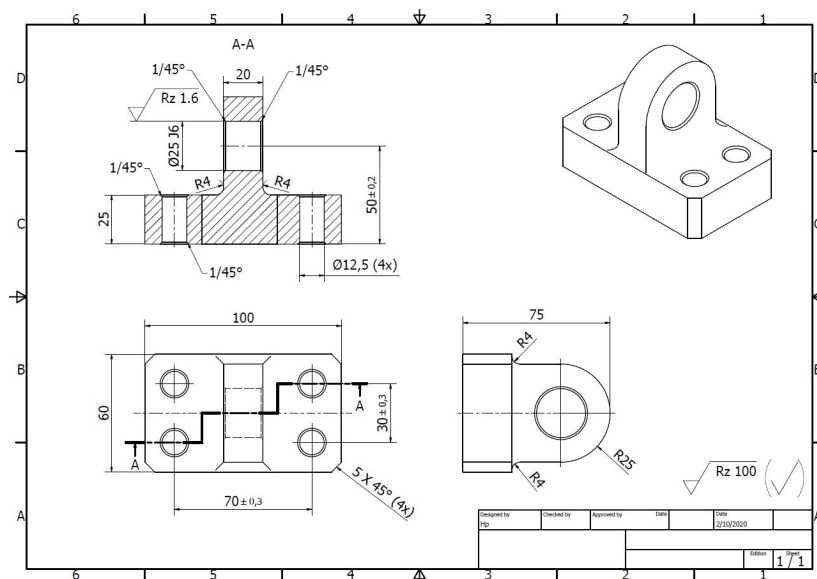
Делот кој е избран како предмет на ова истражување, е држач на ракавец на лежиште. Максималните димензии се: широчина 60 mm, должина 100 mm, и височина 75 mm, додека вкупната маса е 0.463 kg. Овој дел се прицврстува со завртки преку четири отвори на основата и се оптоварува со 25 kN оптоварување на лежиштето во отворот во горниот дел. 3D моделот е креиран со користење на софтверот Inventor (Autodesk, Inc., САД), и прикажан е на Сликата 3.4.



Слика 3.4: Оригиналниот дизајн на држачот на ракавец.

Со оглед на фактот дека овој дел ќе биде предмет на производство и со класична технологија, односно со помош на нумерички управувана (CNC) глодалка со 3 оски, потребен е исто така и технички цртеж, со цел да се следат бараните толеранции, квалитет на површините и другите барани податоци. Техничкиот цртеж е прикажан на Сликата 3.5.

Од техничкиот цртеж прикажан на Сликата 3.5, може да се види дека се дадени толеранциите за растојанијата помеѓу центрите на отворите за прицврстување на делот на основата, за растојанието од основата до центарот на отворот каде е оптоварувањето од лежиштето, како и за отворот каде е лоцирано оптоварувањето од лежиштето. Исто така, прикажан е и квалитетот на површините на целиот модел, што укажува на фактот дека сите површини мора да бидат обработени.



Слика 3.5: Технички цртеж за оригиналниот дизајн.

Во класичното производство (CNC обработка) како почетен материјал, односно материјал за работното парче е избрана алуминиумска легура 6082, додека за процесот на АП е избран AlSi10Mg. Овие два материјали имаат приближно слични механички карактеристики, кои се прикажани во Табелата 3.1. Анализата со користење на методата на конечни елементи, за сите примери се базира на карактеристиките на материјалот алуминиумска легура 6802. Споредбата со карактеристиките на материјалот AlSi10Mg ќе се користи како реална валидација за избор на конечниот модел.

Табела 3.1: Механички карактеристики на AlSi10Mg и алуминиумска легура 6082.

Карактеристика	Насока	AlSi10Mg*	Алуминиумска легура 6082**
Густина (g/cm ³)		2.68	2.77
Затегнувачка јакост (MPa)	(XY)	442 ± 6	310
	(Z)	417 ± 27	
Граница на течење (MPa)	(XY)	264 ± 2	280
	(Z)	206 ± 6	
Модул на еластичност (GPa)	(XY)	71 ± 5	71
	(Z)	68 ± 2	

* Renishaw material datasheet (по изработка).

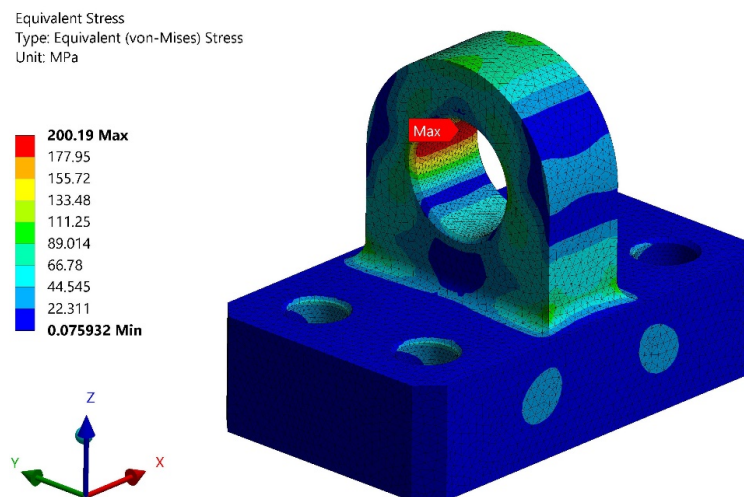
** ANSYS material datasheet.

Сосема е јасно дека избраниот дел прикажан на Сликата 3.5, кој е предмет на ова истражување, може многу едноставно и без никаков проблем да се произведе со некоја

од добро познатите и високо развиени класични технологии, како на пример CNC, но овде е претставен поинаков пристап во производството. Станува збор за примена на АП, со цел да се намали вкупната маса и да се задржи крутоста и точноста. Доколку проблемот се анализира првенствено од индустриски аспект, тогаш предложеното решение мора да обезбеди компромис помеѓу времето и трошокот за проектирање и производство, со истовремено обезбедување на функционалноста и квалитет. Во конкретниот случај, доколку се одлучиме за стратегијата на проектирање базирана на функционалноста, како една од двете стратегии кои може да се користат за АП, презентирани од Klahn, Leutenecker, and Meboldt (2015), која се базира на промени во геометријата во разгледуваниот производ. Со оваа стратегија не се предвидува истото репроектирање кое било користено во АП, да се користи и во класичното производство. Имено, во ова истражување се оди чекор понатаму, односно ќе се користи ПАП и ќе се направи споредба помеѓу примената на АП и класичниот пристап со користење на CNC машини. Според Chu, Graf, and Rosen (2008), ПАП е синтеза на многу фактори со цел постигнување на проектирање со високи перформанси, со исполнување на целите поврзани со животниот циклус на производот. Дотолку повеќе, во почетната фаза од ПАП, проектирањето може да се менува заради определени барања, со слободен избор во активностите, што е познато како “концептна фаза“. Но, понатаму, со дефинирањето на производните услови, оваа слобода започнува постепено да се намалува, што е познато како “детална фаза“. Два од реалните проблеми кои се јавуваат за време на процесот на АП, односно ориентацијата и поставувањето на подржувачите на предметот во време на печатењето, ја намалуваат слободата во проектирањето за АП како финален концепт пред да се започне со производството на избраниот дел. Нивното влијание е многу важно за ефикасно производство со истовремено задржување на точноста и другите карактеристики на делот.

Со оглед дека оригиналниот дизајн (ОД) на држачот за ракавец ќе биде репроектиран со примена на ОТ и РИ, се препорачува примена на анализата со FEA. Со помош на FEA се направени статички и модални анализи на ОД. Избраниот модел е изработен од алуминиумска легура 6082 чии карактеристики се дадени во Табелата 3.1. Како елементи на мрежата на конечни елементи избрани се тетраедри со исти димензии. Димензиите на контурата на елементите од мрежата се 2 mm, додека за областа на отворите за прицврстување и отворот за оптоварување од лежиштето е определена димензија од 1 mm. На тој начин, определени се вкупно 347610 јазли и 241741 елементи

за избраната геометрија. Делот е прицврстен преку четири отвори во основата, додека оптоварувањето од лежиштето во вредност од 25 kN е лоцирано во горниот отвор во насоката +Z. Резултатите од спроведената FEA се презентирани преку вредностите за еквивалентните (von-Mises) напрегања (Слика 3.6), деформацијата во Z насоката и степенот на сигурност.



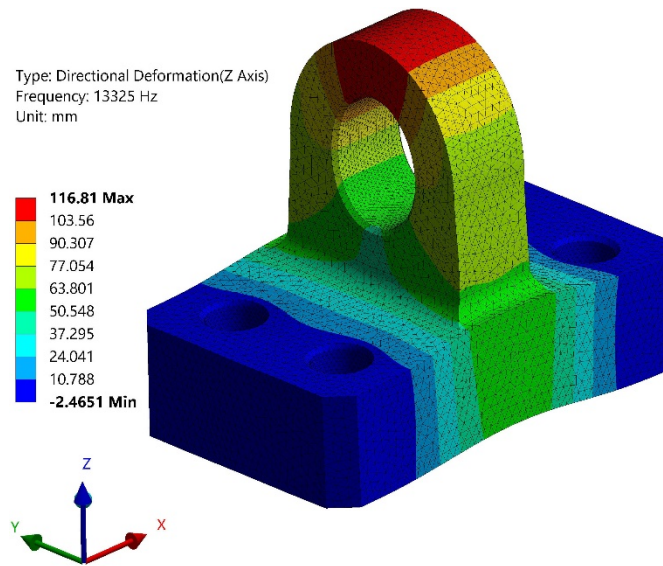
Слика 3.6: Статичка анализа на ОД.

Од Сликата 3.6 може да се заклучи дека вредноста за еквивалентните (von-Mises) максимални напрегања се 200.19 МПа, што согласно вредностите на тој материјал дадени во Табелата 3.1, се под максималната вредност за границата на течењето. Понатаму, вредноста за деформацијата во насока на Z оската е 0.077 mm а степенот на сигурност е 1.39. Покрај статичката анализа и резултатите кои се добиени, направена е и модална анализа, која дава резултати врз основа на сопствените фреквенции на различните облици на осцилирање. Резултатите се презентирани во Табела 3.2.

Табела 3.2: Модална анализа за ОД.

Облик на осцилирање	Сопствена фреквенција (Hz)
1	5695.3
2	6881.4
3	11542
4	13325
5	19073
6	20043

Од Табелата 3.2, може да се видат природните фреквенции за првите шест облици на осцилирање. За конкретната анализа, ја избираме деформацијата во насока на Z оска (Слика 3.7), бидејќи истата е предмет и на статичката анализа.



Слика 3.7: Модална анализа за ОД - 4ти облик на осцилирање.

3.2 Оптимирање на дизајнот за АП

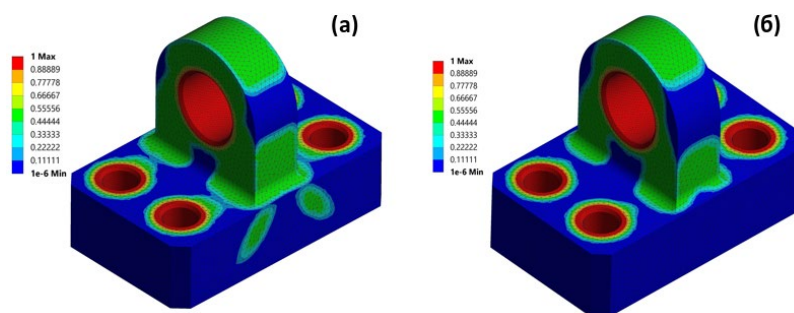
Оптимирањето на дизајнот кој се препорачува за АП, е неопходност во околности кога техничките и економските аспекти се важни фактори. Денес, некои методи за ОТ се широко користени како потенцијални алатки за репроектирање на постоечката геометрија, бидејќи во многу случаи, како цел, се намалува масата на делот. Во времето кога технологиите на АП не беа добро развиени, оптимирањето на топологијата не било многу застапено, што се должи на ограничувањата кои постојат кај класичните процеси на производство. ОТ, главно генерира органски и комплексни карактеристики преку отстранување на вишокот материјал врз основа на граничните услови и оптоварувањата кои се припишуваат на фазата на оригиналниот дизајн. Потоа, овој процес се финализира во еден од CAD софтверите, кога моделот добиен со ОТ преку РИ, се финализира за понатамошните чекори. Конечно, дизајнот кој е добиен со ОТ и РИ, се валидира преку користењето на анализата со конечни елементи. На тој начин се врши верификација дали новиот дизајн ги задоволува истите барања како и оригиналниот дизајн, или пак дали новиот дизајн е во зададените толерантни граници.

Со оглед дека ОТ е широко користена методологија за различни случаи, постојат специфични методи кои се покажале како поефикасни во одредени ситуации. Две најважни методи кои се користат во ОТ се: оптимирање на топологијата базирана на густината, оптимирање на топологијата базирано на поставувањето на слоевите (ОТ-

БПС). Овие две методи имаат свои предности и недостатоци, но во нашиов случај избран е методот ОТ-БПС, како најсоодветен метод за избраниот индустриски дел кој е предмет на истражувањето. Овој метод директно се занимава со ограничувањата во геометријата за време на процесот на оптимирање. Со користење на овој метод може да се пресмета оптималната област, запазувајќи го избраниот регион каде треба да бидат носачите или оптоварувањата. Исто како и методот базиран на густината, овој метод овозможува анализите да бидат изведени преку статичка и модална анализа. Кај овој метод многу е важен изборот на мрежата на конечни елементи. Овој метод функционира само со 3D елементи со униформни (хомогени) димензии на елементите, бидејќи по процесот на ОТ, геометријата на моделот треба да биде иста во сите правци. Дотолку повеќе, како што е познато од ПАП, особено е важна можноста правилно за избор и контрола врз правецот на градење и аголот на потпирање (overhang angle), кои влијаат на финалната геометрија на моделот. Ова може да биде направено со користење на ОТ-БПС и со избор на специфични ограничувања за АП. Во ова истражување, користен е софтверот ANSYS (Ansys, Inc., САД) за сите случаи на ОТ, и за валидацијата со помош на FEA.

3.2.1 Оптимирање на топологијата и валидација со FEA (пример 1)

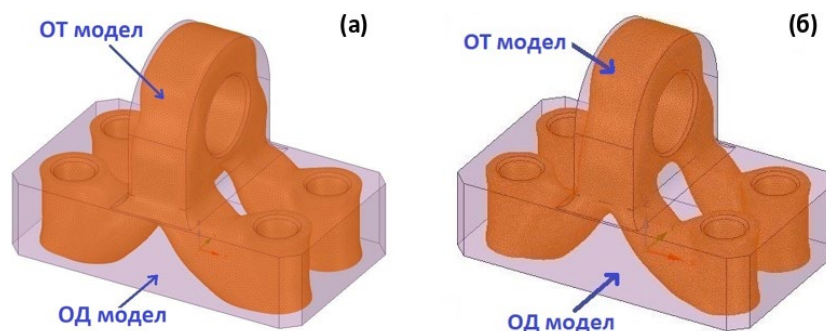
Конструктивните простори за ОД, со примена на методата на конструктивен простор ОТ-БПС за намалување на масата НМ (ROM - Reduction of Mass) за 48% и 58% се прикажани на Слика 3.8.



Слика 3.8: Проектен простор за ОД: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.

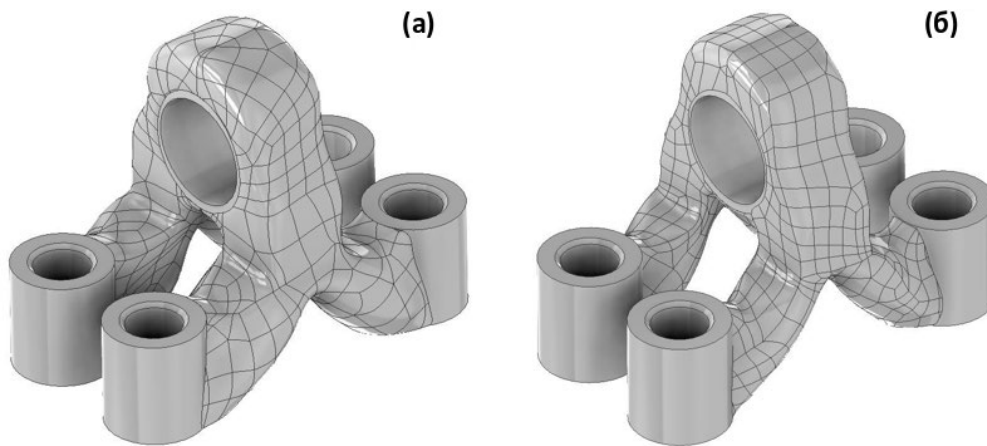
Во оваа геометрија добиена од ОД, фиксните потпори и оптоварувањето на лежиштето се прикажани како гранични услови во рамките на регионот на оптимирање. Како во случајот на ОД, користен е методот на тетраедри со хомогени димензии на елементите. Користени се димензи од 2 mm за контурата и димензии на елементите од 1 mm за специфичните области (фиксните потпори и оптоварувањето од лежиштето).

Максималната област заштитена од отстранување на материјал, каде што се лоцирани фиксните потпори и лежиштето, е зададена автоматски од страна на софтверот. Визуелно тоа е прикажано на Слика 3.8, каде што со црвена боја се претставени областите кои треба да бидат заштитени од можно отстранување на материјал. Во областа обоена со зелено, отстранувањето на вишокот материјал е овозможено во некои случаи, додека за сините области неопходно е отстранување на материјал за дадената геометрија. За двата оптимирани модели (48% НМ и 58% НМ), зададено е рангирање на целите и ограничувањата во процесот на ОТ. Главната цел е минимизирање на усогласеноста базирана на резултатите од статичката анализа, што значи дека крутоста на новиот модел треба да биде поголема или еднаква на ОД. Соодветното ограничување е во намалувањето на маса на ОД, која во овој случај изнесува 48% односно 58%. Постои и дополнително ограничување, а тоа е ограничувањето на потпирањето во АП. За двата модели избрана е +Z оската како насока на изработка, и 45° за аголот на потпирање, имајќи во предвид дека е важно колку што е можно да се намали примената на подржувачите во процесот на АП. По процесот на ОТ, се генерираат моделите (Слика 3.9).



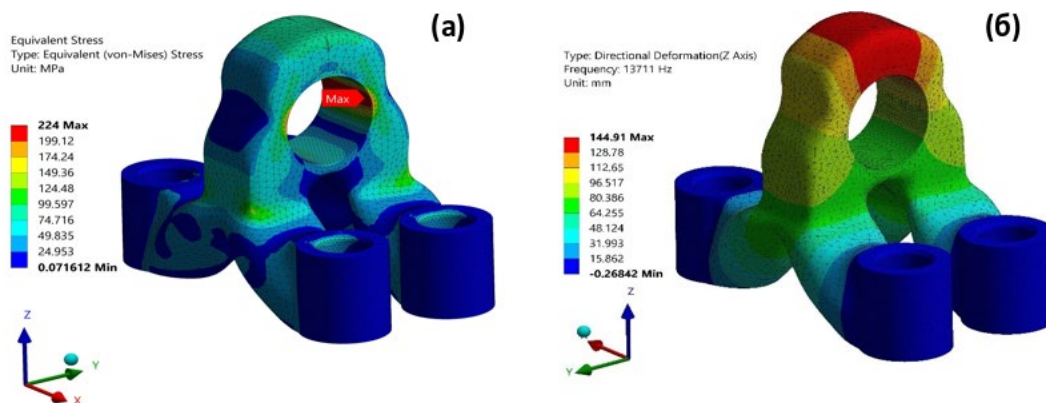
Слика 3.9: STL модел од ОТ процесот: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.

Сликата 3.9 ги покажува ОТ моделите и ОД моделот. Разликата помеѓу нив може визуелно да се забележи. По завршувањето на ОТ процесот, STL моделите се груби и неправилни во различни делови на геометријата. Затоа, по завршувањето на ОТ процесот, истите геометрии се трансферирани во процесот на РИ со софтверот SpaceClaim (Ansys, Inc., САД). По направените корекции, добиени се конечните STL модели. Последниот чекор е создавањето на CAD моделот, со користење Geomagic Design X (3D Systems, Inc., САД) и Inventor (Autodesk, Inc., САД) софтверот. Овие модели, кои се прикажани на Слика 3.10 се со конечните геометрии кои произлегуваат од ОТ-РИ процесот.



Слика 3.10: Конечни CAD модели: (а) 48% НМ; (б) 58% НМ.

За секој од моделите добиени со ОТ-РИ процесот, мора да биде направена валидација со примена на FEA, со цел да се осигура дека и покрај промените во геометријата како резултат на промените во вкупната маса, клучните карактеристики како функционалноста и крутоста ќе се задржат на бараното ниво. Во овој случај, валидацијата на статиката е направена за секој модел одделно. За првиот модел, со 48% НМ, се следи истата процедура како и за валидацијата на ОД, со цел да се обезбеди што е можно поточна споредба помеѓу нив. Разликите се лоцирани во масата која е 0.239 kg, бројот на јазли 228474 и бројот на елементи 152452, што е очекувано поради промените во геометријата. Резултатите од FEA се прикажани преку еквивалентните (von-Mises) напрегања (Слика 3.11а), деформација во правец на Z и степенот на сигурност.



Слика 3.11: 48% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.

Од Сликата 3.11а може да се заклучи дека еквивалентните (von-Mises) напрегања е 224 МПа, што укажува на повисока вредност од ОД, но според Табелата 3.1, е под максималната вредност на границата на течење. Исто така, и вредноста на деформацијата во насока на Z оската е повисока од онаа за ОД, односно изнесува 0.092

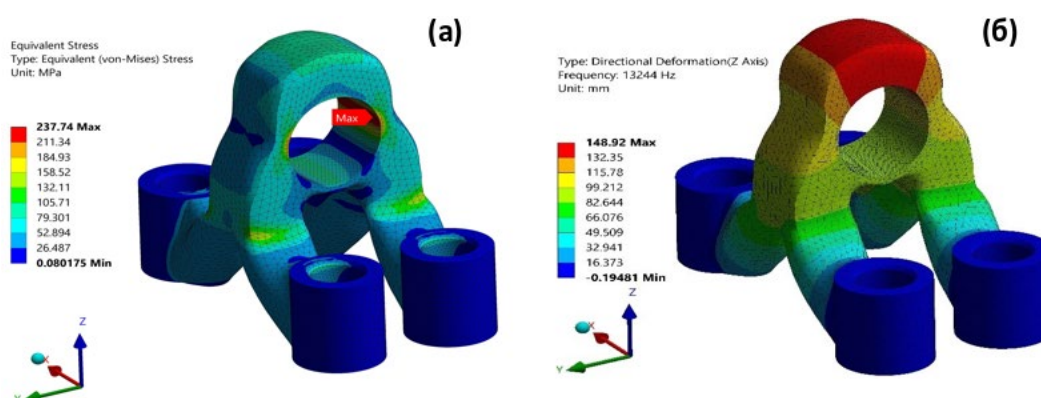
mm, додека степенот на сигурност е 1.25. Ова потврдува дека моделот е во рамките на дозволените вредности. Како дополнување на статичката анализа, направена е и модална анализа како и во случајот на оригиналниот дизајн, која дава резултати за првите шест природни фреквенции на различните облици на осцилирање. Резултатите се прикажани во Табела 3.3.

Табела 3.3: Модална анализа за 48% НМ.

Облик на осцилирање	Сопствена фреквенција (Hz)
1	5122
2	5722.9
3	11304
4	13711
5	14869
6	19414

Од Табелата 3.3 може да се видат природните фреквенции за првите шест облици на осцилирање на моделот од 48% НМ. За конкретната анализа, како и во случајот на ОД, се избира деформацијата во насока на Z оската (Слика 3.11б) за која е направена и статичка анализа.

И кај вториот модел со 58% НМ следена е истата процедура како кај валидацијата на ОД, со цел да се овозможи што е можно поточна споредба помеѓу нив. Разликите се забележани кај масата која е 0.195 kg, бројот на јазли 356223 и бројот на елементи 246788, што исто така е очекувано со оглед на промените во геометријата. Резултатите од ФЕА се презентирани преку еквивалентните (von-Mises) напрегања (Слика 3.12a), деформацијата во правец Z и степенот на сигурност.



Слика 3.12: 58% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.

Од Сликата 3.12а може да се заклучи дека еквивалентните (von-Mises) напрегања се 237.74 МРа, што укажува дека оваа вредност е повисока од вредноста кај ОД, но според Табелата 3.1 е под максималната вредност на границата на течење. Исто така и деформацијата во насока на Z оската, која изнесува 0.10 mm, е повисока од онаа кај ОД, додека степенот на сигурност е 1.17, со што се потврдува дека е во рамките на дозволената вредност. Како дополнување на статичката анализа, како и во претходниот случај, направена е и модална анализа, Резултатите се прикажани во Табела 3.4.

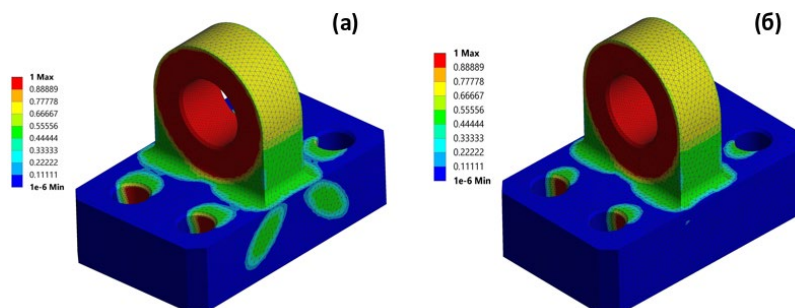
Табела 3.4: Модална анализа за 58% НМ.

Облик на осцилирање	Сопствена фреквенција (Hz)
1	4657.8
2	4697.1
3	10852
4	13244
5	13791
6	18495

Од Табелата 3.4 може да се видат природните фреквенции за првите шест облици на осцилирање на моделот 58% НМ. Како и во претходниот случај, за анализа е избрана деформацијата во насока на Z оска (Слика 3.12б).

3.2.2 Оптимирање на топологијата и валидација со ФЕА (пример 2)

Кај овој пример, применета е истата постапка како и кај пример 1, со користење на ОТ-БПС за НМ. Единствената разлика е во НМ кое е 40% и 50%, и во конструктивниот простор на ОД (Слика 3.13).

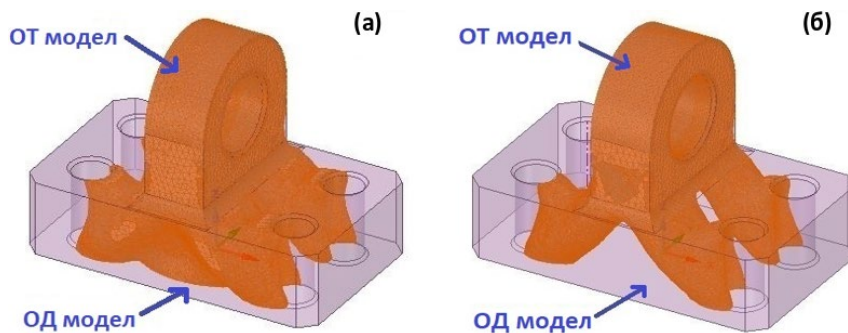


Слика 3.13: Проектен простор за ОД: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.

Максималната област заштитена од отстранување на материјал, каде што е лоцирано лежиштето, е зададена рачно. Ова е различно од примерот 1, каде заштитата е

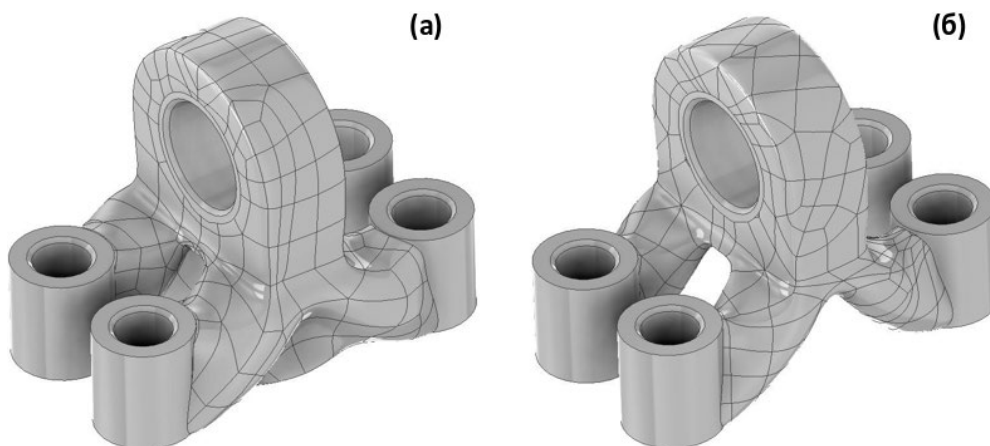
зададена автоматски од страна на софтверот. Визуелно ова е прикажано на Слика 3.13, каде што црвената боја ја представува областа која треба да биде заштитена од можно отстранување на вишок материјал, во областите обоени со зелено и жолто отстранувањето на вишокот материјал е дискутабилно, додека за сино обоените области се препорачува отстранување на вишокот материјал з ададената геометрија.

За двата оптимирани модели со соодветно намалување на масата (40% НМ и 50% НМ), зададено е рангирање на целите и ограничувањата, како во примерот 1. По процесот на ОТ, генерирани се соодветните модели (Слика 3.14).



Слика 3.14: STL модел од ОТ процес: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.

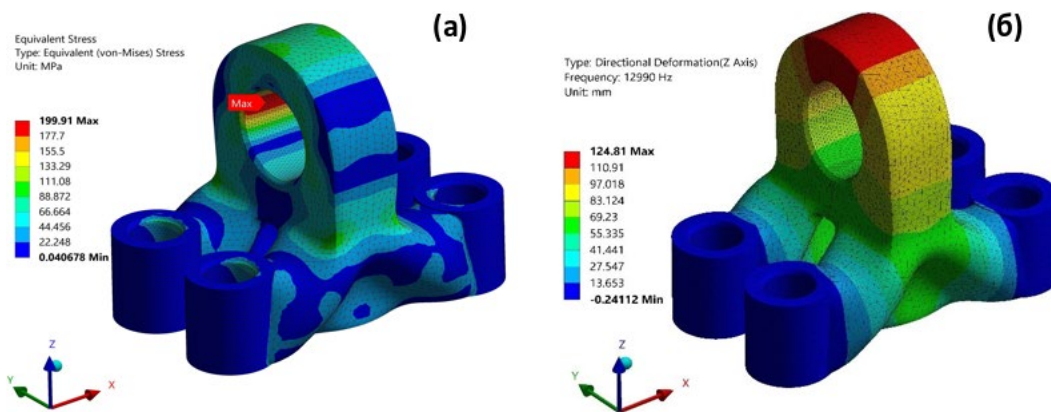
Сликата 3.14 ги покажува ОТ моделите и ОД моделот. Разликата помеѓу нив може да се забележи визуелно. Согласно постапката презентирана во пример 1, преземени се потребните чекори за создавање на конечниот CAD модел. Моделите прикажани на Сликата 3.15, се конечните геометрии добнени со процесот ОТ-РИ.



Слика 3.15: Конечни CAD модели: (а) 40% НМ; (б) 50% НМ.

Идентично како и кај валидацијата со FEA за примерот 1, направена е истата процедура и за овој пример. За секој од моделите добиени со процесот ОТ-РИ, мора да

биде направена валидација со примена на FEA, со цел да се осигура дека и покрај промените во геометријата, клучните карактеристики како што се функционалноста и крутоста ќе бидат задржани на приближно исто ниво. Во овој случај, за секој модел одделно е направена статичка валидација. За првиот модел со НМ од 40%, следена е истата процедура како за ОД валидацијата, со цел да се обезбеди колку е можно поточна споредба помеѓу нив. Разликите се во масата која е 0.276 kg, бројот на јазли 245171 и бројот на елементи 164842, што е очекувано со оглед на промената во геометријата. Резултатите од FEA се прикажани преку еквивалентните (von-Mises) напрегања (Слика 3.16а), деформацијата во правецот Z и степенот на сигурност.



Слика 3.16: 40% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.

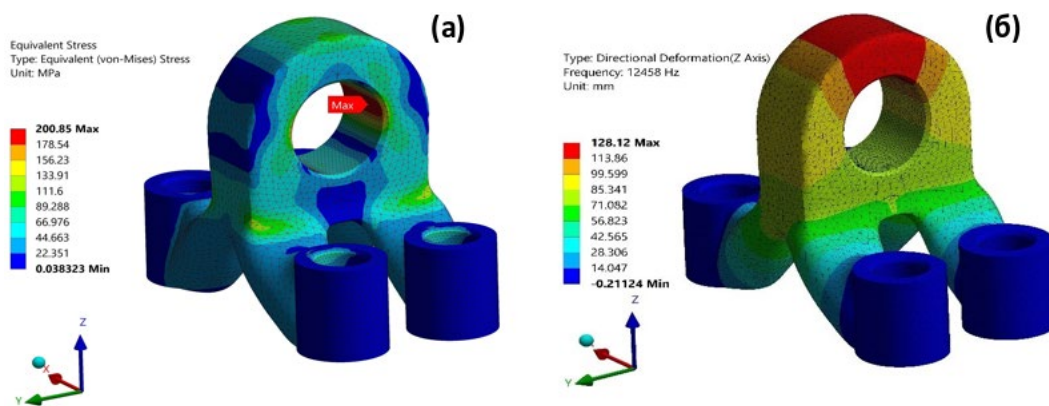
Од Сликата 3.16а, може да се заклучи дека еквивалентните (von-Mises) напрегања се 199.91 МПа, што укажува дека оваа вредност е пониска од вредноста на ОД, и се наоѓа под максималната вредност за границата на течење за материјалот AlSi10Mg во насока на Z оска (Табела 3.1). Вредноста на деформацијата во насока на Z оска е 0.082 mm, и истата е повисока отколку кај ОД. Степенот на сигурност е 1.40, што е во рамките на дозволената вредност иако е повисока отколку кај ОД. Освен статичката анализа, направена е и модална анализа, како во примерот 1. Резултатите се прикажани во Табелата 3.5.

Табела 3.5: Модална анализа за 40% НМ.

Облик на осцилирање	Сопствена фреквенција (Hz)
1	5228
2	5932.3
3	10975
4	12990
5	14576
6	19245

Од Табелата 3.5 може да се видат природните фреквенции за првите шест облици на осцилирање на моделот со 40% НМ. Како и во пример 1, за анализа се избира деформацијата во насока на Z оска (Слика 3.16б).

За вториот модел со НМ од 50%, следена е истата процедура како кај валидацијата на ОД, со цел да се овозможи точна споредба помеѓу нив. Разликите се изразени во масата која е 0.234 kg, бројот на јазли 222747, и бројот на елементи 148672, што е очекувано со оглед на промената во геометријата. Резултатите од FEA се прикажани преку еквивалентните (von-Mises) напрегања (Слика 3.17а), деформација во Z насоката и степенот на сигурност.



Слика 3.17: 50% НМ: (а) статичка анализа; (б) модална анализа.

Од Сликата 3.17а, може да се заклучи дека еквивалентните (von-Mises) напрегања се 200.85 МПа, што покажува дека оваа вредност е незначително повисока од вредноста на ОД, но согласно Табелата 3.1 е под максимално допуштената граница на течење, за материјалот AlSi10Mg во насока на Z оска. Вредноста на деформацијата за Z оската е 0.088 mm, што е повисока вредност отколку кај ОД, додека степенот на сигурност е 1.39, што потврдува дека е во дозволените граници и е ист како случајот ОД. Освен статичката анализа, направена е и модална анализа, исто како и во претходниот случај. Резултатите се прикажани во Табелата 3.6.

Табела 3.6: Модална анализа за 50% НМ.

Облик на осцилирање	Сопствена фреквенција (Hz)
1	4675.9
2	5351.9
3	10618
4	12458
5	14580
6	18578

Од Табелата 3.6, може да се видат природните фреквенции за првите шест облици на осцилирање на моделот со НМ од 50%. Како и во претходниот случај, за анализа е избрана деформацијата во насока на Z оската (Слика 3.176).

3.2.3 Избор на модел на индустриски дизајн за производство со АП и CNC

Од примерите презентирани во ова истражување, добиени се четири различни модели. Во првиот пример, добиени се два модели од ОД преку процесот на ОТ и РИ. Првиот модел ја намалува масата на ОД за 48%, додека вториот модел ја намалува масата на ОД за 58%. Кај двата модели, користен е методот ОТ-БПС, а заштитените области се зададени автоматски. Кај вториот пример, исто така се добиени два модели од ОД преку процесите на ОТ и РИ. Масата на ОД е намалена на 40% односно 50%, соодветно. Кај овие два модели користен е ОТ-БПС методот, додека заштитените области се зададени рачно. Областа каде што е идентификувано максималното оптоварување е заштитена со препорака за вградување максимум материјал, а отстранувањето на материјалот да се врши во областите каде нема концентрација на напрегања. Во Табела 3.7 прикажани се резултатите и сите податоци собрани за секој модел одделно.

Табела 3.7: Збирни резултати за различните модели на индустрискиот дел.

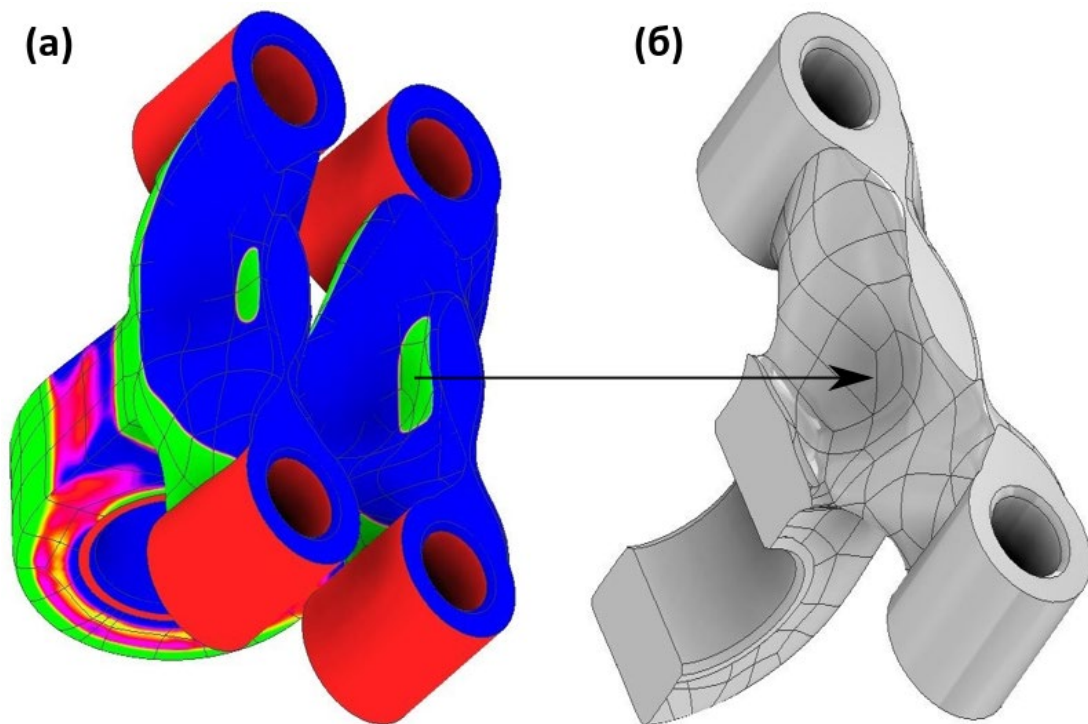
Дизајн	Маса (kg)	Еквивалентни (von-Mises) напрегања (MPa)	Деформација по Z насока (mm)	Степен на сигурност	Однос на ефективната маса кон вкупната маса (Z насока)
ОД	0.463	200.19	0.077	1.39	0.557
48% НМ	0.239	224	0.092	1.25	0.560
58% НМ	0.195	237.74	0.10	1.17	0.529
40% НМ	0.276	199.91	0.082	1.40	0.625
50% НМ	0.234	200.85	0.088	1.39	0.593

Од Табелата 3.7 може да се заклучи дека ако се прави класификација според масата, тогаш моделот со НМ од 58% е најсоодветен во однос на останатите. Ако се врши класификација според еквивалентните (von-Mises) напрегања, тогаш моделот со НМ од 40% е со најмали напрегања во однос на останатите, но и во однос на ОД како референтен модел. Доколку класификацијата е според деформацијата во Z насоката, тогаш моделот со НМ од 58% има поголема деформација од ОД, и од другите модели.

За класификацијата во однос на степенот на сигурност, јасно е дека покругот модел ќе има повисок степен на сигурност. Поради тоа, моделот со НМ од 40% има повисока вредност на степенот на сигурност во однос на ОД, но исто така и во однос на сите други модели. На крајот, ако се осврнеме на рангирањето според односот на ефективната конвкупната маса пресметан со софтверот ANSYS за модална анализа, тогаш моделот со НМ од 58% е покруг во насока на Z оската отколку другите модели (48% НМ, 40% НМ, 50% НМ). Ако се направи и споредба во однос на геометриската форма, тогаш моделот со НМ од 40% е најсоодветниот за процесот на АП, бидејќи утврдено е дека бара помалку потпорни конструкции отколку другите модели. Од Табелата 3.7 и опишаната анализа, може да се заклучи дека моделот со НМ од 40% е посоодветен и пофункционален за производство со АП во споредба со другите модели, и затоа тој е препорачаниот дизајн кој ќе го замени оригиналниот дизајн при користење на технологијата на АП.

Во врска со ова истражување, една работа сепак останува недефинирана, а поврзана е со можноста за производство на истиот репроектиран дел со CNC обработка. ОТ процесот не ги зема во предвид ограничувањата поврзани со класичното производство. За да се провери дали дадената геометрија може да се произведе со CNC машина со 3 оски, прво треба да се направи анализа на промена на аглиите на цртежот на делот, која се реализира со софтверот Inventor (Autodesk, Inc., САД). Анализата на аглиите во процесот на CNC обработката покажува дали со трите линеарни оски е возможна обработка на одредена површина, или се потребни и дополнителни оски за ориентација на алатот. Оваа техника главно се користи за леење и слични технологии на обликување на делови, но исто така е соодветна и за CNC обработка, особено кога станува збор за комплексни делови со слободни површини. Овој вид на анализа се врши врз основа на опсегот на бојата, за да се идентификува областа каде што постојат отстапувања во аглиите кај одредени површини, посебно во деловите со слободно зададени површини. Затоа, насоката на векторот на аголот е поврзана со Z оската, каде е лоциран алатот за глодање. За да се примени оваа анализа, прво треба да се избере насоката на ориентација на делот, што во овој случај е +Z. Понатаму, потребно е да се дефинира аголот на векторот како вредност за проверка. Софтверот ги проверува сите површини на делот во однос на зададениот агол на векторот. Ако се погледнат прикажаните бои на сликата, позитивните агли се обоени во зелено (1 степен), бараните агли кои се во насока со +Z се обоени во црвено (0 степен) а негативните собоени во

сино (-1 степен). Другите бои кои се прикажани на моделот се спротивни на избраната ориентација, со различни агли во зависност од површината. Основната идеја е да се определи линијата помеѓу позитивните и негативните површини за време на процесот на глодање, што исто така укажува на ориентацијата на алатот. Поконкретно, за моделот со НМ од 40%, во долниот дел не постои можност за глодање на зелената област со ориентација на алатот од 90° , но тоа не значи дека другите области со зелена боја не можат да се обработуваат. Ова зависи од позицијата на таа површина во однос на геометријата на делот. Резултатите од анализата се прикажани на Слика 3.18, за модел со НМ од 40%.

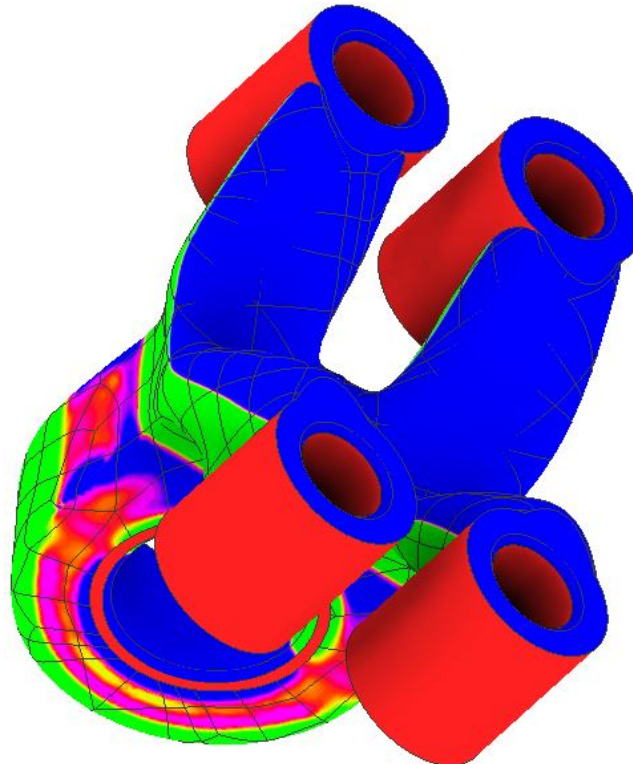


Слика 3.18: Модел со НМ од 40%: (а) анализа на аглиите; (б) означена област.

Сликата 3.18 го покажува моделот со анализа на аглиите и означената област која не може да биде обработена со CNC машина со 3 оски. Причината за неможноста за обработка, се лоцира во фактот дека областа има слободна површина, а во исто време е надвор од максимумот на аголот на операбилност на алатот (90°). Во ваков случај, може да се предложи само една алтернатива, да се репроектира додека не стане погодна за CNC обработка, со оглед дека сите други области се изводливи за производство врз основа на претходната симулација со софтверот Inventor CAM (Autodesk, Inc., САД).

Кај вториот модел (50% НМ), ситуацијата е поинаква, бидејќи не се присутни ограничувањата прикажани кај моделот со 40% НМ, поради поголемото намалување на

масата и различниот облик на долниот дел. Нацрт анализата и симулацијата за моделот со 50% НМ (Слика 3.19) е направена на истиот начин како во случајот на 40% НМ. Според оваа анализа и споредба, може да се одлучи дека геометрискиот облик од моделот со 40% НМ може да биде изработен со CNC, само доколку означените области се подобрат преку репроектирање, додека моделот со 50% НМ врз основа на својот геометриски облик е соодветен за изработка со CNC. Овој модел е предложен за производство со CNC.



Слика 3.19: Нацрт анализа за моделот со НМ од 50%.

Според тоа, имаме на располагање два модели кои се погодни за изработка со две различни технологии на производство. Моделот со НМ од 40% е соодветен само за АП, и е супериорен во однос на другите. Тој исто така е подобар во некои споредби и во однос на ОД. Моделот со НМ од 50% е соодветен за производство со АП, но исто така може да се произведе и со CNC обработка. Спореден со моделот со НМ од 40%, тој е во предност во однос на вкупната маса (10% полесен во споредба со 50% НМ), додека другите параметри се слични или со мали разлики, како што е прикажано во Тебела 3.7. Според тоа, нема да се менува дизајнот на ниту еден модел кој е добиен со процесот на ОТ-РИ, се избира моделот со НМ од 50% како модел кој е соодветен за производство со АП и CNC.

3.3 Моделирање и симулација на делови произведени со АП

Потребата од моделирање и симулација е присутна речиси во секоја област, особено во инженерството. Моделирањето и симулацијата може да варираат во однос на тоа што тие го претставуваат, во контекстот на симулацијата, големината на напорите за моделирање, како и нејзината цел односно намена. Затоа, процесите на моделирање и симулација, може да се разликуваат според нивната примена (Madachy and Houston 2017). Со одредено поедноставување, со помош на моделирањето и симулацијата можно е да се провери одреден феномен, со користење на виртуелни модели, пред да се реализираат физичките експерименти. На овој начин се намалува времето и трошокот за целиот процес. Тенденцијата за приближување до експерименталните резултати секогаш е приоритет, но постои една работа која е многу важна и заедничка, создавањето на ново знаење кое исто така ја вклучува и симулацијата (Jebeile 2017).

Во ова истражување, моделирањето и симулацијата се поделени на истражување на средно и макро ниво. Добиените резултати ќе бидат користени во експерименталното истражување. За анализата на средно ниво, анализирани се два примери. Првиот е од денталната област, со користење на материјалот CoCrMo, додека вториот пример е од областа на индустријата и го користи материјалот AlSi10Mg. И за двата примера, користени се два вида на параметарска симулација за процесот на АП. Согласно резултатите од презентираниите симулации, се определуваат оптимизираните параметри за процесот на АП и производство на готовите делови. За истражувањето се избрани параметарската симулација во еден слој и симулацијата на порозноста, при што неколку различни пермутации даваат можност за повеќе споредливи варијанти. Резултатите за карактеристиките на областа на топење и формирањето на празнини, се многу важни за микроструктурата кај АП. Процесните параметри како: моќност на ласерот, брзина на скенирање, растојание на премините и дебелина на слојот, се користат меѓу останатите како влезни параметри за процесот на АП, бидејќи тие ја определуваат волуметриската густина на енергијата (според равенката 2.5 од Точка 2.2.5), за избраните материјали. Избрани се две групи на оптимизирани параметри, за дентална и индустриска примена на АП, и се искористени за производството на физичките делови.

Моделирањето и симулацијата за макро анализата на термичкото и статичкото однесување на деловите, се потребни за индустрискиот дел поради сложеноста на геометријата и процесот на АП. Во овој случај се користат оптимизираните процесни

параметри од параметарските симулации на еден слој и на порозноста. Резултатите се поврзани со термичкиот ефект и деформацијата во геометријата на делот.

3.3.1 Симулација на слојот за CoCrMo

Симулацијата на слојот се користи за добивање информации за сетот карактеристики во врска со топењето на избраниот материјал за производство со ФСП како постапка во АП со метал. Параметарското моделирање и симулацијата се имплементирани преку ANSYS Additive (Ansys, Inc., САД). Овој вид на симулација ја следи индустриската пракса на користење на ФСП машина за тестирање на слојот кога ласерот следи одредена линија на скенирање. Целта е да се определи геометријата на подрачјето на топење (вклучувајќи широчина, должина и длабочина) за избраниот материјал (ANSYS 2020). Бидејќи истражувањето е од областа на денталната медицина, избран е материјалот CoCrMo, чии карактеристики се прикажани во Табела 3.8.

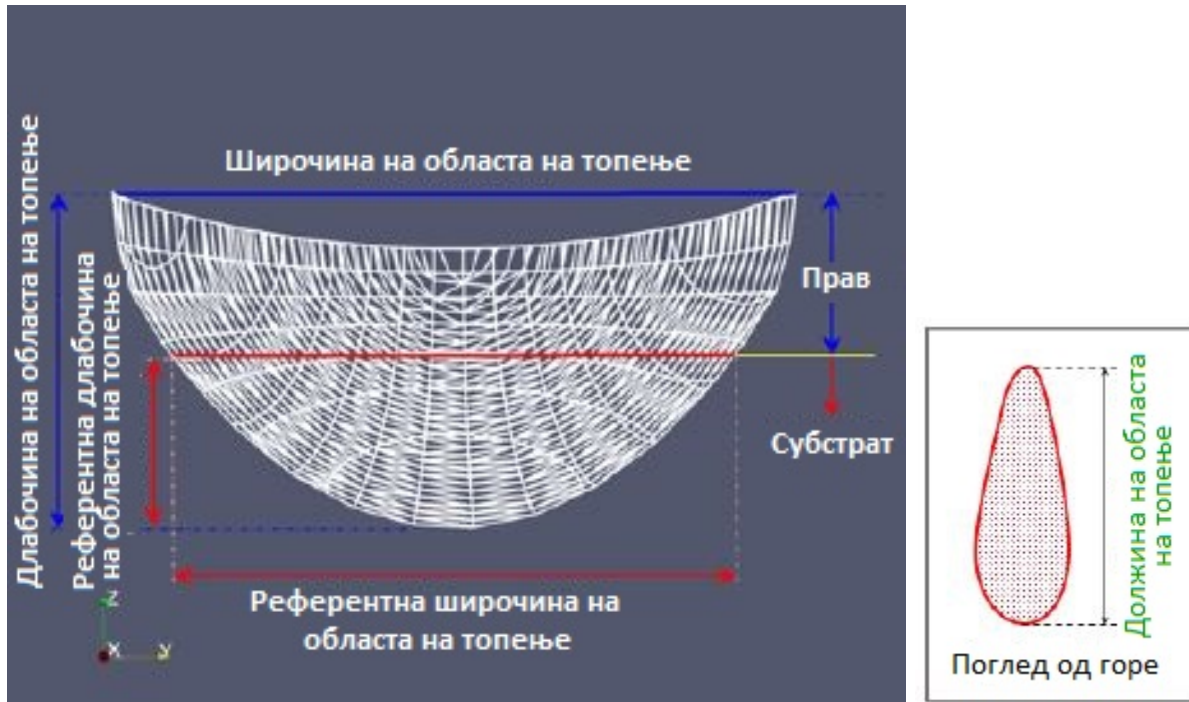
Табела 3.8: Карактеристики на материјалот CoCrMo*.

Опис	Вредност
Апсорпција на правот	0.76
Апсорпција на цврстата фаза	0.4
Коефициент на термичко ширење (K^{-1})	0.0000136
Модул на еластичност (GPa)	210
Poisson-ов коефициент	0.33
Затегачка цврстина на материјалот (MPa)	980
Фактор на калење	0.0198
Сооднос на гранично истегнување на потпорите	0.4375
Фактор за опсег на затегање	1
Коефициенти на анизотропско затегање (\parallel)	1.5
Коефициенти на анизотропско затегање (\perp)	0.5
Коефициенти на анизотропско затегање (Z)	1

* ANSYS Additive material datasheet.

За да се добијат податоците и резултатите за повеќе можни комбинации, избрани се следните параметри: моќност на ласерот 195 W, должина на слојот 3 mm, температура на основната плоча 80 °C, дијаметар на ласерскиот сноп 100 μ m како константни вредности, односно дебелина на слојот од: (0.02, 0.03, 0.04, 0.05) mm и брзина на скенирање: (500, 1000, 1500, 2000, 2500) mm/s како променливи големини. Од дадените параметри, излезниот резултат ќе биде презентираан како: референтна длабочина на

областа на топење, референтна должина на областа на топење и референтна ширина на областа на топење. Овие параметри се прикажани на Слика 3.20.



Слика 3.20: Параметри на областа на топење (преземено од ANSYS (2020)).

Врз основа на константните и варијабилните параметри, добиена е Табелата 3.9 со можните комбинации. Резултатите се поделени во три групи врз основа на дебелината на слојот (ДС) (0,02, 0.03, 0.04, 0.05) mm каде што споредбата и изборот се направени врз основа на средната референтна длабочина на областа на топење (СРДОТ), односот длабочина/ширина (ОДШ1), и односот должина/ширина (ОДШ2). Равенките за пресметка на односот длабочина/ширина, како и односот должина/ширина, се:

$$ОДШ1 = \frac{ДС + СРДОТ}{(средна референтна ширина на областа на топење)} \quad (3.1)$$

$$ОДШ2 = \frac{(средна должина на областа на топење)}{(средна референтна ширина на областа на топење)} \quad (3.2)$$

Процесните параметри за денталниот пример се препорачани од продавачот на машината и се прифатени за практична имплементација како комбинација од моќноста на ласерот 195 W, дебелината на слојот 0.03 mm и брзината на скенирање 1100 mm/s.

Табела 3.9: Резултати од симулацијата на слојот за CoCrMo.

Кандидат	Дебелина на слојот (mm)	Брзина на скенирање (mm/s)	Средна референтна длабочина на областа на топење (mm)	Однос длабочина/широчина	Однос должина/широчин
A1	0.02	500	0.087	0.637	2.542
A2	0.02	900	0.037	0.396	2.889
A3	0.02	1300	0.031	0.392	3.592
A4	0.02	1500	0.028	0.384	3.904
A5	0.02	2000	0.022	0.378	4.712
A6	0.02	2500	0.018	0.384	5.475
B1	0.03	500	0.078	0.659	2.659
B2	0.03	900	0.026	0.441	3.299
B3	0.03	1300	0.019	0.454	4.352
B4	0.03	1500	0.017	0.586	7.529
B5	0.03	2000	0.011	0.470	4.930
B6	0.03	2500	0.006	0.571	8.714
C1	0.04	500	0.069	0.699	2.853
C2	0.04	900	0.019	0.573	4.282
C3	0.04	1300	0.009	0.620	6.076
C4	0.04	1500	0.006	0.697	7.606
C5	0.04	2000	0	0.000	0.000
C6	0.04	2500	0	0.000	0.000
D1	0.05	500	0.065	0.767	3.120
D2	0.05	900	0.016	0.000	0.000
D3	0.05	1300	0	0.000	0.000
D4	0.05	1500	0	0.000	0.000
D5	0.05	2000	0	0.000	0.000
D6	0.05	2500	0	0.000	0.000

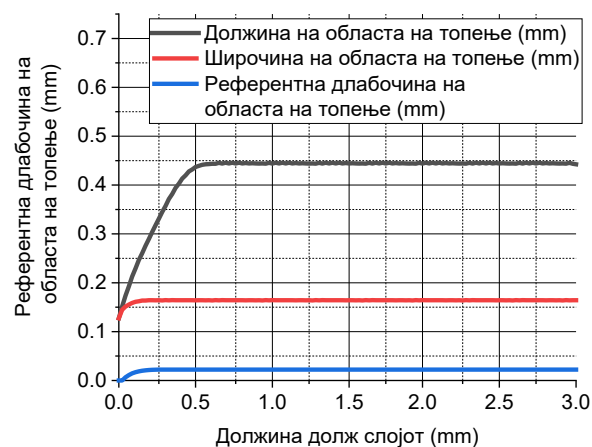
Со цел определување на оптимално решение од Табелата 3.9, некои ограничувања врз основа на претпоставки кои мора да бидат исполнети од избраните параметри, се зададени врз основа на следните критериуми:

- За множеството решенија со дебелина на слојот од 0.02 mm, областа на топење треба да биде најмалку 0.05 mm, што значи дека средната референтна длабочина на областа на топење ќе биде најмалку 0.03 mm. За множеството решенија со дебелина на слојот од 0.03 mm, областа на топење треба да биде најмалку 0.075 mm, што значи дека средната референтна длабочина на областа на топење ќе биде најмалку 0.045 mm. За множеството резултати со дебелина на слојот од 0.04 mm, областа на топење ќе биде најмалку 0.1 mm,

што значи дека средната референтна длабочина на областа на топење ќе биде најмалку 0.06 mm. За множеството резултати со дебелина на слојот од 0.05 mm, областа на топење треба да биде најмалку 0.125 mm, што значи дека средната референтна длабочина на областа на топење ќе биде најмалку 0.075 mm. За точките кои се надвор од означеното ограничување (A4, B2-B6, C2-C6, D1-D6), областа на топење не е доволно длабока. Тоа исто така покажува дека овие точки се лоцирани во регион каде постојат големи брзини на скенирање, што влијае врз недостаток на фузиона порозност помеѓу слоевите.

- Вредноста на односот длабочина/ широчина треба да биде под 0.95. Доколку оваа вредност се надмине, тогаш областа на топење е премногу длабока. За прифатливите кандидати, малата брзина на скенирање и големата моќност на ласерот треба да бидат добро балансирани, бидејќи во спротивно ќе се формираат ефект на клучалка.
- Односот должина/ широчина треба да биде под 4.0. Областа на топење во овие случаи (A4, B3-B6, C2-C4) е многу долга. Точките во оваа област каде што има голема брзина на скенирање и голема моќност на ласерот, се потенцијал за развивање на ефект на создавање на капки (balling).

Од Табелата 3.9, кандидатот A1 е најбавното решение, следено од A2 и A3, кандидатот C1 е најбрзото решение, а B1 се смета за оптимално решение, бидејќи ги обединува брзината на изработка и квалитетот на површината. Сликата 3.21 ги прикажува процесните параметри кога областа на топење постигнува стационарна состојба.



Слика 3.21: Областа на топење долж слојот за стандардно процесните параметри.

Сликата 3.21 покажува дека референтната длабочина на областа на топење и широчината, започнуваат да се стабилизираат и постигнуваат стационарна состојба по неколку десетини од милиметарот, додека должината на областа на топење бара поголемо растојание за стабилизација и постигнување на стационарна состојба. Приближната вредност од вкупната должина за тоа да се постигне е помеѓу 0.5 и 0.6 mm.

3.3.2 Симулација на порозноста за CoCrMo

Симулацијата на порозноста се користи за добивање на информации за стапката на порозност во материјалот избран за производство со ФСП како постапка во АП со метал. Овој вид на симулација се базира на индустриската пракса со конструирање на 3D коцки на ФСП машина, каде што се симулираат многу слоеви со користење на избраниот материјал и скениран образец. Параметарската симулација е имплементирана со софтверот ANSYS Additive (Ansys, Inc., САД). Притоа, оваа алатка помага во идентификување на најефикасните параметри, со цел елиминирање на евентуалниот недостаток на фузиона порозност. Начинот на симулацијата се базира на индустриската пракса со конструирање на 3D коцки на ФСП машина, каде што се симулираат многу слоеви со користење на избраниот материјал (Табела 3.8) и скениран образец (ANSYS 2020). Истражувањето е поврзано со симулација во еден слој, како проширена валидација на добиените процесни параметри. Од стандардни параметри, презентирани во Точка 3.3.1, не е прикажан параметарот растојание на премините. Овој параметар е релевантен за овој случај и изнесува 0.09 mm (според продавачот на машината). Оваа вредност ќе биде исклучена од можните комбинации на параметрите, исто како што тоа беше направено и со другите параметри во случајот на еден слој. За да се добијат податоци и резултати со можните комбинации, избрани се следните параметри: дебелина на слој 0.03 mm, моќност на ласерот 195 W како константни вредности, и следните брзини на скенирање: (500, 1000, 1500, 2000, 2500) mm/s како променливи вредности. Додавајќи комбинација од вредности за пет растојанија на премините: (0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14) mm, ќе се добијат 25 пермутации на порозноста.

Табелата 3.10 ги покажува константните и променливите параметри, кои се зададени со симулацијата, додека вредностите за: однос на празнини, однос на прашина и однос на цврста фаза, се добиени како резултат на симулацијата. За да се определи непостоењето на фузиона порозност, вредноста за односот на цврстата фаза треба да

биде под 1, или во идеален случај 1, покажувајќи дека структурата е во цврста состојба. Било која друга вредност укажува дека структурата содржи прашок или празнини. Прифатливите резултати се базираат на зададениот критериум, порозност помала од 0.5%.

Табела 3.10: Резултати од симулацијата на порозноста за CoCrMo.

Кандидат	Брзина ан скенирање (mm/s)	Растојание на премините (mm)	Однос на прашина	Однос на цврста фаза
A1	500	0.06	0	1
A2	500	0.08	0	1
A3	500	0.1	0	1
A4	500	0.12	0	1
A5	500	0.14	0	1
B1	1000	0.06	0	1
B2	1000	0.08	0	1
B3	1000	0.1	0.0001	0.9999
B4	1000	0.12	0.0003	0.9997
B5	1000	0.14	0.0119	0.9881
C1	1500	0.06	0.0001	0.9999
C2	1500	0.08	0.0003	0.9997
C3	1500	0.1	0.0011	0.9989
C4	1500	0.12	0.0225	0.9775
C5	1500	0.14	0.0521	0.9479
D1	2000	0.06	0.0007	0.9993
D2	2000	0.08	0.0032	0.9968
D3	2000	0.1	0.0358	0.9642
D4	2000	0.12	0.062	0.938
D5	2000	0.14	0.1155	0.8845
E1	2500	0.06	0.0193	0.9807
E2	2500	0.08	0.0726	0.9274
E3	2500	0.1	0.0956	0.9044
E4	2500	0.12	0.1459	0.8541
E5	2500	0.14	0.202	0.798

Од резултатите прикажани во Табела 3.10, може да се заклучи дека најбавни кандидати се A1-A5, D2 е најбрз, а кандидатите кои се надвор од зададениот критериум се B5, C4, C5, D3-D5, и E1-E5. Врз основа на резултатите за параметрите кои се добиени од параметарската симулација во еден слој (Точка 3.3.1) и симулацијата на порозноста, стандардно процесни параметри можно е да се заменат со кандидатот A5, со оглед дека D2 е надвор од зададените критериуми за симулација во еден слој.

3.3.3 Симулација на слојот за AlSi10Mg

Постапката за параметарска симулација на слојот во овој случај е иста со претходно презентираната симулација за CoCrMo. Бидејќи се работи за истражување во индустријата, избран е материјалот AlSi10Mg чии карактеристики се дадени во Табелата 3.11.

Табела 3.11: Карактеристики на материјалот AlSi10Mg*.

Опис	Вредност
Апсорпција на правот	0.76
Апсорпција на цврстата фаза	0.4
Коефициент на термичко ширење (K^{-1})	0.00002
Модул на еластичност (GPa)	68
Poisson-ов коефициент	0.33
Затегачка цврстина на материјалот (MPa)	250
Фактор на калење	0.0104
Сооднос на гранично истегнување на потпорите	0.4375
Фактор за опсег на затегање	1
Коефициенти на анизотропско затегање (\parallel)	1.5
Коефициенти на анизотропско затегање (\perp)	0.5
Коефициенти на анизотропско затегање (Z)	1

* ANSYS Additive material datasheet.

За да се добијат податоците и резултатите за повеќе можни комбинации, избрани се следните параметри: должина на слојот 3 mm, температура на основната плоча 80 °C, и дијаметар на ласерскиот сноп 100 μ m, како констрантни вредности, и моќности на ласерот: (195, 295, 395) W, дебелини на слојот: (0.03, 0.04, 0.05) mm, и брзини на скенирање: (500, 1000, 1500, 2000, 2500) mm/s како променливи големини. Врз основа на дадените параметри, излезните резултати ќе бидат презентирани преку: референтна длабочина на областа на топење, должина на областа на топење и референтна широчина на областа на топење.

Во Табелата 3.12 може да се видат можните комбинации на параметри со соодветните кандидати. Резултатите се поделени во три групи, врз основа на дебелините на слојот од (0.03, 0.04, 0.05) mm, при што е направена споредба и селекција согласно средната референтна длабочина на областа на топење, односот длабочина/широчина и односот должина/широчина. Односот длабочина/широчина и односот должина/широчина, се пресметани според равенките 3.1 и 3.2, прикажани во Точката 3.3.1.

Табела 3.12: Резултати од симулацијата на слојот за AlSi10Mg.

Кандидат	Дебелина на слојот (mm)	Моќност на ласерот (W)	Брзина на скенирање (mm/s)	Средна референтна длабочина на областа на топење (mm)	Однос длабочина/широчина	Однос должина/широчина
A1	0.03	195	500	0.036	0.455	1.241
A2	0.03	195	1500	0.019	0.495	1.859
A3	0.03	195	2000	0.015	0.542	2.337
A4	0.03	295	500	0.147	0.637	1.209
A5	0.03	295	1500	0.037	0.462	1.641
A6	0.03	295	2000	0.03	0.469	1.953
A7	0.03	395	500	0.287	0.859	1.317
A8	0.03	395	1500	0.056	0.462	1.629
A9	0.03	395	2000	0.042	0.462	1.917
B1	0.04	195	500	0.028	0.511	1.398
B2	0.04	195	1500	0.012	0.605	2.256
B3	0.04	195	2000	0.008	0.727	3.152
B4	0.04	295	1500	0.029	0.507	1.838
B5	0.04	295	2000	0.022	0.544	2.342
B6	0.04	295	500	0.139	0.642	1.233
B7	0.04	395	500	0.284	0.880	1.326
B8	0.04	395	1500	0.049	0.494	1.750
B9	0.04	395	2000	0.034	0.503	2.136
C1	0.05	195	500	0.021	0.592	1.625
C2	0.05	195	1500	0.006	0.862	3.277
C3	0.05	195	2000	0.001	2.125	9.792
C4	0.05	295	1500	0.023	0.570	2.117
C5	0.05	295	2000	0.016	0.680	3.010
C6	0.05	295	500	0.134	0.664	1.260
C7	0.05	395	500	0.284	0.915	1.334
C8	0.05	395	1500	0.045	0.543	1.891
C9	0.05	395	2000	0.027	0.558	2.457

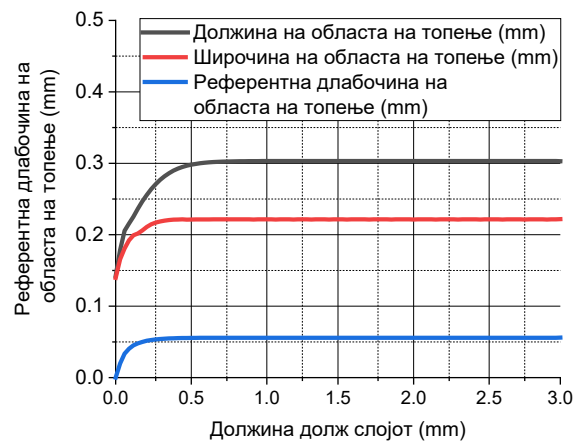
Процесните параметри се базираат на оптимални комбинации добиени од симулацијата. За да се најде оптималното решение од Табелата 3.12, прифатени се истите критериуми и постаки за наоѓање на нови процесни параметри како во случајот на CoCrMo:

- За критериумот средна референтна длабочина на областа на топење, следните кандидати се надвор од определените граници (A1-A6, A9, B1-B5, B8, B9, C1-C5, C8, C9). Овде, областа на топење не е доволно длабока. Овие кандидати се

лоцирани во области каде има висока брзина на скенирање што влијае врз недостатокот на фузиона порозност помеѓу слоевите.

- За критериумот однос длабочина/широчина, само кандидатот С3 е надвор од границите, што значи дека областа на топење е премногу длабока за овој кандидат. За прифатливите кандидати, ниската брзина на скенирање и големата моќност на ласерот се добро балансирани, бидејќи во спротивно би се појавил ефект на клучалка.
- За критериумот однос должина/широчина, областа на топење на кандидатот С3 е многу долга и е надвор од зададениот критериум. Податоците во овие региони, каде што има висока брзина на скенирање и голема моќност на ласерот, се потенцијал за појава на ефектот на создавање на капки.

Од Табелата 3.12, кандидатите А1 и А7 се најбавните решенија, следени од А8, додека кандидатите С6 и С7 се најбрзите решенија. За оптимални решенија се сметаат В6 и В7. Доколку се раководиме според дебелината на слојот (Read et al. 2015; Manfredi and Bidulský 2017; Marchese et al. 2018; Novig, Holm, and Sørby 2018) како препорачана вредност се смета 0.03 mm. Тенденцијата за зголемување на моќноста на ласерот (Buchbinder et al. 2011; Buchbinder et al. 2015), обезбедува можност за зголемување на брзината на изработка поврзана со брзината на скенирање (Kempen et al. 2011; Kempen et al. 2012; Sharif et al. 2016; Stugelmayer 2018). Врз основа на добиените резултати од Табела 3.12, критериумите за класификација и истражувачките анализи од различни автори, кандидатот А8 е оптимално решение за процесните параметри. Сликата 3.22 ги прикажува процесните параметри кога областа на топење постигнува стационарна состојба.



Слика 3.22: Областа на топење долж слојот за процесните параметри на А8.

Сликата 3.22, покажува дека референтната длабочина на областа на топење и широчината започнуваат да се стабилизираат и да постигнат стационарна состојба помеѓу 0.25 и 0.35 mm, додека на должината на областа на топење и е потребно подолго растојание за стабилизација и постигнување на стационарна состојба, со вредности приближно помеѓу 0.5 и 0.75 mm од вкупната должина.

3.3.4 Симулација на порозноста за AlSi10Mg

Процедурата за симулација на порозноста за овој случај е иста како презентираната симулација за CoCrMo. Бидејќи се работи за истражување во индустријата, избран е материјалот AlSi10Mg, чии карактеристики се прикажани во Табелата 3.11. За да се добијат податоците и резултатите за повеќе можни комбинации, избрани се следните параметри: дебелина на слојот од (0.03, 0.05) mm, моќност на ласерот од (195, 295, 395) W, брзина на скенирање од (500, 1000, 1500, 2000, 2500) mm/s, и растојанија на премините: (0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14) mm. Константните параметри кои треба да бидат конфигурирани во машината за АП се: аголот на почетниот слој од 57° и аголот на ротација на слојот од 67°. Критериумот за недостаток од фузиона порозност (порозност 0.5%) е пресметан на истиот начин како во случајот на CoCrMo.

Од резултатите презентирани во Табелата 3.13, може да се заклучи дека најбавниот кандидат е C1, B5 е најбрзиот, а кандидатите надвор од опсегот се A1-A5. Врз основа на резултатите за параметрите добиени од симулација во еден слој (Точка 3.3.3) и симулацијата на порозноста, оптималното решение кое ги интегрира брзината на изработка и квалитетот на површината е E5. Овој кандидат има растојание на премините од 0.14 mm, што е препорачано од испорачателот на опремата, и е наведено од страна на Biffi et al. (2018).

Врз основа на анализата презентирана за обата симулациони процеси, може да се заклучи дека оптималните процесни параметри за експериментални истражувања се: моќност на ласерот од 395 W, брзина на скенирање од 1500 mm/s, растојание на премините од 0.14 mm, и дебелина на слојот од 0.03 mm.

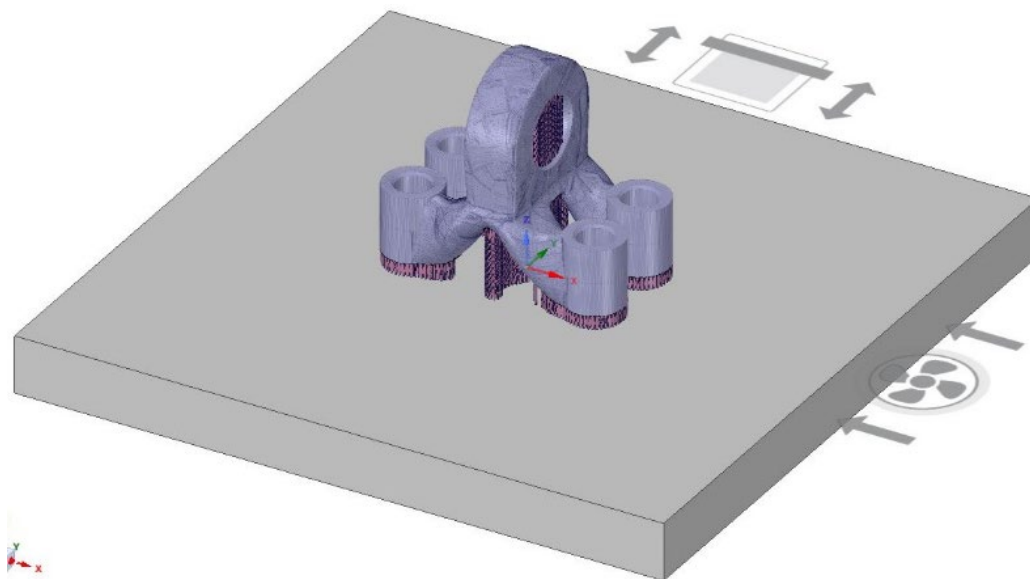
Табела 3.13: Резултати од симулацијата на порозноста за AlSi10Mg.

Кандидат	Моќност на ласерот (W)	Брзина на скенирање (mm/s)	Дебелина на слојот (mm)	Растојание на премините (mm)	Однос на прашина	Однос на цврста фаза
A1	195	2000	0.05	0.06	0.1257	0.8743
A2	195	2000	0.05	0.08	0.1497	0.8503
A3	195	2000	0.05	0.1	0.1957	0.8043
A4	195	2000	0.05	0.12	0.2262	0.7738
A5	195	2000	0.05	0.14	0.2762	0.7238
B1	295	500	0.05	0.06	0	1
B2	295	500	0.05	0.08	0	1
B3	295	500	0.05	0.1	0	1
B4	295	500	0.05	0.12	0	1
B5	295	500	0.05	0.14	0	1
C1	295	1000	0.03	0.06	0	1
C2	295	1000	0.03	0.08	0	1
C3	295	1000	0.03	0.1	0	1
C4	295	1000	0.03	0.12	0	1
C5	295	1000	0.03	0.14	0	1
D1	395	1000	0.05	0.06	0	1
D2	395	1000	0.05	0.08	0	1
D3	395	1000	0.05	0.1	0	1
D4	395	1000	0.05	0.12	0	1
D5	395	1000	0.05	0.14	0	1
E1	395	1500	0.03	0.06	0	1
E2	395	1500	0.03	0.08	0	1
E3	395	1500	0.03	0.1	0	1
E4	395	1500	0.03	0.12	0	1
E5	395	1500	0.03	0.14	0	1

3.3.5 Подготовка на индустрискиот дел за АП

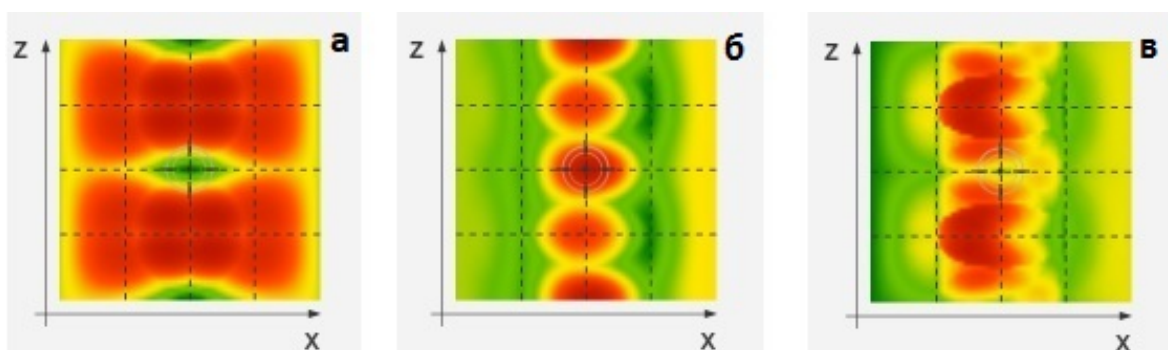
Откако е избран дизајнот со соодветна геометрија и со речиси истите карактеристики како ОД, моделот со 50% НМ треба да биде подготвен за процесот на АП. Постојат одредени чекори кои треба да се направат пред извршување на макро анализите, како што се термичката и статичката симулација. Истите овие чекори мора да се следат и при физичкото производство на делот. Моделот со 50% НМ е претворен во STL формат, со цел да се овозможат операциите во следните чекори. Анализите и симулацијата се направени со софтверот SpaceClaim (Ansys, Inc., САД) и притоа се следи следната постапка.

Избраниот модел треба да биде поставен на платформата за изработка, која во исто време е и основна плоча на машината за АП. Делот заедно со основната плоча е прикажан на Слика 3.23.



Слика 3.23: Делот поставен на основната плоча.

Моделот е поставен во центарот на основната плоча, при што е дефинирана и неговата ориентација. Презентирани се три можни случаи на ориентација (0, 45, и 90) степени. Во секој од овие случаи, степенот на ориентацијата е дефиниран врз основа на три параметри, кои се дел од одлуката за најдоброто решение. Овие параметри се: времето на изработка, подржувачите, и тенденцијата за дисторзија. За моделот со 50% НМ, илустрирани се соодветните области, презентирани на Сликата 3.24.



Слика 3.24: Области: (а) време на изработка; (б) подржувачи; (в) тенденција за дисторзија.

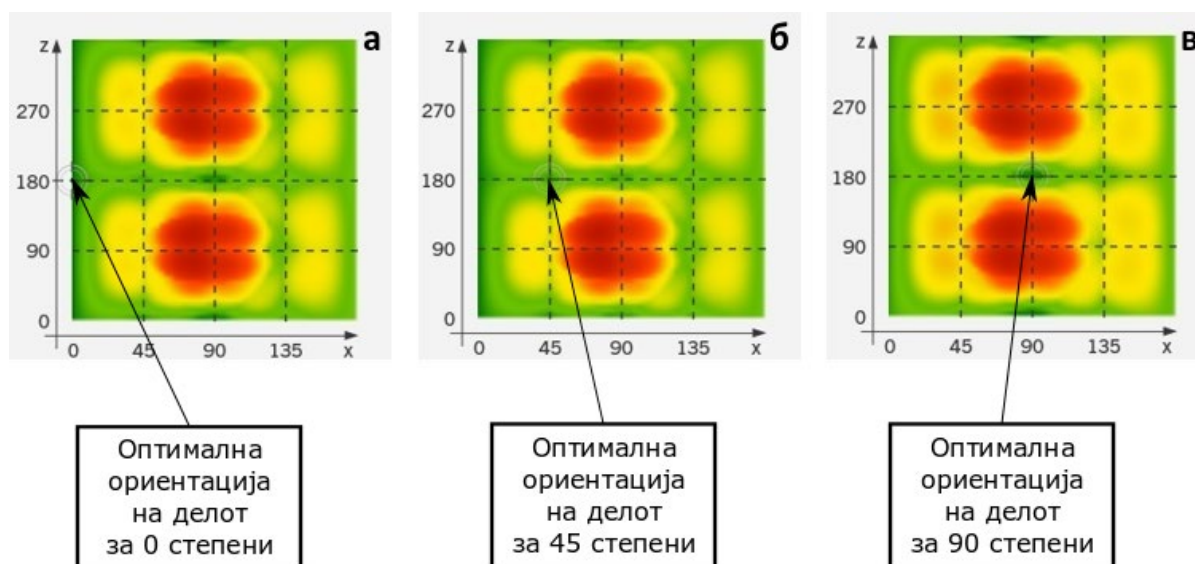
Според Сликата 3.24, црвените области укажуваат дека дадениот избор не е пожелен за соодветниот параметар, додека зелената боја покажува дека тој избор е

пожелен во однос на соодветниот параметар. Степените на ориентација и соодветните вредности на параметрите, се дадени во Табела 3.14.

Табела 3.14: Степени на ориентација и соодветни вредности на параметрите.

Ориентација	Време на изработка (%)	Подржувачи (%)	Тенденција за дисторзија (%)
0 степени	54	23	23
45 степени	50	25	25
90 степени	60	20	20

За секој од приоритетните случаи, прикажани во Табелата 3.14, презентирани се соодветните и несоодветните области за избор на ориентацијата на делот (Слика 3.25).

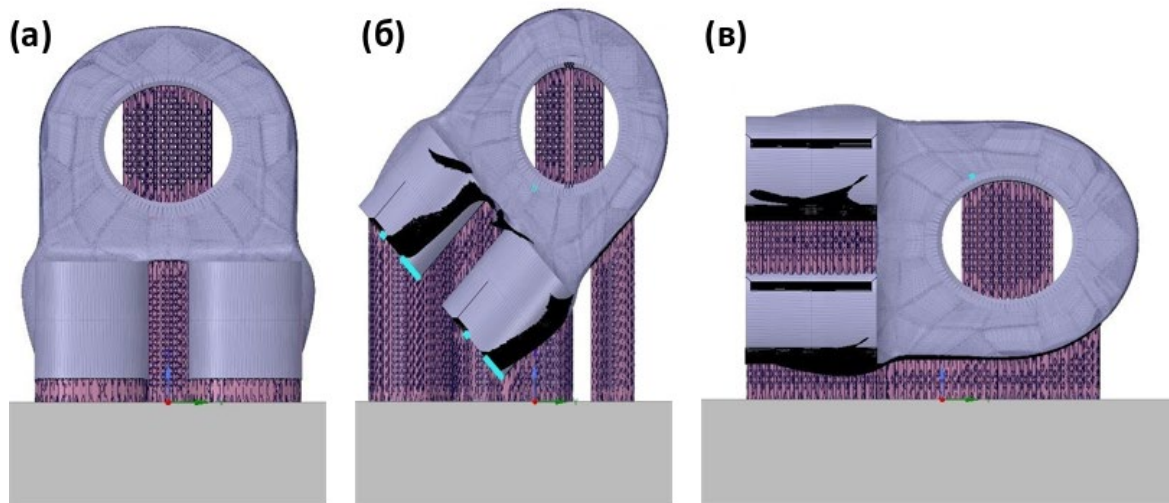


Слика 3.25: Оптимална ориентација: (а) 0 степени; (б) 45 степени; (в) 90 степени.

Врз основа на Сликата 3.25, се забележува дека можните решенија во однос на ориентацијата се X-оската и Y-оската. Тоа значи дека кога станува збор за оските X и Y, делот може да биде ротиран околу X-оската за вредности од 0 до 180 степени, додека за Y-оската за вредности од 0 до 360 степени. Овие две оски се користат за избор на можностите за ориентација на делот. Треба да се забележи дека во оваа ситуација, значењето е фокусирано врз Z-оската, сè додека геометријата на моделот е симетрична, што значи дека кај X-оската не постои разлика во однос на тоа дали делот е ротиран за 90 степени или 180 степени. Доколку одделно се анализира секоја од Сликите 3.25 (а, б, в), се заклучува дека сите зелени области се можни решенија, но само оние со потемна зелена боја се соодветни за избор. Според Сликата 3.25, ориентацијата со 0 степени е

прифатена под (а), 45 под (б), и 90 степени под (в). Сите овие ориентации се ротирали по Z-оската во однос на основната плоча.

По поставувањето на ориентациите согласно најсоодветниот избор во однос на дадените параметри, треба да бидат зададени областите за подржувачите. Во овој случај, тоа е направено автоматски, со софтвер со зададени критериуми - агол на потпирање 45 степени и површина на областа од 0.10 mm^2 . Во согласност со избраните области се определува видот на блокот на подржувачите. За прикажаните случаи, избрани се блоковите на подржувачите со X растојание од 1.5 mm, Y растојание од 1.5 mm, по височина 0.12 mm. Моделите со подржувачите за сите три случаи се прикажани на Сликата 3.26.



Слика 3.26: Ориентација на делот со подржувачи: (а) 0 степени; (б) 45 степени; (в) 90 степени.

Ако одделно се анализираат различните случаи на ориентација, кај моделот со ориентација од 0 степени, подржувачите се лоцирани во областите поврзани со основната плоча, но исто така и во централниот отвор каде е присутно оптоварувањето. За моделот со ориентација од 45 степени, јасно е дека подржувачите во поголема количина се лоцирани во областа на поврзување со основната плоча, но исто така и во областа на централниот отвор каде се наоѓа оптоварувањето. Кај моделот со ориентација од 90 степени, освен што подржувачите се лоцирани во претходно споменатите области, тие се исто така лоцирани и во четирите отвори.

Количината на материјал користена кај различните ориентации на делот, е прикажана во Табела 3.15.

Табела 3.15: Количината на користен материјал кај различна ориентација.

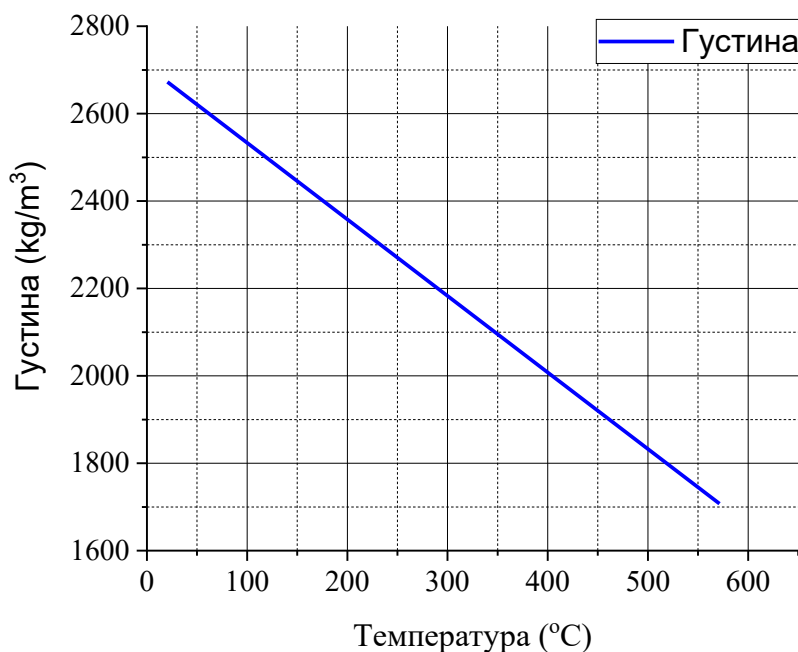
Ориентација	Вкупна маса на материјалот (kg)	Маса на изгубениот материјал (kg)	Маса на материјалот за подржувачите (kg)
0 степени	10.1	0.51	0.03
45 степени	12.19	0.61	0.07
90 степени	7.82	0.39	0.05

Од Табелата 3.15, може да се забележи разликата помеѓу ориентацијата и користењето на материјал. Вкупниот материјал го претставува прашкастиот материјал кој е потребен за целиот процес, загубата на материјал се однесува на прашокот кој е изгубен во текот на процесот на изработка, додека материјалот за подржувачите се користи за изработка на подржувачите, деловите за поврзување со основната плоча и другите избрани области. Според тоа, може да се заклучи дека моделот со ориентација од 0 степени има помалку материјал за подржувачите, отколку што тоа е случај кај моделите со ориентација од 45 степени и 90 степени. Ова директно влијае врз времето и трошоците, но и врз завршната обработка по процесот на производство. Врз основа на прикажаните резултати и анализи, избран е моделот со ориентација од 0 степени како најсоодветен за производство. Неговиот геометриски облик, кој е симетричен, препорачува процесот на АП да биде изведен во оваа ориентација, која исто така е и Z ориентација. Фактот дека оваа ориентација на моделот бара помалку материјал за подржувачите, претставува уште една предност на избраното решение.

3.3.6 Термичка и статичка анализа на индустрискиот дел

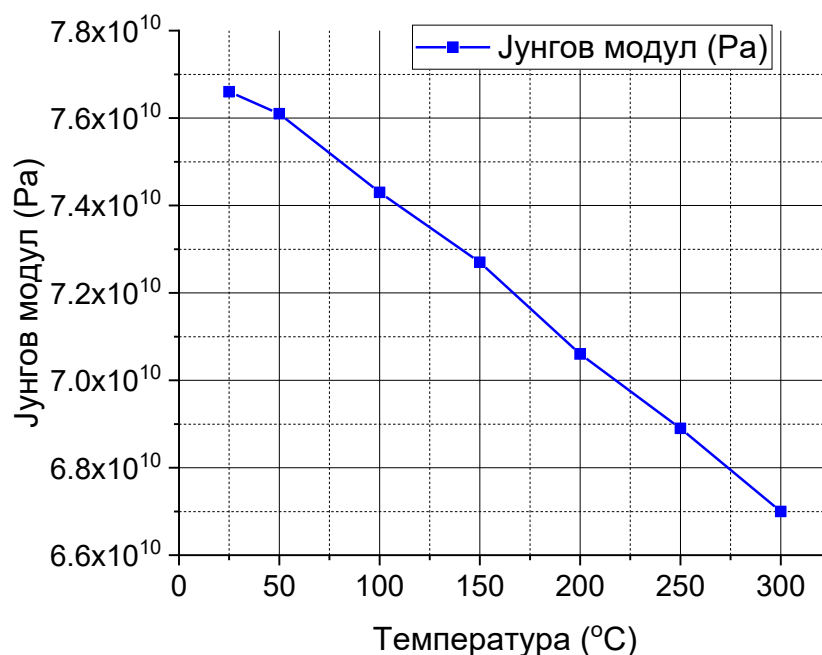
Термичката и статичката анализа на избраниот дел за АП, дава вредни информации за однесувањето на печатениот дел, за време на процесот на печатење и по него. Овие анализи овозможуваат со симулација однапред да се предвидат одредени феномени, како деформации и напони, кои може да се појават во текот на процесот на АП. Во овој случај се користи процесот на ФСП. Симулацијата е направена со софтверот ANSYS (Ansys, Inc., САД), при што се следени одредени чекори со цел добивање точни резултати. Согласно постапката на истражувањето, за избраниот дел (модел со 50% НМ со 0 степени на ориентација), се избира материјалот AlSi10Mg, додека за основната плоча материјалот C45, бидејќи софтверот користи конструктивен челик како материјал за основната плоча. Материјалот AlSi10Mg е во вид на прав наменет за АП, и има точка

на топење од 570 °C. Зависноста помеѓу густината на материјалот и температурата е прикажана на Слика 3.27.

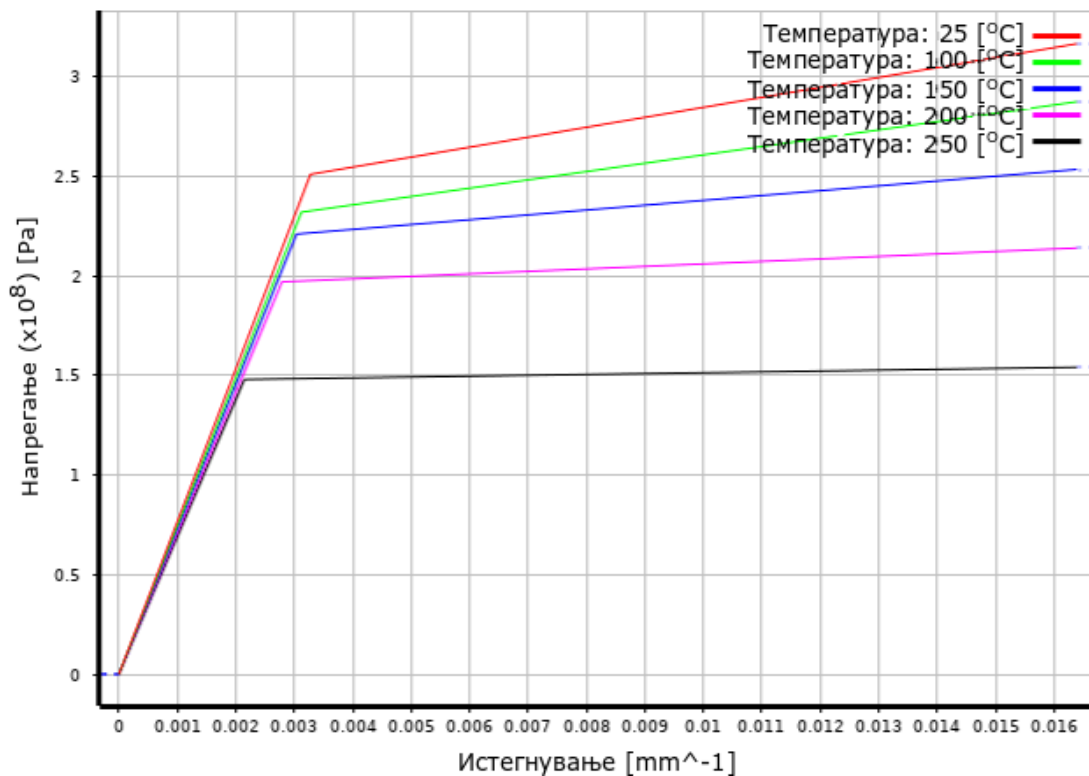


Слика 3.27: Дијаграм за зависноста густина - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).

Освен густината, Јунговиот модул (Слика 3.28) и билинеарното изотропско зајакнување (Bilinear Isotropic Hardening) (Слика 3.29) се исто така зависни од температурата.



Слика 3.28: Дијаграм за зависноста Јунгов модул - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).



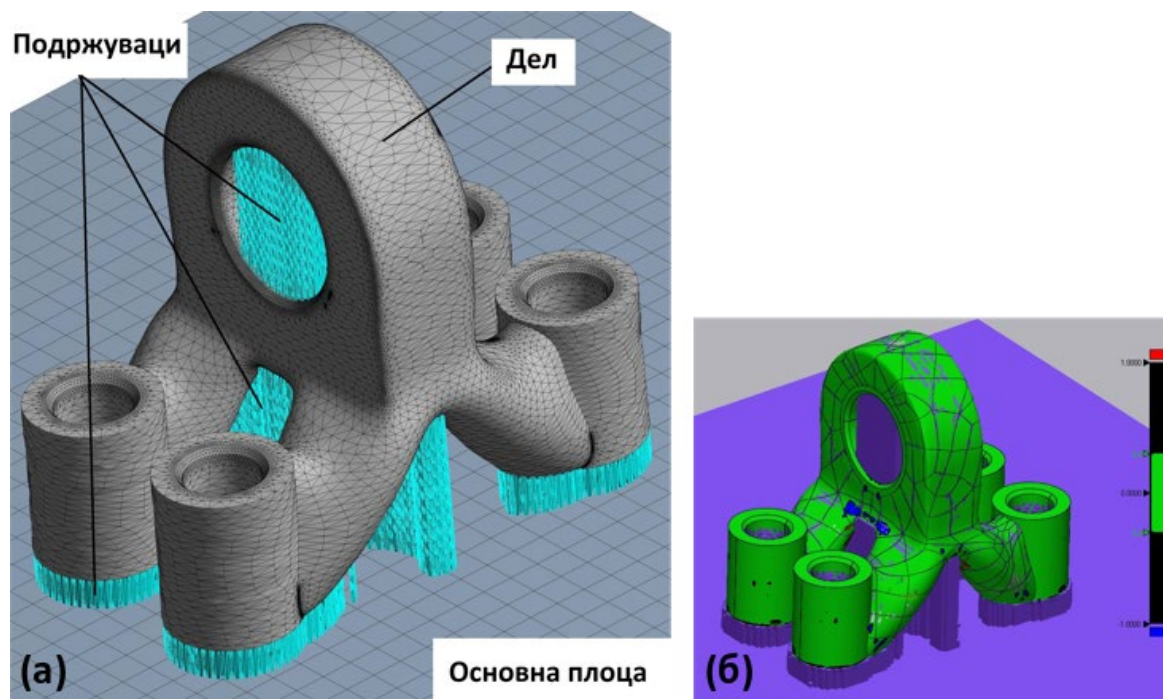
Слика 3.29: Дијаграм за зависноста билинеарно изотропско зајакнување - температура за AlSi10Mg (преземено од ANSYS engineering data, 2020).

По изборот на материјалите, делот треба да биде лоциран на плочата за да се реализира симулацијата со користење на процесот на ФСП. Делот е поставен во центарот на основната плоча (X и Y насоки). Во Z насоката, се додаваат 5 mm кои овозможуваат поставување на подржувачите, и неговото прицврстување за основната плоча.

Подржувачите (STL модел) се добиени со прелиминарна подготовка во АП, а во подоцнежната фаза тие се поврзуваат со делот и основната плоча. Подржувачите имаат клучно влијание во одржувањето на стабилноста, избегнување дисторзија на делот во текот на процесот на АП, а исто така влијаат и врз термичките услови во текот на процесот на ладење. Подржувачката конструкција треба да биде отстранета по завршувањето на процесот на АП. Имајќи ги во предвид постапките на завршна обработка, избрани се блокови на подржувачите со тенки сидови и дијамантска структура на решетката. Тие имаат тенки сидови и лесно можат да се отстранат, што значи помалку операции во фазата после производството. Во оваа смисла, важно е и определувањето на вистинскиот метод на мрежата, бидејќи блоковите на подржувачите со тенки сидови и дијамантска структура на решетката се пресметковно многу захтевни, односно бараат повеќе време за генерирање и симулација. Се преферира картезиановиот

метод на крупна мрежа (cartesian coarse mesh method), кој овозможува пократко време за пресметка. Подржувачите се генерирани преку STL безволуменски блок модел со 0.1 mm дебелина на сид.

Бидејќи делот има сложен облик, мрежниот метод е многу важен за процесот на симулација. Во повеќето случаи, или како стандардна опција, се користи Картезиановиот метод, што е многу ефикасно кај геометрија со правилни облици. Во овој случај, избран е слоевит метод со тетраедри за формирање на мрежата на делот. Ова е соодветен мрежен метод кој главно се користи за сложени геометрии. За делот, користена е височина на слојот од 1 mm и големина на елементите од 1 mm. За основната плоча, користен е картезиановиот метод со големина на елементите од 5 mm, додека за подржувачите е користен истиот метод, со големина на елементите од 1 mm. Визуелниот приказ на мрежната метода за делот, подржувачите и основната плоча, е даден на Слика 3.30.



Слика 3.30: (а) Дел (слоевит метод со тетраедри), подржувачите и основната плоча (картезиан); (б) дел со обликување на мрежа.

На Сликата 3.30а, прикажан е методот со слоевита мрежа од тетраедри. По поставувањето на мрежата, делот е конвертиран во STL модел за споредба на геометријата. Споредбата помеѓу моделот со 50% НМ (референтен модел) и STL моделот, е прикажана на Слика 3.30б. Во овој случај, се користи софтверот Geomagic Control X (3D Systems, Inc., САД). Зелената боја ја претставува толеранцијата која е

помеѓу - 0.3 mm и + 0.3 mm, додека максималните граници се помеѓу -1 mm и +1 mm. Од оваа споредба, може да се заклучи дека резултатите од симулацијата нема да отстапуваат од точноста на мрежата, и покрај фактот што се работи за сложени површини. Совпаѓањето е многу добро, и многу е блиску до моделот со 50% НМ (референтен модел).

Во постигнувањето на точноста на геометријата, при користењето на соодветен мрежен метод во процесот на симулација, параметрите на процесот како и условите на изработка и ладење, играат важна улога во процесот на ФСП. Редоследот на операциите во АП кои вклучуваат отстранување на основната плоча по ладењето, и отстранување на подржувачите на крајот од процесот, се многу важни елементи. Ќе бидат користени истите вредности добиени од симулацијата на слојот (Точка 3.3.3) и параметарската симулација на порозноста (Точка 3.3.4). Сите овие параметри се прикажани во Табела 3.16.

Табела 3.16: Процесни параметри на АП.

Геометрија	Материјал за изработка	Температура на топење (°C)	Дебелина на слојот (mm)	Растојание на премините (mm)	Брзина на скенирање (mm/s)	Температура на предгревање (°C)	Температура на ладење (°C)
Дел	AlSi10Mg	570	0.03	0.14	1500	80	22
Подржувачи	AlSi10Mg						
Основна плоча	C45	-	-	-	-		

Од Табелата 3.16 се забележува дека и овде се користат истите вредности кои се добиени при претходните симулации на микро структурата, а со цел унифицирање на податоците за макро анализите. Еден од поважните параметри во анализата е моќноста на ласерот, што е еден од главните параметри за определување на волуменска густина на енергијата (равенка 2.5, Точка 2.2.5) кој што се користи во процесот на АП. Овде, се претпоставува дека процесните параметри се соодветно зададени, и се базираат на оние параметри кога целиот прашок на горниот слој е растопен, без да биде недоволно загреан или прегреан. Medikonda et al. (2019) ја објаснуваат макро симулацијата на процесот на АП со користење на пристапот на збиени слоеви. Овој пристап во процесот на изработка, ја користи техниката на создавање на елемент и еднаква големина на мрежата во насоката на изработка. Целиот слој од делот се активира секвенционално за секоја изработка од првиот слој. За секој слој, се создаваат идеалните услови на топење

согласно температурата на тпење на избраниот материјал. Равенката за решавање на термичката рамнотежа за секој од збиените слоеви е:

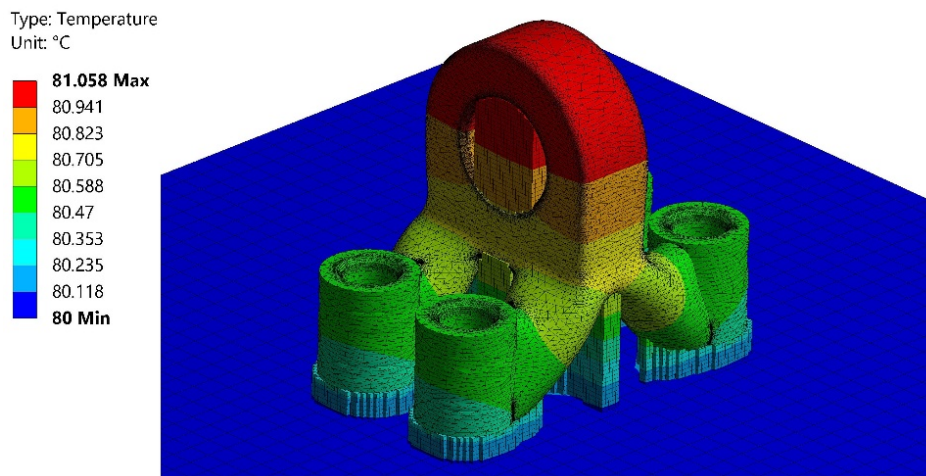
$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = -\{Q(t)\} \quad (3.3)$$

каде што $[C]$ и $[K]$ се матрици за топлински капацитет и топлинска спроводливост, $Q(t)$ е топлинскиот флуks за дадено време t за време на решението. Бидејќи макро симулацијата е споена термичка и статичка симулација, распределбата на температурата е пренесена во квази-статичка структурна симулација. Равенката за статичка рамнотежа е прикажана подолу:

$$[K]\{u\} = \{F\} + \alpha\Delta T \quad (3.4)$$

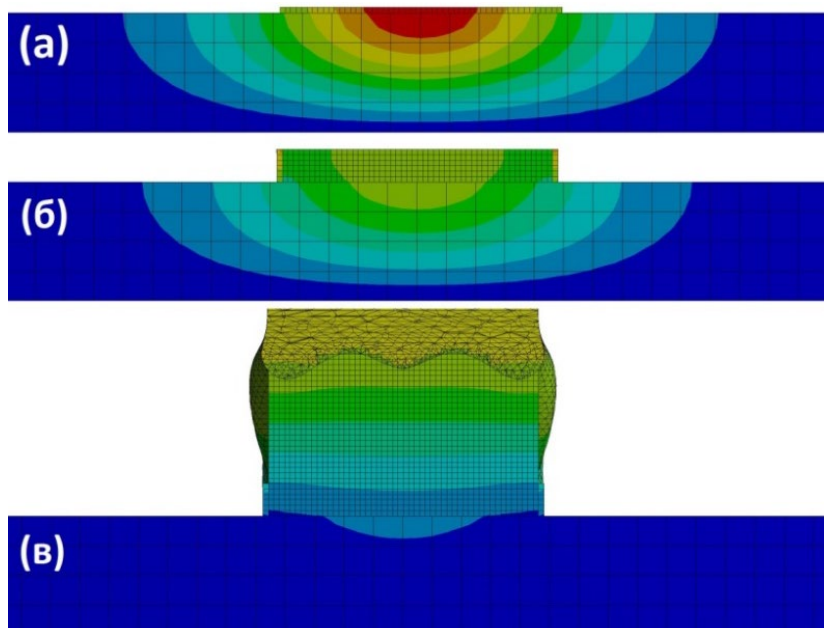
каде што $\{u\}$ е пресметаната деформација, $[K]$ е матрицата на структурна крутост, и $\alpha\Delta T$ е термин за термичка експанзија.

Кога еднаш ќе бидат зададени термичко-конструктивните гранични услови, тогаш процесот се симулира и се добиваат резултатите за бараните излезни параметри. Сликата 3.31 ја прикажува дистрибуцијата на температурата.



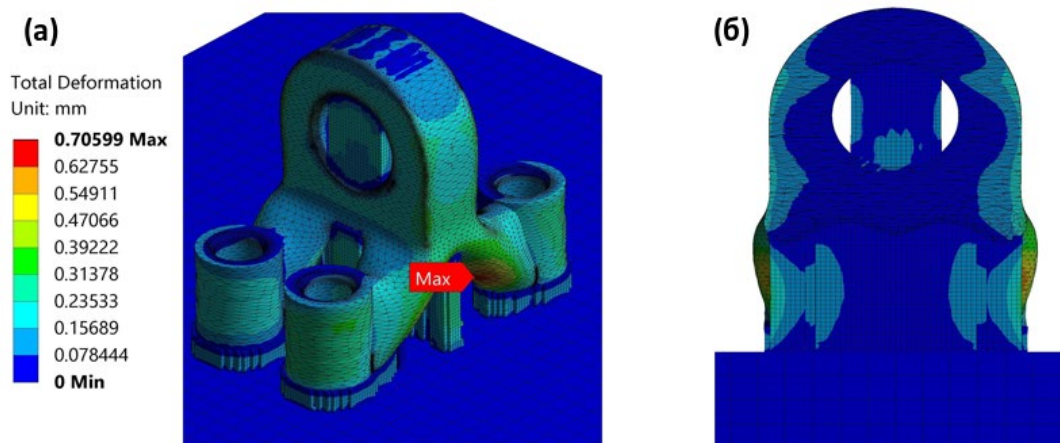
Слика 3.31: Распределба на температурата на истражуваниот модел.

Од Сликата 3.31 се гледа дека температурата е симетрично распределена, и дека постои мала разлика помеѓу максималната температура 81.058 °C и зададената температура на предгревање. Тоа укажува на добра распределба на температурата за време на процесот на АП. Со цел да се види подетално распределбата на температурата во попречните пресеци на основната плоча, за време на изработката на првиот слој, на крајот од подржувачите и за време на процесот на изработка, соодветен приказ е претставен на Слика 3.32.



Слика 3.32: Распределба на температурата: (а) во првиот слој; (б) на крајот на подржувачите; (в) на процесот на изработка.

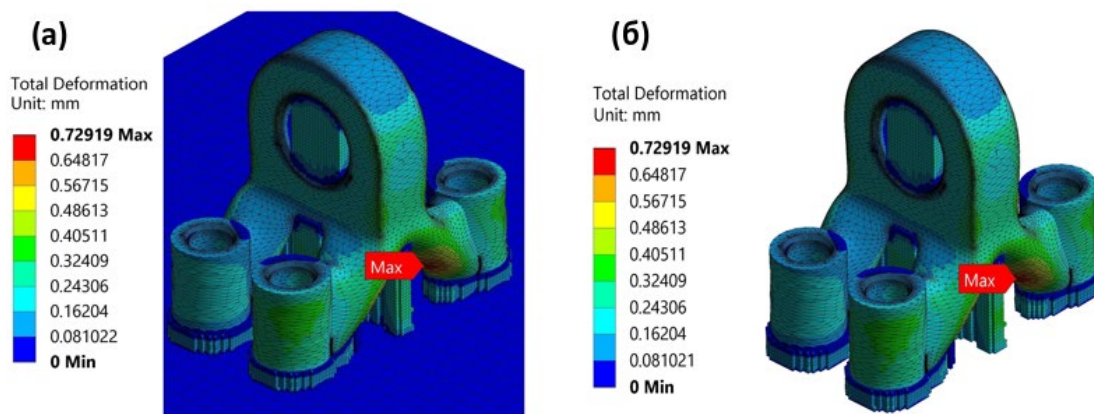
По завршувањето на термичкиот процес, важно е да се утврдат деформациите на делот кои се појавуваат за време на процесот на АП. Бидејќи моделот е изработен со цел да биде колку што е можно посличен со реалните производствени услови, вкупната деформација на крајот од процесот на АП е прикажана на Слика 3.33.



Слика 3.33: Вкупна деформација на делот произведен со АП, на крајот од процесот на производство: (а) изометриски приказ; (б) приказ на попречен пресек.

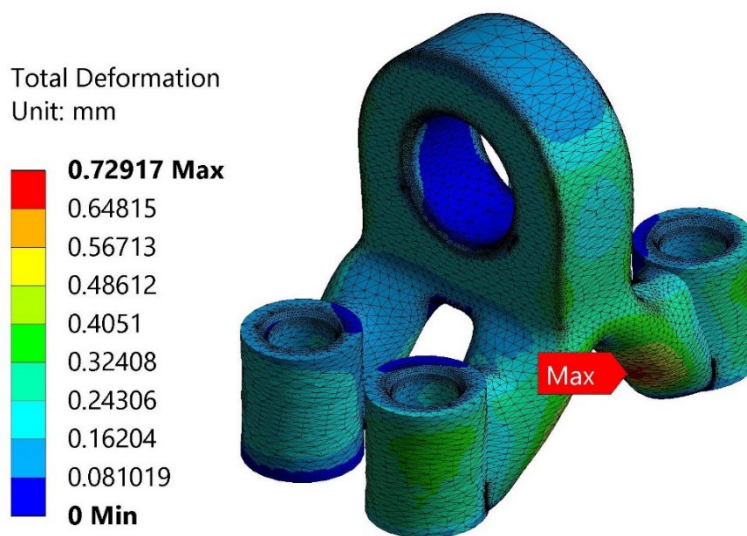
Од Сликата 3.33а се гледа дека вкупната деформација е 0.70599 mm и е лоцирана во областа "max", прикажана со стрелка. На истата Слика 3.33б, важно е да се забележи дека деформацијата е минимална во областа каде е лоцирано оптоварувањето од лежиштето. Ова, меѓу другото, се должи на фактот што подржувачите ја распределуваат

топлината кон другите области. Во областа на другите четири отвори, топлината е повисока што укажува на поголема деформација. За време на изработката на делот со АП, се зема во предвид и процесот на ладење, по што следи отстранување на основната плоча. Имено, откако ќе заврши процесот на ладење, присуството на основната плоча е непотребно. Деформациите по завршувањето на процесот на ладење и отстранувањето на основната плоча, се прикажани на Слика 3.34.



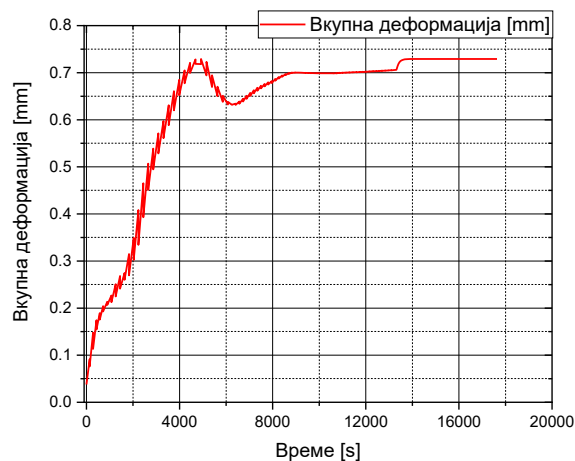
Слика 3.34: Вкупна деформација: (а) по завршување на процесот на ладење; (б) по отстранување на основната плоча.

Од Сликата 3.34 може да се заклучи дека вкупната деформација по завршување на процесот на ладење е незначителна во споредба со вкупната деформација пред ладењето на делот произведен со АП. Следниот чекор во процесот на симулација е отстранувањето на подржувачите. Вкупните деформации, по завршувањето на производството на делот и отстранувањето на подржувачите, се прикажани на Слика 3.35.



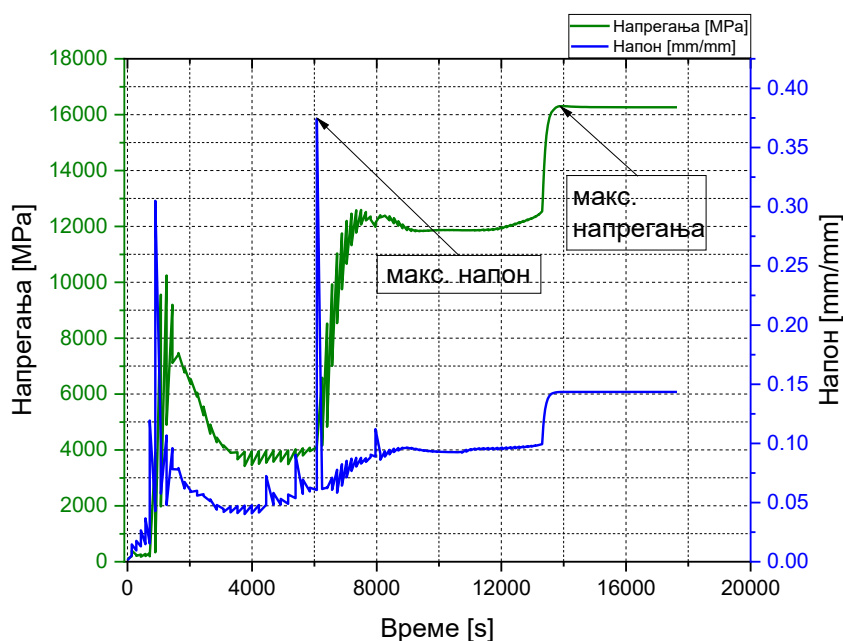
Слика 3.35: Вкупна деформација на делот по завршувањето на процесот на АП.

Од Сликата 3.35 може да се заклучи дека вкупната деформација на делот (50% НМ и со ориентација од 0 степени), врз основа на сетот параметри и процесот на АП, е 0.72917 mm. Оваа вредност е прифатлива, имајќи ја во предвид областа каде што се појавува. Виталните области, како што е отворот на лежиштето, не се деформирани, а имаат и добра распределба на топлината, и соодветна конструкција на подржувачите за производство на овој дел. Вредноста на деформацијата за време на производството со АП на овој дел е прикажана на Слика 3.36.



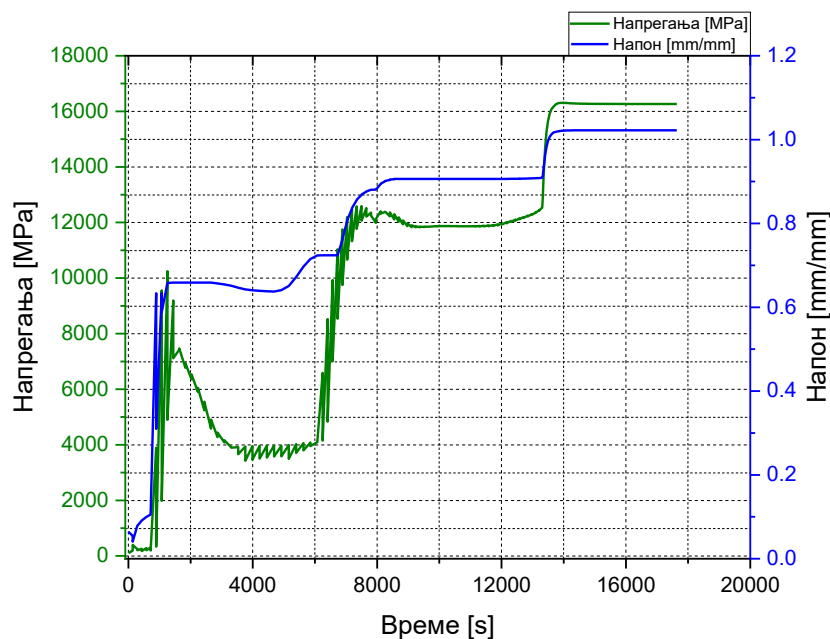
Слика 3.36: Вкупна деформација со текот на времето.

Максималните главни вредности за напрегањето и напоните за време на процесот на АП, се прикажани на Сликата 3.37.



Слика 3.37: Криви на максималните главни вредности за напрегањата и напоните со текот на времето.

Врз основа на дијаграмот прикажан на Сликата 3.37, може да се заклучи дека максималните вредности на напрегањата и напоните не се совпаѓаат во исто време, односно во ист слој за време на процесот на АП. Во врска со тоа, максималното напрегање е 16307 МРа во 13913 s а максималниот напон е 0.37431 mm/mm во 6076.2 s. Како што е познато, обата параметри односно напрегањето и напонот, се пропорционални. Во оваа ситуација, кога не им се совпаѓаат вредностите, се развиваат пластични истегнувања во делот во текот на процесот на АП. Врз основа на тоа, со цел понатамошно појаснување на резултатите од статичката анализа, анализирани се напрегањата - пластичните напони (Слика 3.38).



Слика 3.38: Напрегање - пластично истегнување во текот на времето.

Ова помага да се предвиди каде делот произведен со АП би имал дефект во областа на максималните вредности напон - напрегања. На Сликата 3.38 прикажана е зависноста пластичен напон - напрегања во функција од времето. Врз основа на овој дијаграм ќе се најде критичната точка на делот. Од ова, може да се заклучи дека максималните вредности започнуваат по чекорот на изработка на делот со АП, односно по 13307 s. Вредностите растат се до крајот на процесот, кога се отстрануваат основната плоча и подржувачите. Максималната вредност каде се совпаѓаат напрегањата и пластично напонот е 14725 МРа во 13407 s (кога почнува процесот на ладење). Во вакви случаи, кога моделот е произведен со процесот на ФСП, постои можност за пластични деформации, врз основа на карактеристиките на материјалот, особено во однос на билинеарното изотропско зајакнување, што за материјалот AlSi10Mg е прикажано на

Слика 3.29. Кога вредностите ја преминуваат границата на течење на тангентниот модул, тоа означува дека се поминува еластичната граница и се поминува во пластичната зона. Во такви случаи вредностите на напрегањето и напоните во ист слој или во исто време, не се совпаѓаат, како што е прикажано на Слика 3.37. Ова се потврдува со дијаграмот напрегања-пластични напони прикажан на Слика 3.38, каде тие се совпаѓаат по чекорот на изработка со АП за максималната вредност (споредено со Слика 3.37), за ист период од времето, што значи во истиот слој од делот произведен со АП. Врз основа на симулацијата и презентираниите резултати од термичките и статичките анализи, може да се заклучи дека делот произведен со ФСП процес, со дадените параметри, е прифатлив за физичко производство со процесот на АП. Ова се должи на добрата дистрибуција на температурата, малата вкупна деформација и високата јакост, кои се добиени преку статичката и температурните анализи.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖУВАЊЕ НА ИЗБРАНИ СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ

4.1 Експериментална постапка и методологија

Експерименталното истражување е многу важно за валидација на нумеричките анализи и теоретските предвидувања. Исто како што тоа беше случај кај моделирањето и симулацијата, и овде ќе бидат истражени двата примера, односно денталниот и индустрискиот дел. Експерименталното истражување се состои од три чекори:

1. Производна постапка
2. Споредба на точност и технологиите
3. Металографија

Во првиот чекор, ќе биде објаснет целиот процес, вклучувајќи ја производната постапка за АП и класичните технологии. Во вториот чекор, ќе бидат анализирани конкретните делови произведени со АП и класичните технологии. За денталниот дел, споредбата е направена помеѓу АП и КЛ, додека за индустрискиот дел, споредени се АП и CNC обработката. Во третиот чекор, ќе бидат анализирани карактеристиките на материјалите кај деловите произведени со различните технологии, објаснети во вториот чекор.

4.1.1 Процес на производство на дентален дел

За изработка на денталниот мост како финален производ, се користат две добро познати технологии: АП и КЛ. Овие две технологии се користат во денталната медицина многу години, особено КЛ која се користи долго време. Со новите достигнувања во различните производни технологии, денес е можно да се користи процесот на Л-ФСП. Дополнително, има промени и развој на различни материјали кои се релевантни за овие технологии. Во овој случај, за да се изработи денталниот мост, се користи машината EOSIN M 270 (EOS GmbH, Германија) (Слика 2.17, Точка 2.2.4) и прашкастиот материјал CoCrMo (EOS Cobalt Chrome SP2), додека за изработка на дентален мост со КЛ технологија се користи машина за леење и материјалот CoCrWMo (Starbond CoS). Хемискиот состав на соодветните материјали е даден во Табелата 4.1.

Табела 4.1: Хемискиот состав на материјалите.

Елемент (маса-%)	Co	Cr	Mo	W	Si	Fe	Mn
CoCrMo*	63.8	24.7	5.1	5.4	1.0	max.0.5	max.0.1
CoCrWMo**	59.0	25.0	3.5	10	max.1.0	max.1.5	

* EOS Cobalt Chrome SP2 material datasheet.

** Scheftner Dental Alloys material datasheet.

Постапката за производство на дентален мост со АП, започнува со STL модел на делот, по што следи подготовката за АП (вклучувајќи ја ориентацијата на моделот и поставувањето на подржувачите). Откако ќе се заврши процесот на АП, следниот чекор е процесот на синтерување во кој делот се поставува во печка, во согласност со препораките за обработка.

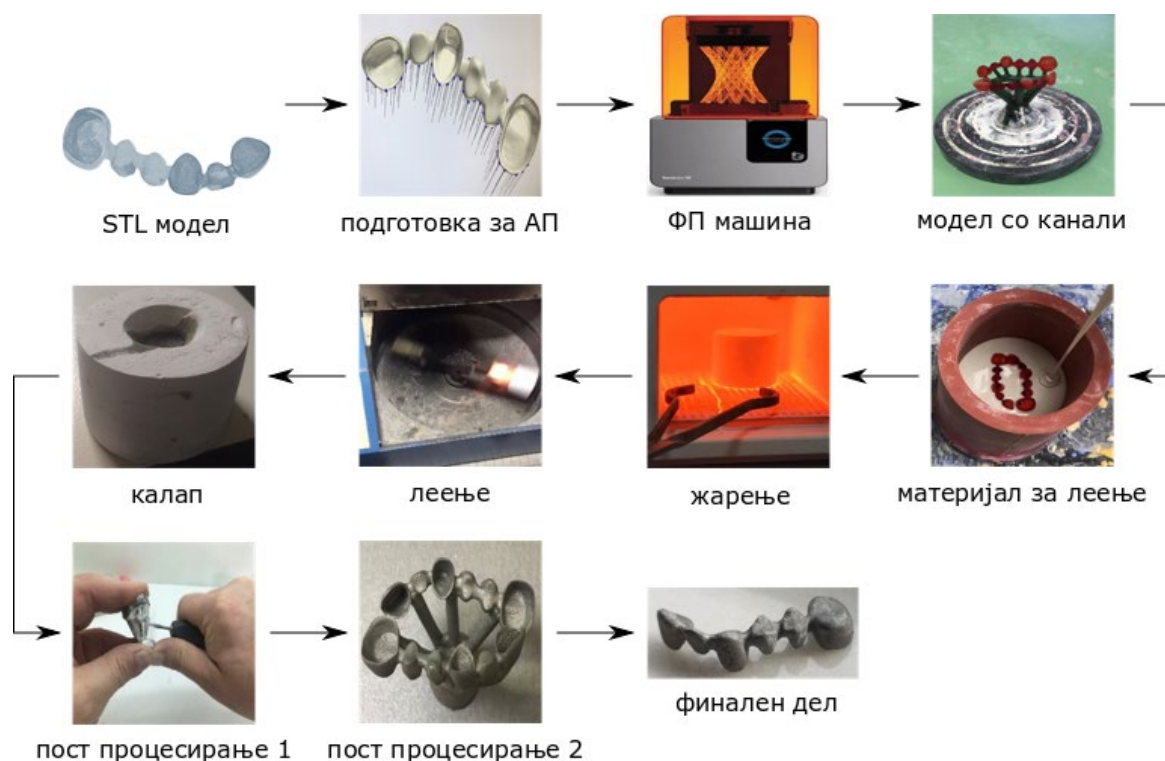
**Слика 4.1:** Работен процес за изработка на денталниот мост со АП.

Синтеруваниот дел е со своите подржувачи, кои се потребни за процесот на Л-ФСП, а треба да се отстранат во операцијата на пост процесирање. Во овој случај, подржувачите се отстрануваат рачни алати, а потоа се врши пескарење со цел да се елиминира рапавоста предизвикана од подржувачите. Конечно, се добива бараниот краен производ. Работниот тек на целиот процес е прикажан на Слика 4.1. Процесните параметри (објаснети во Точка 3.3.1 и 3.3.2) за производство со АП се презентирани во Табела 4.2.

Табела 4.2: Процесни параметри за примерот на дентален мост.

Дебелина на слој (mm)	Моќност на ласерот (W)	Брзина на скенирање (mm/s)	Растојание на премините (mm)
0.03	195	1100	0.09

Постапката за изработка на истиот модел на дентален мост, со КЛ, се разликува од онаа за АП. Кај КЛ, постојат одредени дополнителни чекори кој треба да се направат од почетокот. STL моделот се испраќа на соодветна машина за производство на дентален мост која ја користи АП технологијата наречена ФП и смолест материјал. Делот произведен со ФП е брза изработка на алат за за КЛ за обликување на крајниот производ.

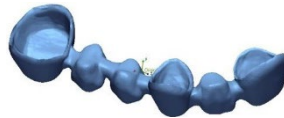


Слика 4.2: Работен процес за изработка на дентален мост со КЛ.

Откако е добиен физичкиот модел преку ФП процесот, потребно е да се поврзе каналот на овој модел за да се овозможи процесот на леење. Во следниот чекор, материјалот за изработка треба да се стави во округла кутија во која претходно е ставен ФП моделот на денталниот мост. Потоа, материјалот треба да се исуши пред да се стави во печката, каде се загрева околу еден час на температура на топење. Потоа, калапот е подготвен за процесот на леење. Конечно, овој процес завршува со вадење на материјалот од одливката (пост процесирање 1), а потоа следува процес на отстранување на каналот (пост процесирање 2) и други неправилности од крајниот производ. Сите овие чекори се прават рачно од страна на забниот техничар. Овој работен процес може да се види на Сликата 4.2. АП за примерот на денталниот мост беше реализирано во Digital Dentistry (Косово), а КЛ во денталната лабораторија Alp Dental (Косово).

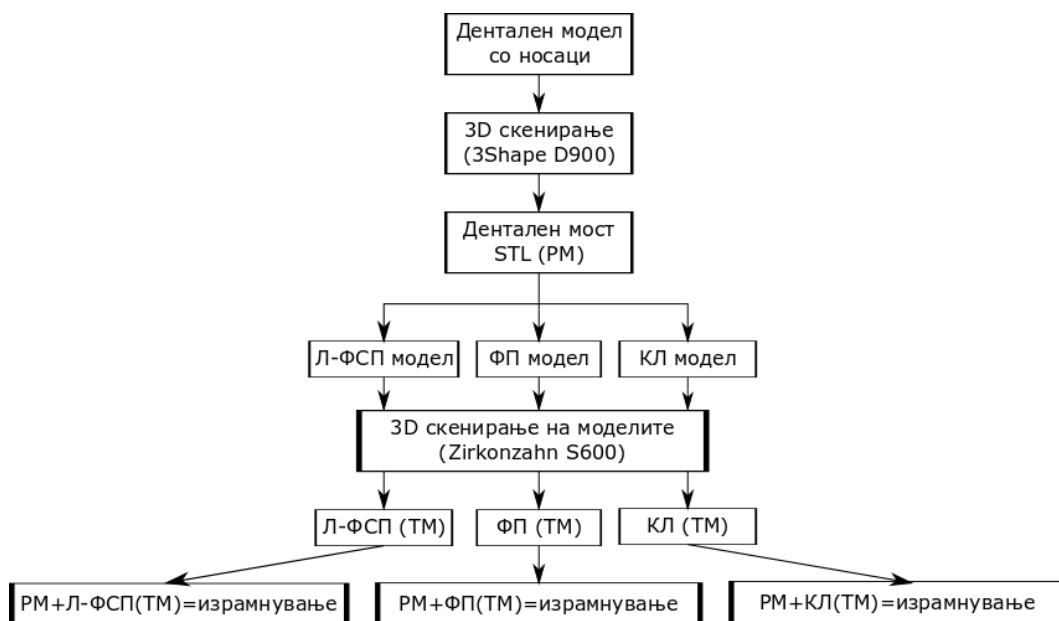
4.1.2 Дентален дел (споредба на технологијата и обликот)

Од праксата е познато дека точноста на денталните мостови е многу важна, и претставува константно барање кое влијае врз стабилноста и функционалноста, особено кај оние позиции каде се лоцирани носачите дефинирани од страна на забниот техничар. Покрај барањата кои произлегуваат од околностите, факторите кои влијаат врз точноста главно се базираат на производната технологија и мерниот уред од кои се добиваат геометриските податоци. Во овој случај, користен е надворешен 3D скенер (презентиран во Точка 3.3.1) за аквизиција на геометриски податоци. По завршувањето на процесите на 3D скенирање и РИ (презентирани во Точка 3.1.1), се добива STL моделот, како референтен модел (РМ), (Слика 4.3).



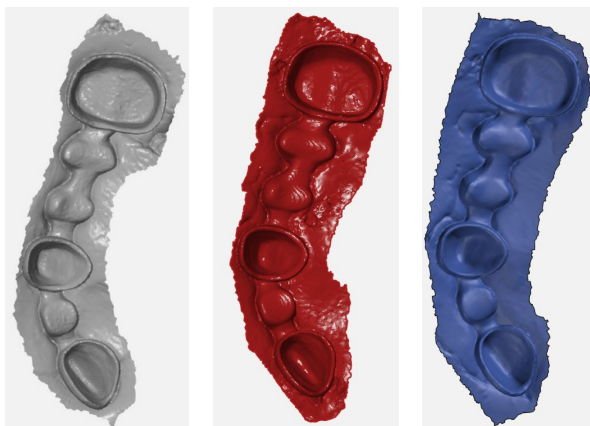
Слика 4.3: Дентален мост (РМ).

Врз основа на денталниот мост (РМ), користени се три различни технологии на производство за изработка на три тест модели (ТМ). Првата производна технологија е Л-ФСП, втората е ФП при што овој модел се користи како калап за обликување на денталниот мост за леење, и КЛ како трета производна технологија. Работниот процес на експерименталното истражување е покажан на Слика 4.4.



Слика 4.4: Работен процес на експерименталното истражување за споредба на технологијата и обликот на денталниот мост.

Моделите добиени со соодветните технологии (Л-ФСП, ФП, КЛ) се скенирани со користење на надворешен 3D скенер Zirkonzahn S600 (Zirkonzahn GmbH, Германија), прикажан на Слика 2.5 во средина (Точка 2.2.1). Податоците од овие модели се зачувани како STL датотеки и се лоцирани во датотека под името тест модел (Слика 4.5). Скенираните слики го покажуваат внатрешниот дел од денталниот мост кај сите три модели. Податоците ќе се споредуваат со оние позиции каде постои контакт помеѓу денталниот мост и носачите на долната вилица.

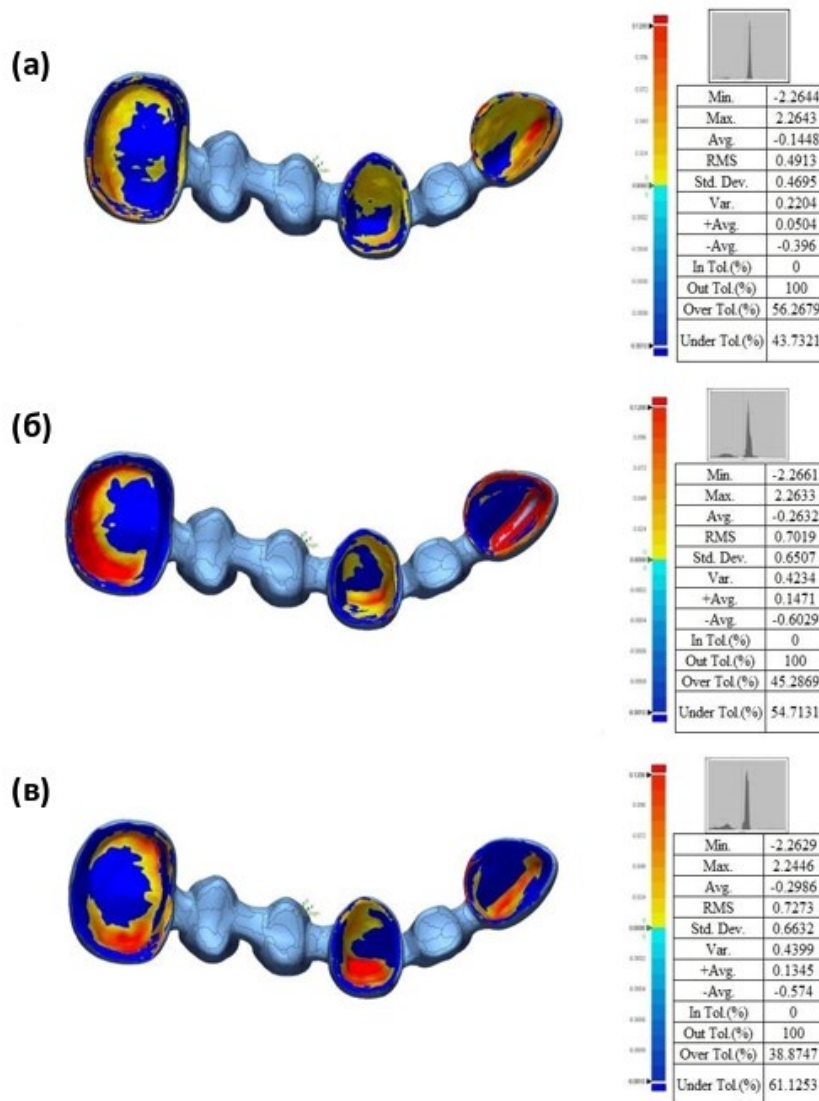


Слика 4.5: Л-ФСП (сива); ФП (црвена); КЛ (сина).

По комплетирањето на процесот на скенирање, референтниот STL (RM) ќе биде во контролорната група, додека тестот STL (TM) ќе биде во тест групата. Секој модел од тест STL ќе биде препокриена со референтниот STL модел, со користење на софтверот Geomagic Control X (3D Systems, Inc., САД). За да се оствари препокривањето, RM се споредува со TM за секој одделно, при што верзиите на референтниот и тест моделите мора да бидат во формат на облак од точки, со цел да бидат почетно порамнети и последователно преуредувани заради остварување на најдобро совпаѓање. Секој модел е успешно проектиран во податоците од RM, па според тоа, може да се добијат податоци за можни отстапувања за соодветните модели. Методот кој ќе биде користен за мерење на отстапувањето помеѓу RM и TM, е методот на најмали квадратни корени (RMS – Root Mean Square). Со овој метод, може да се измери растојанието помеѓу податоците од површините кои имаат ист координатен систем на податоци. Истиот пристап за денталниот истрага го користи од Jeong, Lee, and Lee (2018). Точноста за множеството податоци се определува најпрво со лоцирање на областа која се анализира, а потоа се определува вредноста на најголемата разлика на RMS помеѓу нив. Разликата помеѓу нив укажува на најголемата грешка која се појавува во мерената област. Равенката која се користи за пресметка на RSM е следната:

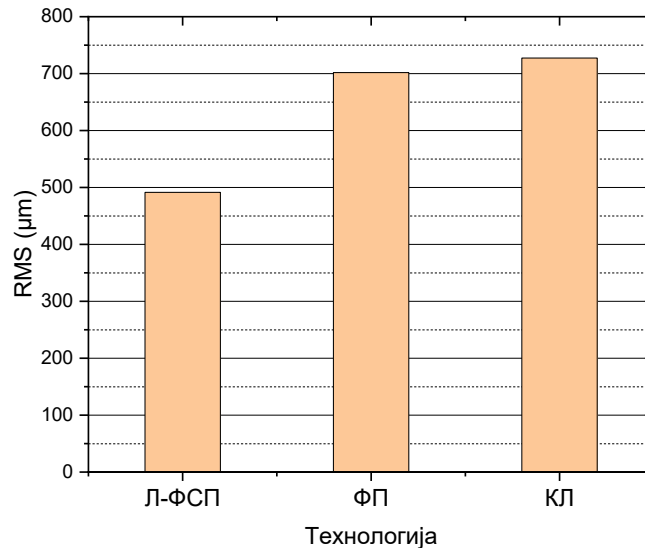
$$RMS = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2} \quad (4.1)$$

Од равенката се гледа дека во истражуваниот случај $x_{1,i}$ е точка на податоци за РМ, а $x_{2,i}$ е точка на податоци за ТМ, додека n е број на мерења за сите избрани точки. Резултатите кои се добиени со споредба на избраните модели се прикажани на мапа со различни бои. Оваа мапа има максимум и минимум кои во овој случај се 0 mm и + 0.12 mm. Овие вредности се зададени како максимални граници за прифатливи вредности за маргинално совпаѓање и внатрешно совпаѓање (Pimenta et al. 2015; Ullattuthodi et al. 2017; Ghodsi, Alikhasi, and Soltani 2019). Во ова истражување, овој интервал се користи за визуелно да се покаже областа која е зафатена од собирање (сина боја). Споредбите помеѓу РМ и ТМ за соодветните технологии, се презентирани на Сликата 4.6.



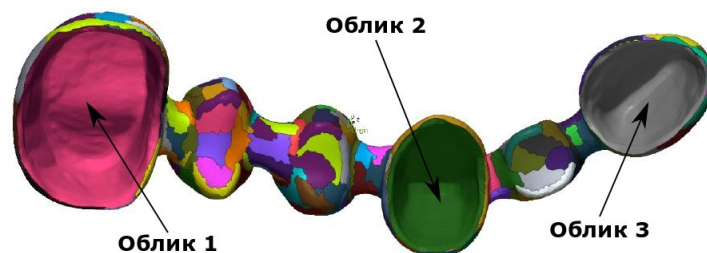
Слика 4.6: (а) Л-ФСП случај; (б) ФП случај; (в) КЈ случај.

Покрај собирањето, кое е присутно кај истражувањето на денталниот мост, влијанието на технологијата и обликот врз точноста е исто така многу важно. Споредбата на точноста во вредностите на RMS (μm) за сите три технологии е дадена на Слика 4.7.



Слика 4.7: Споредба на точноста помеѓу трите различни технологии (пример за дентален мост).

Од Сликата 4.7, може да се види дека вредноста на RMS (μm) за Л-ФСП е помала споредено со другите две технологии, ФП (701.9 μm) и КЛ (727.3 μm). Ова укажува на фактот дека денталните мостови произведени со Л-ФСП (491.3 μm) се поточни од оние произведени со другите две технологии, ФП и КЛ. Конечните резултати за точноста на денталниот мост не се доволни за внимателно истражување, бидејќи за време на анализите е забележано дека секој облик на денталниот мост има свои особености кои повеќе или помалку влијаат врз крајниот резултат. Врз основа на РМ, како позиција за истражување е избрана внатрешноста, односно делот кој се поставува врз носачите на долната вилица. Внатрешната позиција на денталниот мост се дели на соодветни форми, како што е покажано на Слика 4.8.



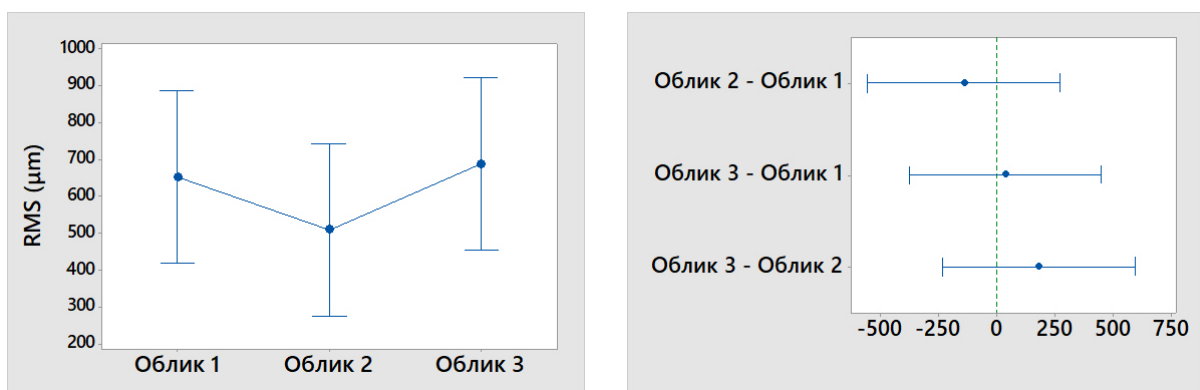
Слика 4.8: Дентален мост (внатрешни облици).

За да се истражи дали постои разлика во точноста помеѓу исти облици кои се произведени со различни технологии, и дали промената на производната технологија е поважна отколку ефектот од обликот, или пак разликата кај двата фактори истовремено влијае на точноста кај РМ и ТМ моделите, за статистичка анализа е избран analysis of variance (ANOVA) and Tukey post-hoc тест методот со значително ниво ($\alpha=0.05$). Резултатите од еднократната ANOVA Tukey post-hoc споредба на парови за облик е презентирани во Табела 4.3. За сите статистички анализи, користен е софтверот Minitab 18 (Minitab, Inc., САД).

Табела 4.3: Споредба на обликот при производство со различни технологии.

Облик	N	Просек	Групирање
Облик 3	3	688	A
Облик 1	3	652.8	A
Облик 2	3	509.8	A

Врз основа на резултатите презентирани во Табела 4.3, може да се забележи дека не постојат значителни разлики помеѓу трите облици на деналниот мост, и тие се означени односно групирани со “А”. Понатаму, врз основа на Сликата 4.9 лево, може да се каже дека Облик 2 е поточен од другите два облици (Облик 1 и Облик 3). За резултатите кои не се блиску до нула, значи дека тие се различни, па во однос на разликата помеѓу Облик 1 и Облик 3, резултатите се слични, со што се објаснува фактот дека зависноста е блиску до нула, како што е прикажано на Слика 4.9 десно.



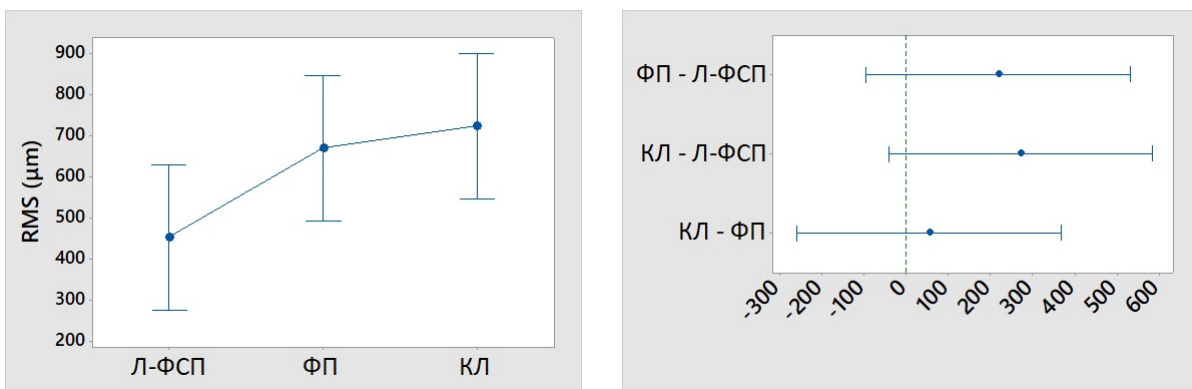
Слика 4.9: (лево) Интервал меѓу печатење на два слоја (RMS во однос на облик); (десно) Tukey тест за облик.

Истата споредба е направена за влијанието на технологијата врз точноста на деналниот мост, со користење на One-way ANOVA Tukey post-hoc споредба на парови. Оваа споредба е прикажана во Табела 4.4.

Табела 4.4: Споредба на технологиите.

Технологија	N	Просек	Групирање
КЛ	3	724.9	A
ФП	3	671	A
Л-ФСП	3	454.2	A

Врз основа на резултатите од Табела 4.4, се забележува дека нема значителни разлики помеѓу трите избрани технологии за изработка на денталниот мост, и тие се означени со “А”. Понатаму, врз основа на Сликата 4.10 лево, може да се заклучи дека Л-ФСП е поточна од другите две технологии (ФП и КЛ), додека интеракцијата помеѓу КЛ и ФП (Слика 4.10 десно) е попожелна бидејќи истиот модел од ФП е користен за брз прототип на моделот за денталниот мост со цел финална изработка преку технологијата на КЛ.



Слика 4.10: (лево) Интервал меѓу печатење на два слоја (RMS во однос на технологија);
(десно) Tukey тест за технологија.

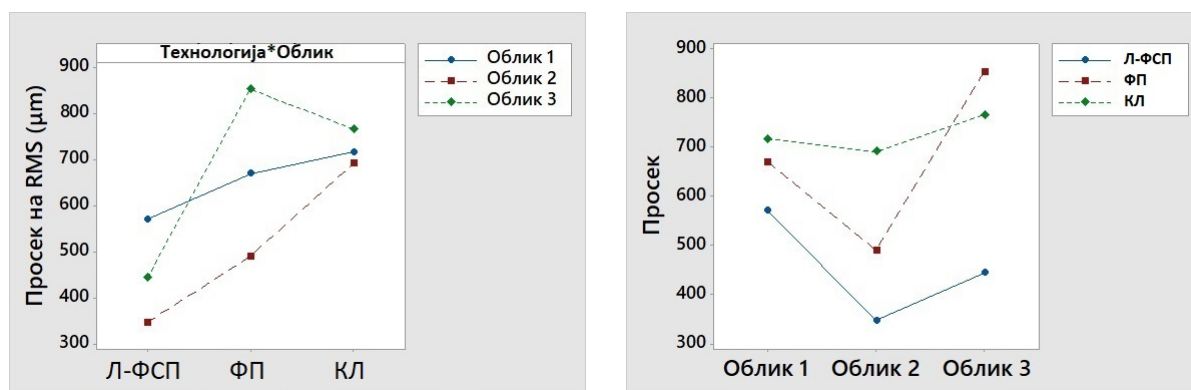
Со анализа на графичките резултати преку Сликите 4.9 и 4.10 се заклучува дека разликите помеѓу анализираните фактори (технологија, облик) не се значајни, но се доволно приоритетни во случаи кога станува збор за различни комплексни облици кај денталниот мост.

За да се споредат резултатите со користење на ANOVA методот, преку general linear model (Müller 2012), вредностите се прикажани одделно во соодветните точки за технологија и облик. Табелата 4.5 ги презентира добиените податоци.

Табела 4.5: ANOVA резултати за меѓузависноста на технологијата и обликот.

Извор	DF	Adj SS	Adj MS	F-вредност	P-вредност
Технологија	2	123349	61675	6.10	0.061
Облик	2	53351	26675	2.64	0.186
Грешка	4	40464	10116		
Вкупно	8	217164			

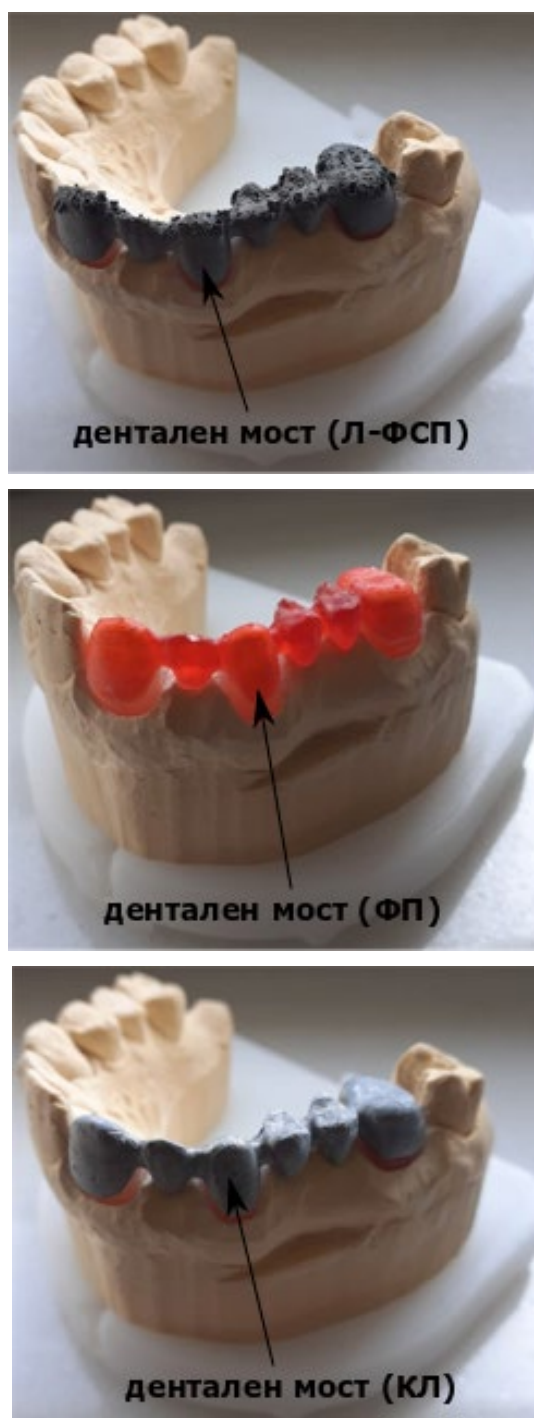
Од резултатите прикажани во Табела 4.5, може да се утврди дека за двата случаи (технологија и облик), P - вредноста е поголема од 0.05, што значи дека не постојат значајни разлики помеѓу избраните технологии и облици. Врз основа на овие сознанија, понатаму е важно да се анализира дијаграмот на зависност за RMS помеѓу презентираниите фактори во ова истражување, преку производот од технологијата и обликот (Слика 4.11 лево) и обратно (Слика 4.11 десно).



Слика 4.11: (лево) Интеракција (технологијата и облик); (десно) интеракција (облик и технологијата).

Она што може да се утврди од дијаграмот прикажан на Слика 4.11 лево, е дека разликата кај Облик 2 е повеќе зависна од технологијата, бидејќи промените од Л-ФСП во ФП и КЛ водат кон континуирано зголемување на неточноста, што не е случај со Облик 1 и Облик 3. Облик 1 се карактеризира со зависност од технологијата која има помали разлики и без значителен пораст на неточноста, додека Облик 3 има пораст на неточноста во преминот од Л-ФСП во ФП технологија, што значително влијае на падот на точноста во КЛ. Од Сликата 4.11 десно може да се види дека технологиите се исто така зависни од избраниот облик. Обликот 2 кај сите три технологии е подобрен во споредба со Облик 1 и Облик 3. Од прикажаните анализи, може да се заклучи дека денталниот мост произведен со Л-ФСП има повисока точност за сите три облици, споредено со ФП и технологиите на КЛ. Анализа го покажува значењето на факторите

кои влијаат врз точноста на денталниот мост произведен со три различни технологии. Се прави споредба на три тест модели со РМ со цел да се види значењето и влијанието на технологијата и обликот врз крајниот резултат. На крајот, направена е практична споредба на денталните мостови врз импровизирана вилица со носачи. Тоа е направено во денталната лабораторија Alp Dental (Косово). Денталните мостови, поставени на импровизирана вилица со носачи се прикажани на Слика 4.12.



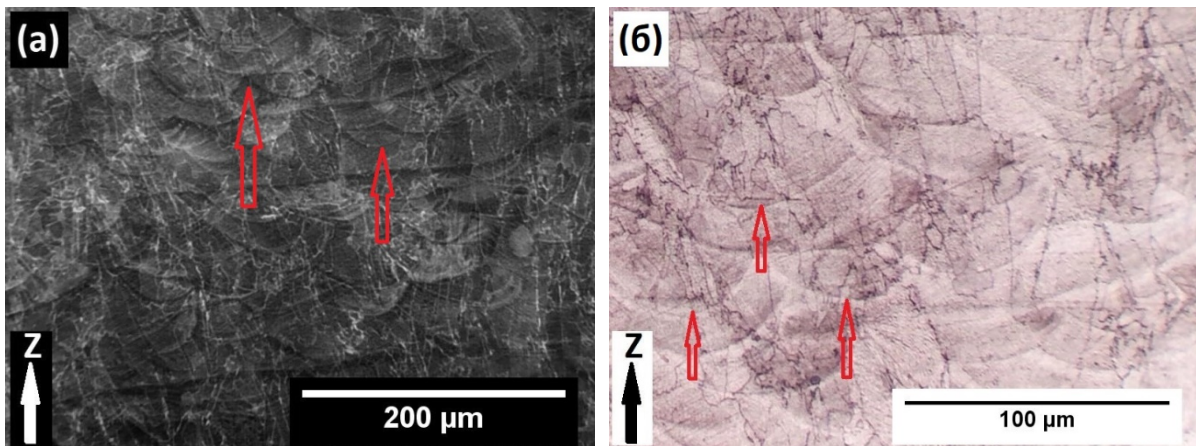
Слика 4.12: Дентален мост поставен на вилица со носачи: Л-ФСП; ФП; КЛ.

Од Сликата 4.12 може да се види поставувањето на денталниот мост во сите три случаи, односно три различни технологии на изработка. За време на практичното испитување заедно со забниот техничар, утврдено е дека моделот произведен со Л-ФСП технологија подеднакво се совпаѓа кај сите три носачи, додека кај моделите изработени со ФП и КЛ технологиите ова совпаѓање не е подеднакво кај сите три носачи. Во контекст на последново, испитувано е благото отстапување, кое е многу важно за точноста, адаптивбилноста и функционалноста на денталниот мост во устата на човекот. Од практичната анализа, заклучуваме и докажуваме дека моделот произведен со Л-ФСП технологија е поточен отколку моделите изработени со другите две технологии.

4.1.3 Металографија на денталниот дел

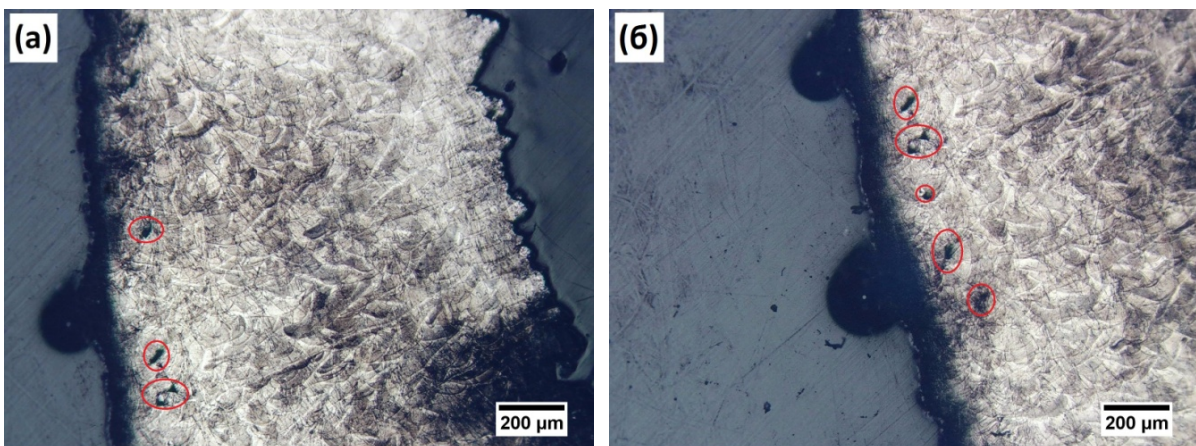
Кај примерот од областа на денталната медицина, направено е металографско испитување на двете производни технологии: АП и КЛ. За секој од случаите е користен материјалот Кобалт хром молибден (CoCrMo), но во различни форми (метален прашок за АП, и материјал во форма на мали цилиндри за процесот на леење). Постапката почнува со нагизување на примерокот (дентален мост) произведен со АП и КЛ технологија во раствор: 100 ml дестилирана вода, 10 ml азотна киселина (1.40), хлороводородна киселина (1.19) и железен (III) хлорид. Комплетното време на нагизување е 5 до 6 минути. Микроструктурната карактеризација е направена со оптички микроскоп (ОМ) Carl Zeiss Jena Metaval (ZEISS GmbH, Германија), а резултатите се анализирани со користење на софтверот ImageJ (National Institutes of Health, САД). Изборот на овој пристап се должи на различниот облик на мостот и можната нееднаква температура за време на процесот, што влијае на микроструктурата.

Со користење на слики со различно зголемување може да се забележи областа на топење кај материјалот CoCrMo во случајот на користење на Л-ФСП. Тоа е прикажано на Слика 4.13. На Сликата 4.13а, може да се видат слоевите кои се формирани во текот на АП, во насоката на изработка, и карактеристичната морфологија како заварена врска (прикажано со црвени стрелки), како и ефектот на преклопување на слоевите. На Сликата 4.13б, црвените стрелки ги претставуваат границата на областа на топење и јадрото на областа на топење се гледаат од горе.



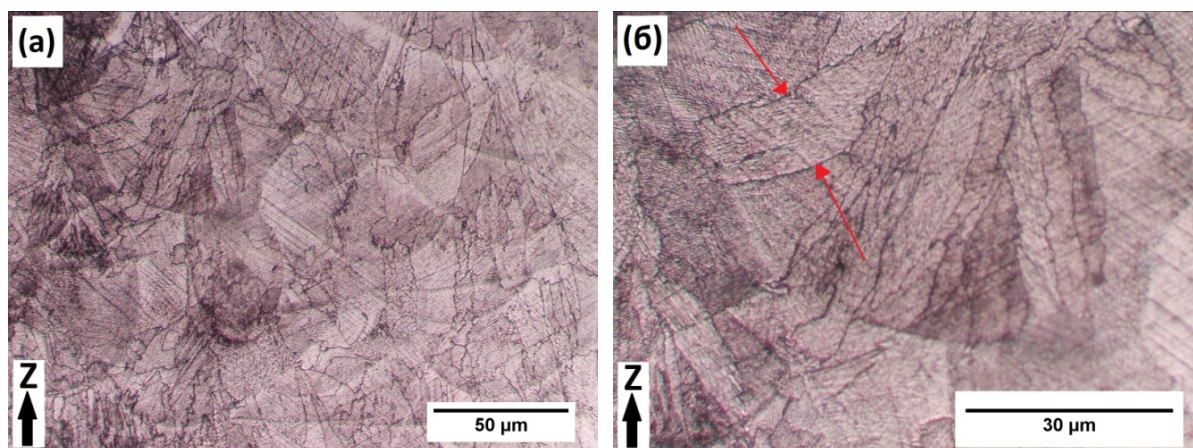
Слика 4.13: Оптички слики на синтеруван CoCrMo во насоката на изработка Z: (а) зголемување (50x) и (б) зголемување (100x).

Сликата 4.14а и б прикажува фотографии (зголемување 40x) без порозност на структурата, освен на рабовите (означено со црвено) како резултат на многу тенкиот сид.



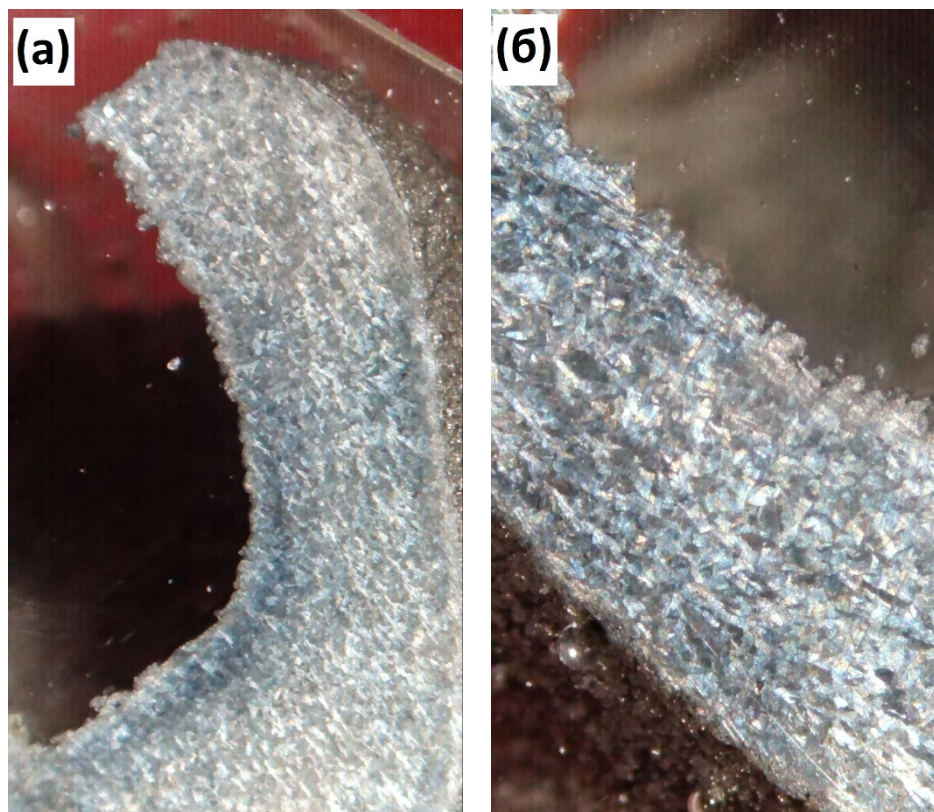
Слика 4.14: Слики (зголемување 40x) на порозноста на работ од синтеруван дентален мост од CoCrMo.

Изборот на оптимални процесни параметри, како што е истакнато кај Wang et al. (2018) пост процесирањето, имаат влијание врз хомогенизацијата и финоста на микроструктурата. Отсуството на порозност е важно за постигнување на добри механички карактеристики, бидејќи во спротивно присуството на пори и празнини со облик на клучалка може да предизвика кршење на структурата. Колку повеќе податоци се познати за микроструктурата, толку подобро може да се предвиди однесувањето на структурата. Во врска со ова, Сликата 4.15 прикажува две фотографии со различни зголемувања, кои ги покажуваат зрната во микроструктурата.



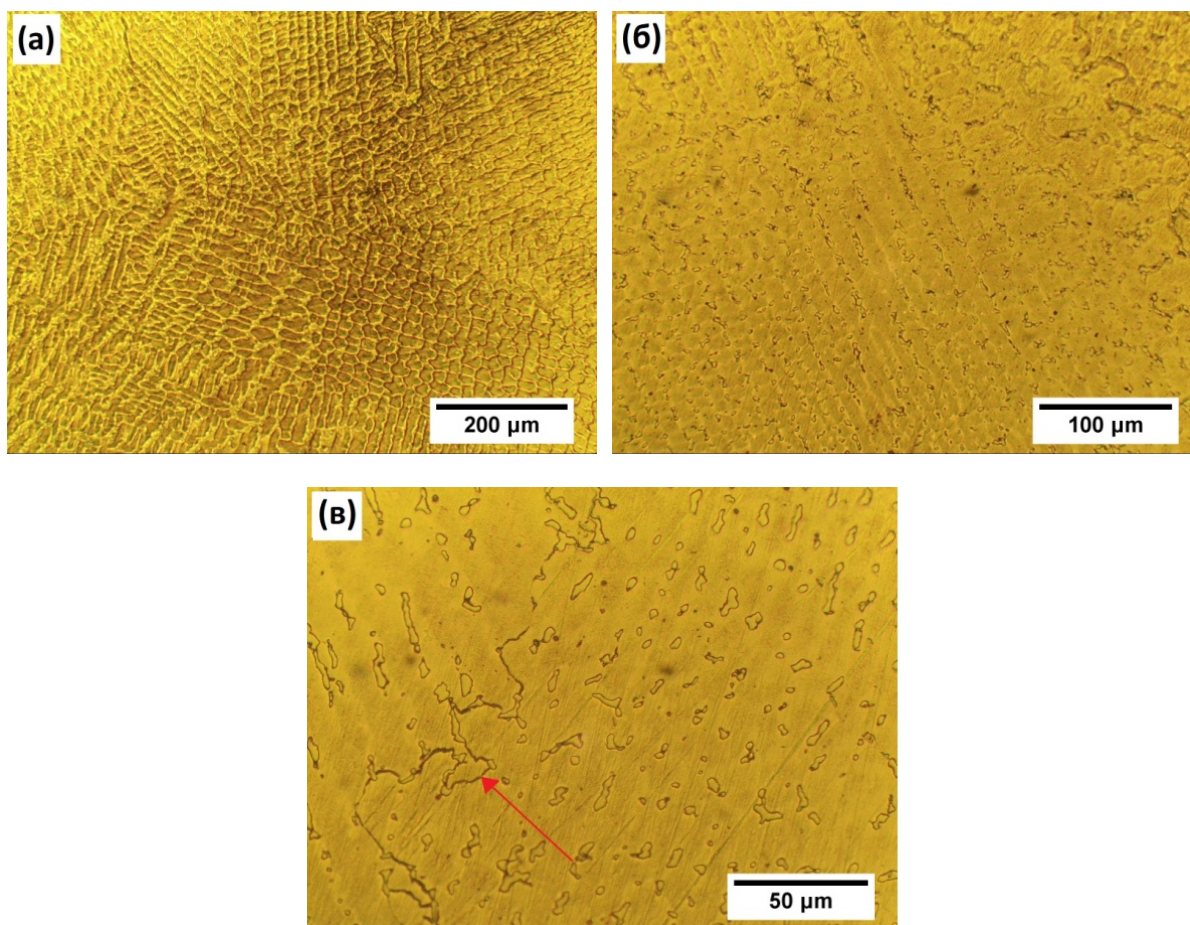
Слика 4.15: Микроструктура на синтеруван CoCrMo во насоката на изработка Z: (а) ниско зголемување (200x); (б) високо зголемување (500x).

На Сликата 4.15а, со користење на ниско зголемување, може да се забележат зрнестата структура и границите на областа на топење. На Сликата 4.15б, со користење на соодветно зголемување, границите на областа на топење се дисперзирани, а се препознаваат и границите на зрната (означени со црвени стрелки). За да се видат зрната со различно осветлување со користење на илуминација на темна област, прикажани се две фотографии со различно зголемување (Слика 4.16).



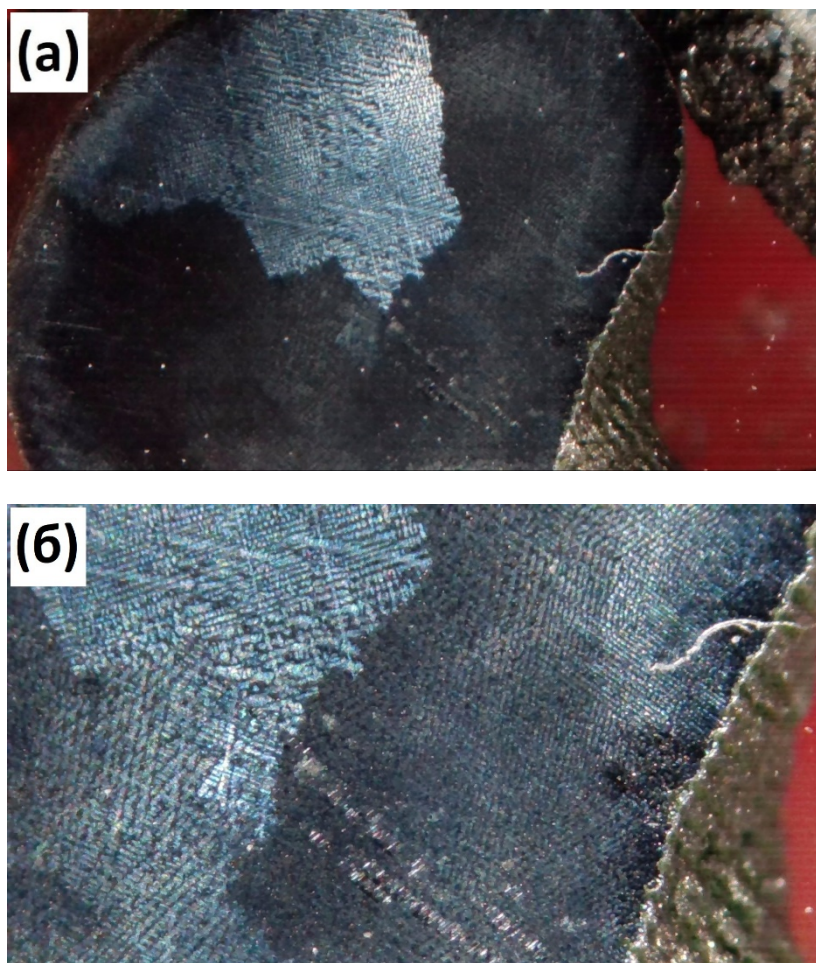
Слика 4.16: Темна област (пример на АП): (а) зголемување (80x); (б) зголемување (160x).

Бидејќи финалниот дел е произведен со две различни технологии, се препорачува да се направи анализа на микроструктурата и во случајот на КЛ. Направени се неколку видови истражувања од различни аспекти, во однос на испитувањето на материјалот CoCrMo при користењето на технологијата на леење (Podrez-Radziszewska et al. 2010; Sahin, Uzunoglu, and Sahin 2015; Abdullah et al. 2017; Szala et al. 2017; Fleming et al. 2019). Фотографиите од оптички микроскоп со различно зголемување направени на одлеанокот од CoCrMo, се прикажани на Слика 4.17.



Слика 4.17: Оптички фотографии на одлеанок од CoCrMo: (а) зголемување (50x); (б) зголемување (100x); (в) зголемување (200x).

На Сликата 4.17в, може да се забележат пукнатини (празнини) помеѓу зрната (различни ориентации на кристализација), каде што црвената стрелка ја покажува линијата долж микроструктурата. Врз основа на резултатите, кај КЛ, не е присутна никаква порозна структура и може да се очекуваат добри механички карактеристики. На крајот, како што е тоа случај и за примерот со АП, прикажана е темна област со различно зголемување (Слика 4.18).



Слика 4.18: Темно поле (пример на КЛ): (а) зголемување (80x); (б) зголемување (160x).

На Сликата 4.18, може да се види дендричните гранки и разгранувања во различни правци на кристализација. Целото истражување и металографијата на денталниот делови е направено во лабораторијата на Машинскиот факултет во Скопје на Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ (Република Северна Македонија).

Од двете анализи за случаите на АП и КЛ со користење на CoCrMo, може да се заклучи дека микроструктурата на делот од CoCrMo произведен со технологијата на Л-ФСП се разликува од онаа кај делот произведен со КЛ, како што е посочено од (Takaichi et al. 2013; Wu et al. 2014; Koutsoukis et al. 2015). Han, Sawada, et al. (2018), утврдиле дека постои разлика во микроструктурата помеѓу СЛТ и леењето, при што СЛТ се карактеризира со релативно хомогено распределени зрна. Врз основа на споредбата на механичките карактеристики, предничи СЛТ во однос на режењето и леењето (Kim et al. 2016).

4.1.4 Процес на производство на индустрискиот дел

За производство на ист дел (50% НМ), избрани се две технологии, АП и CNC обработка. Л-ФСП процес е реализирано со машината Renishaw AM 400 (Renishaw plc, Велика Британија) (Слика 2.21, Точка 2.2.4). За АП користен е материјалот AlSi10Mg, додека за CNC производството со машина со 3 оски, користена е машината YCM (Yeong Chin Machinery, Кина) и материјалот алуминиумска легура 6082. Хемискиот состав на материјалите е прикажан во Табела 4.6.

Табела 4.6: Хемиски состав на материјалите.

Елемент (маса-%)	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Zn	Mn	Cu
AlSi10Mg*	Balance	9-11	0.25-0.45	0.25	0.15	0.1	0.1	0.05
Алуминиумска легура 6082**	Balance	0.7-1.3	0.6-1.2	0-0.5	0-0.1	0-0.2	0.4-1	0-0.1

* Renishaw material datasheet.

** CNC Direct and High Graded Metals material datasheet.

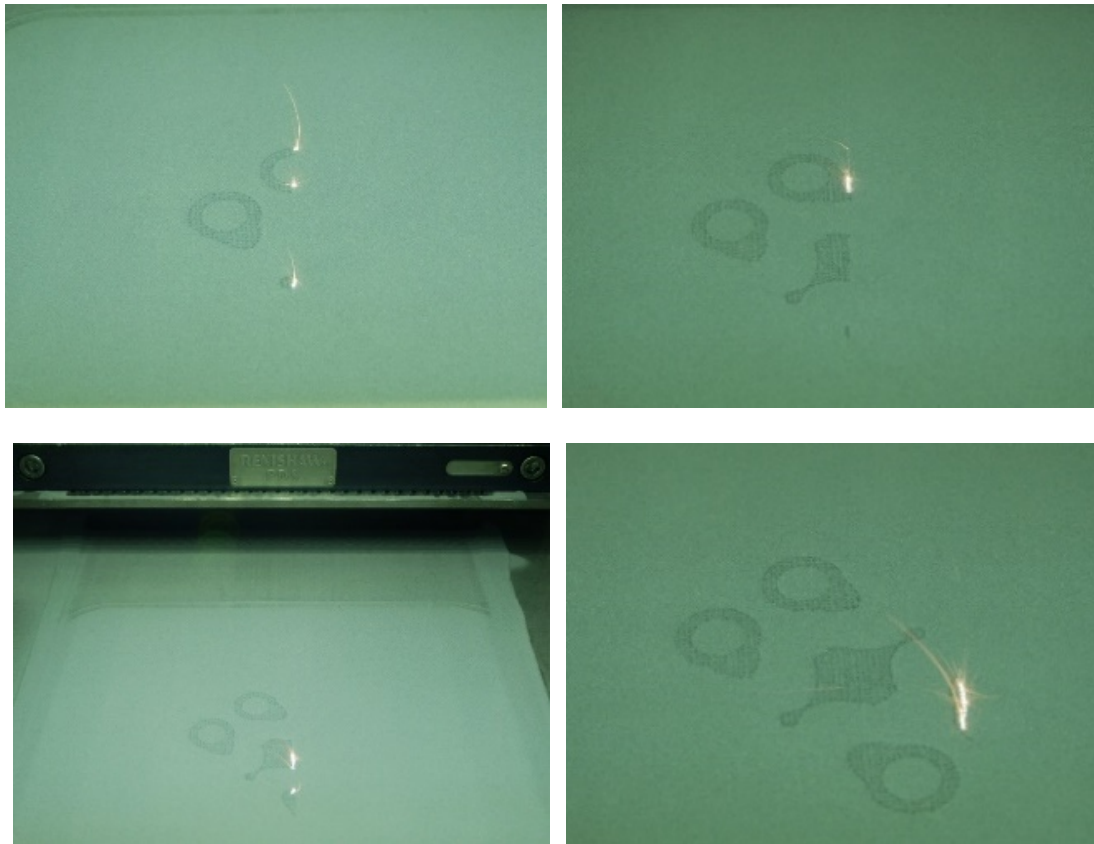
Покрај елементите во хемискиот состав прикажани во Табелата 4.6, AlSi10Mg содржи и други елементи како, N (0.2%), O (0.2%), Ni (0.05%), Pb (0.02%), и Sn (0.02%) кои не се присутни кај алуминиумска легура 6082.

Производната постапка во АП почнува со завршувањето на проектирањето и подготовката на STL моделот вклучувајќи ги ориентацијата на делот и изработката и генерирањето на поддржувачите. Овој процес започнува со подготовка на машината, односно полнење на садот со материјал, нивелирање на платформата за изработка и нејзино загревање до бараната температура, како и полнење на комората со инертен гас (аргон). Кога ќе бидат подесени параметрите на машината прикажани во Табела 4.7, кои се генерирани со анализите прикажани во Точките 3.3.3 и 3.3.4 за примерот од индустријата, започнува производниот процес со изработка на поддржувачите (Слика 4.19), па се до изработувањето на сите слоеви за целосно завршување на делот.

Табела 4.7: Процесни параметри за индустрискиот пример.

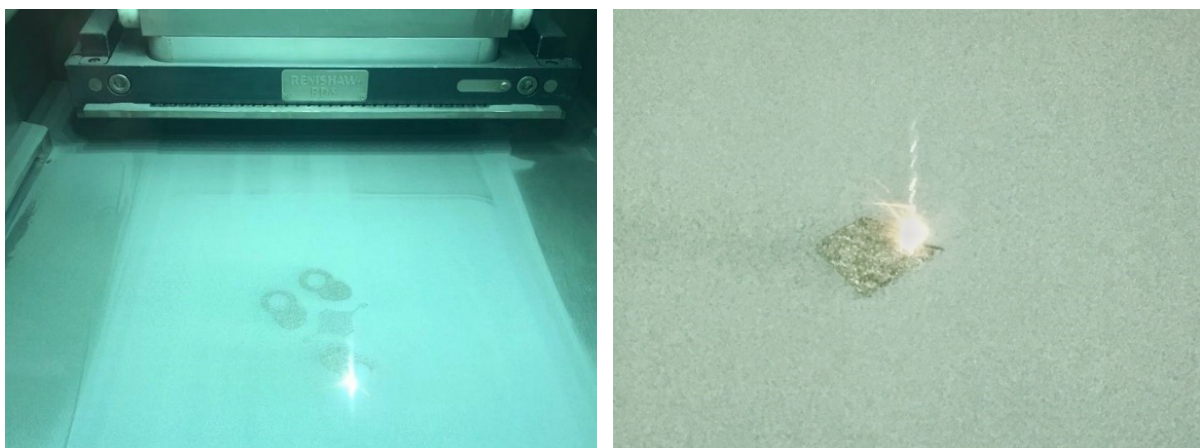
Дебелина на слојот (mm)	Моќност на ласерот (W)	Брзина на скенирање (mm/s)	Растојание на премините (mm)
0.03	395	1500	0.14

Подржувачите го држат делот за платформата за изработка и оневозможуваат дисторзија на делот за време на процесот на производство. Геометријата на подржувачите е генерирана во Точка 3.3.5.



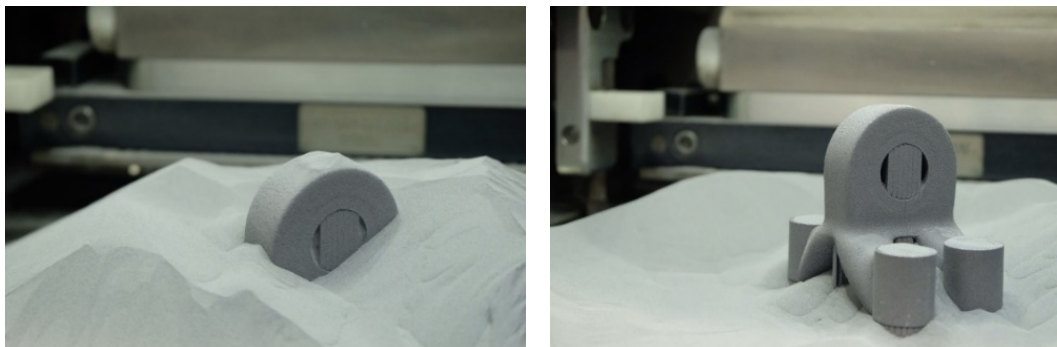
Слика 4.19: Л-ФСП процес (изработка на подржувачи).

Сликата 4.20, покажува некои елементи од процесот на фузија за време на создавањето на слоевите за изработка на физичкиот дел, согласно рабните принципи на машината за АП (процес на Л-ФСП).



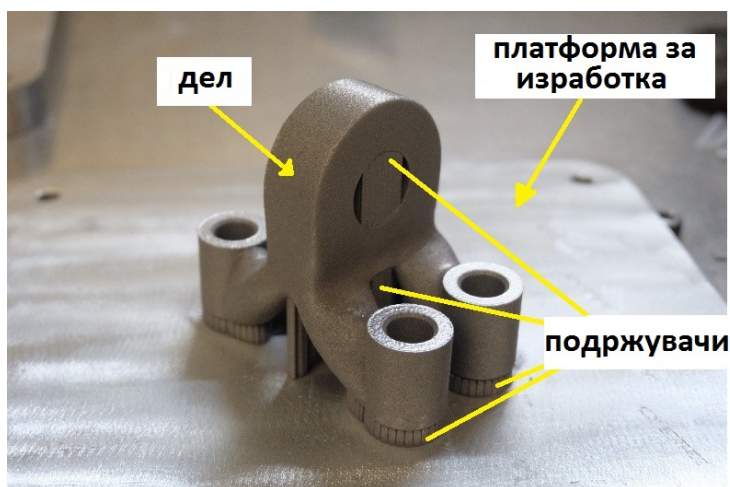
Слика 4.20: Процес на фузија кај Л-ФСП.

По завршувањето на процес на производство според 3D CAD моделот, делот мора да помине низ процесот на отстранување на прашокот кој го покрива целиот дел до максималната височина. Некои од фотографиите се прикажани на Слика 4.21.

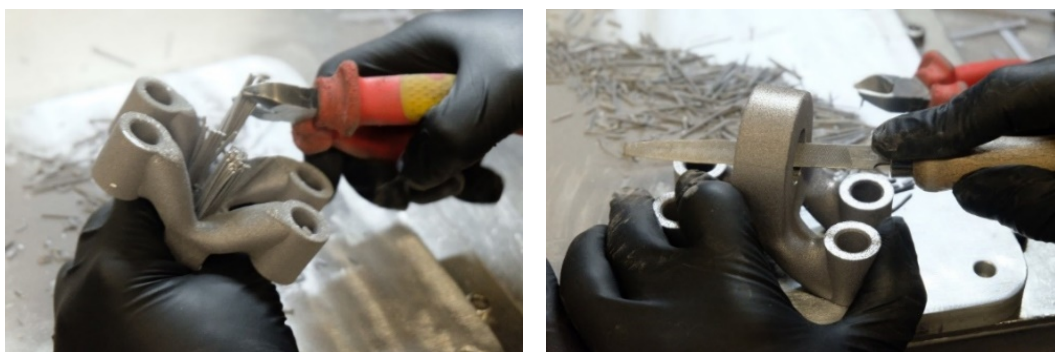


Слика 4.21: Отстранување на прашокот од платформата за изработка.

Отстранувањето на прашокот (Слика 4.22) го овозможува следниот чекор, а тоа е процесот на отстранување на подржувачите (Слика 4.23). Овој процес е моделиран и симулиран кај термичките и статичките макро анализи (Точка 3.3.6).



Слика 4.22: Делот заедно со подржувачите поставен на платформата за изработка.



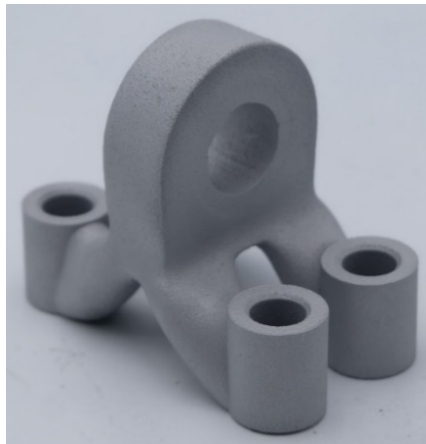
Слика 4.23: Рачно отстранување на подржувачите со отсекување од платформата за изработка.

Кога подржувачите ќе се отстранат од делот, неопходно е да се примени пескарење со корунд, за да се исчистат и најмалите остатоци од подржувачите но и од други нечистотии. Овој процес се користи исто така и за полирање на површините на делот. Станува збор за механичко третирање на делот со зрна од корунд (природен кристален оксид на алуминиумот) како абразивно средство вдувувано под висок притисок (Слика 4.24).



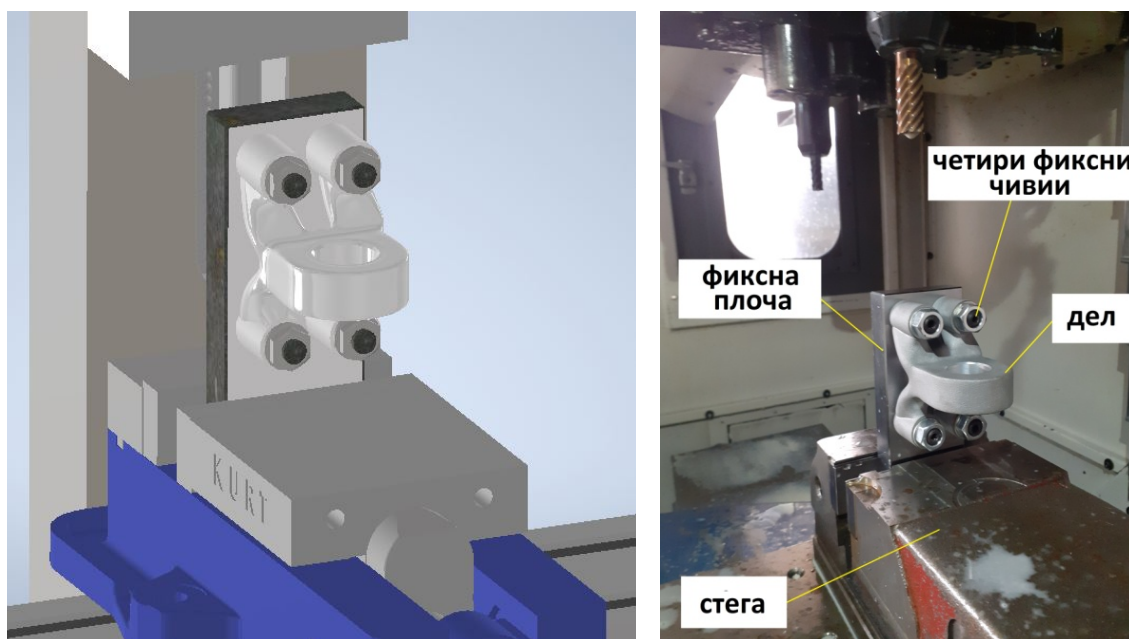
Слика 4.24: Пескарење со корунд процес.

Готовиот дел е прикажан на Сликата 4.25.



Слика 4.25: Индустриски дел произведен со АП (без завршна операција).

Целата постапка на производство е комплетирана во Additive 3D (Франција). Сите податоци и фотографии се снимени во текот на процесот. Покрај тоа, барањето е делот да биде произведен исклучиво според инструкциите и параметрите од анализите направени со моделирање и симулација, кои се прикажани во Точката 3 и се однесуваат за индустрискиот дел. Понатаму, заради бараната толеранција за централниот отвор $\varnothing 25J6$, се бара помал отвор од страна на производителот. CAD моделот на склопот и физичкиот дел поставен на машината за обработка на отворот, се прикажани на Слика 4.26.



Слика 4.26: Завршна операција за централниот отвор: (лево) CAD склоп; (десно) физички дел произведен со АП поставен на машината.

Сите делови за предложеното решение и изработката на отворот се направени во Tools Factory “PLUS” А.Е (Косово). Готовиот дел, вклучувајќи ја и завршната операција, е прикажан на Сликата 4.27.



Слика 4.27: Готов индустриски дел произведен со АП.

Делот е успешно произведен согласно бараните технички димензии и толеранции, и истиот е функционален за практична употреба.

Покрај производството со АП, истиот дел е произведен и со класично производство, поконкретно со CNC машина со 3 оски. Во овој случај, следена е вообичаената производна постапка, почнувајќи од сечењето на почетното парче, избор на алатите, подготовка на САМ програмата, локацијата на нултата точка, и центрирање на делот. Процесот на глодање и дупчење е направен согласно генерираната САМ програма. Некои од алатите кои се користени за целиот процес и за операцијата на глодање се прикажани на Слика 4.28.



Слика 4.28: CNC обработка: (лево) алати; (десно) операција на глодање.

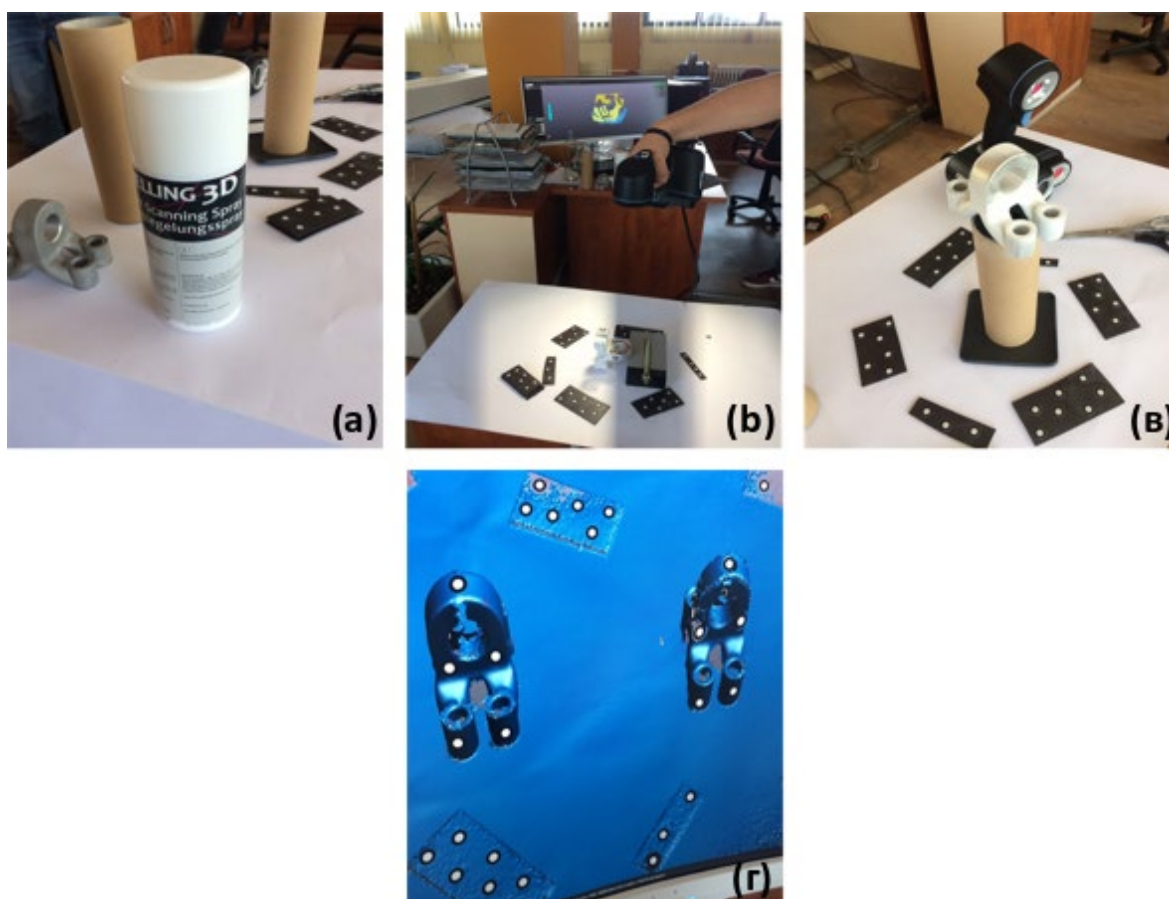
Делот е произведен во Tools Factory “PLUS” А.Е (Косово). Произведениот дел е прикажан на Слика 4.29.



Слика 4.29: Готов индустриски дел произведен со CNC обработка.

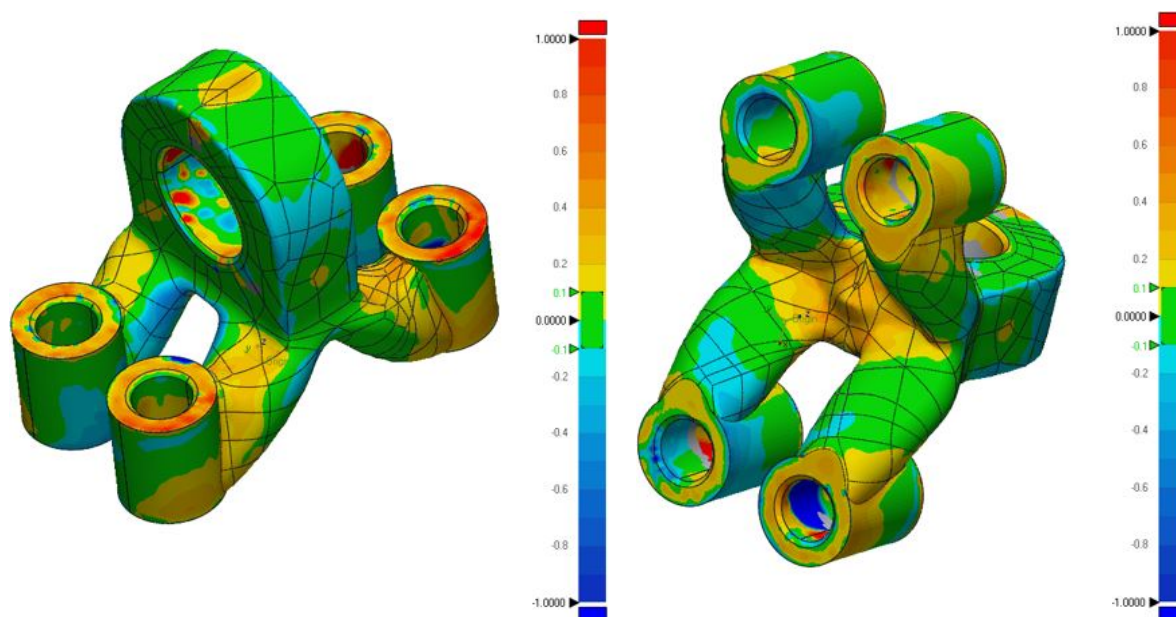
4.1.5 Индустриски дел (споредба на точноста)

Точноста е многу важен фактор, особено кај индустриските делови. Притоа, во некои случаи, се прави споредба на точноста во рамките на една производна технологија, а во некои случаи, како во овој пример, станува збор за споредба на точноста за различни технологии со кои е произведен еден ист дел, АП и CNC обработка. Денес постојат повеќе видови на методи на мерења (Calignano et al. 2020; Minetola et al. 2020; Catalucci et al. 2020). Во овој случај, избрана е методата на бесконтактно мерење со технологијата на структурирана светлина. За мерењето е користен скенер Go!SCAN 3D (Creaform, Inc., Канада). Пред да се започне со процесот на 3D скенирање, треба да се направат одредени подготовки, вклучувајќи: прскање на делот со антирефлектирачки материјал, поставување на ознаки за лоцирање на делот и просторот каде тој е поставен, и определување на потребните позиции за скенирање на целата геометрија на делот. Некои од фотографиите кои се однесуваат на подготовката се прикажани на Слика 4.30.

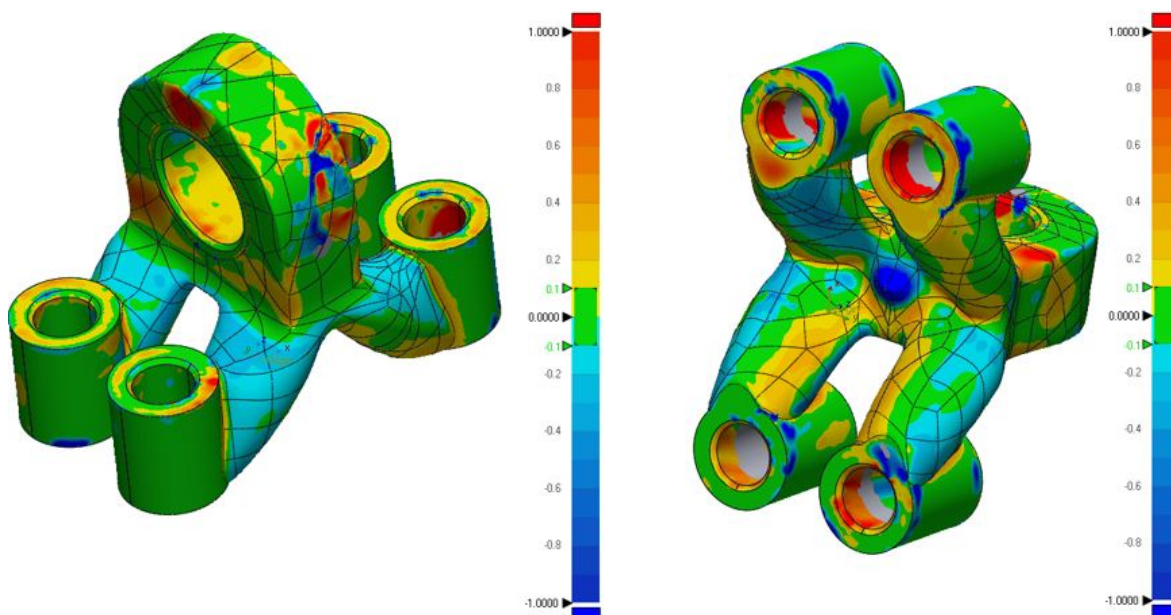


Слика 4.30: Процес на 3D скенирање: (а) антирефлектирачки спреј; (б) ознаки за локација на делот; (в) ознаки за локација во просторот; (г) податоци во облакот од точки после 3D скенирањето.

По завршување на процесот на 3D скенирање, податоците за геометријата се зачувани во софтверот. Процесот на 3D скенирање е реализиран во компанијата TechnoLogica (Република Северна Македонија).



Слика 4.31: 3D споредба на димензионалната точност на делот произведен со АП со референтниот модел.



Слика 4.32: 3D споредба на димензионалната точност на делот произведен со CNC со референтниот модел.

Во зависност од уредот и процес, моделот на облак од точки мора да биде исчистен од можни грешки и шумови кои произлегуваат од генерирањето на податоците.

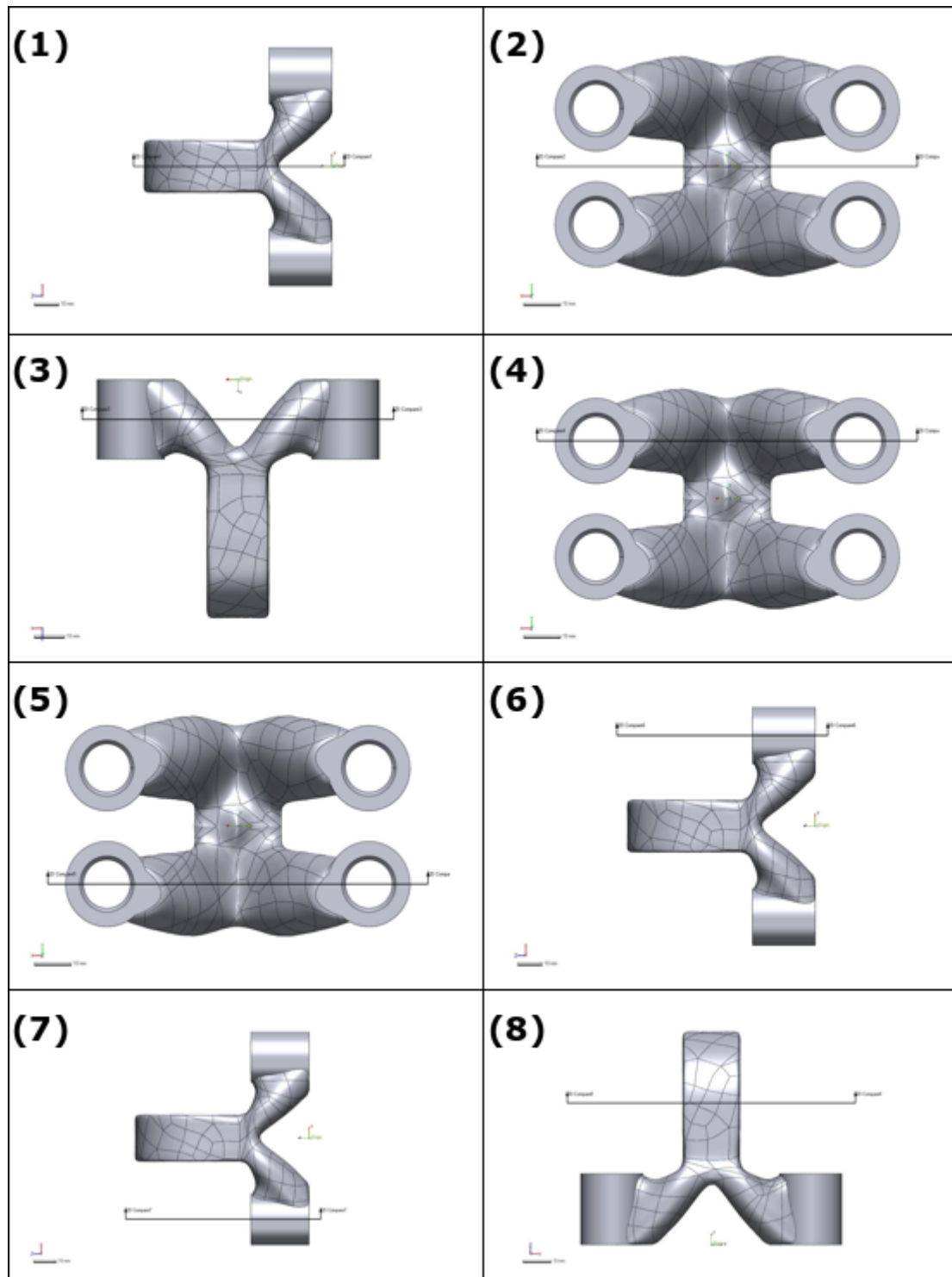
Двата STL модели, моделот за АП и моделот за CNC, ќе бидат споредени со референтниот 3D CAD модел (3D CAD PM). Исто како и во примерот со денталниот дел, применета е методата на најмали квадратни корени (RMS). За реализација на оваа задача, користен е софтверот Geomagic Control X (3D Systems, Inc., САД). Прво, споредбата е направена во 3D формат за целиот модел, со цел да се види разликата помеѓу АП и CNC. Сликата 4.31 и Сликата 4.32, ја покажуваат визуелната споредба помеѓу 3D CAD PM-АП и 3D CAD PM-CNC соодветно.

Податоците за 3D споредбата помеѓу 3D CAD PM-АП и 3D CAD PM-CNC се прикажани во Табелата 4.8.

Табела 4.8: Податоци за 3D споредба со референтниот модел за индустрискиот дел.

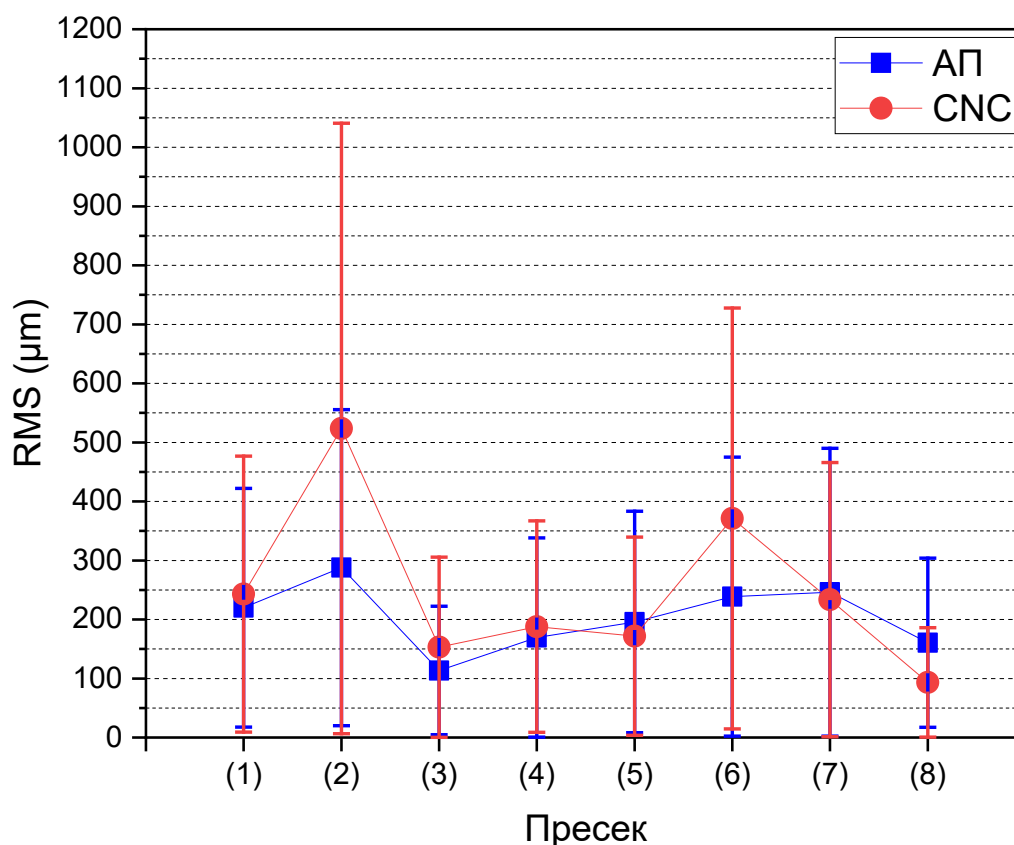
	АП пример	CNC пример
Мин.	-6.5707	-6.5817
Макс.	6.5756	6.563
Прос.	0.0372	0.0385
RMS	0.3264	0.5847
Станд. отст.	0.3242	0.5834
Варијација	0.1051	0.3404
+Просек	0.2099	0.2315
-Просек	-0.1364	-0.1888
Вн. Тол.(%)	45.0112	49.8075
Над. Тол.(%)	54.9888	50.1925
Горна Тол.(%)	32.5115	30.2109
Долна Тол.(%)	22.4772	19.9815

Од Табелата 4.8, може да се заклучи дека делот произведен со АП има повисока точност од делот произведен со CNC обработка. Ова се должи на фактот што вредноста на RMS за АП примерот е 0.3246 mm, додека за CNC примерот е 0.5847 mm. Кога станува збор за точноста, секогаш се повикуваме на сложената геометрија која покрива најголем дел од површината на делот и која има приоритет при истражувањето. Бидејќи конкретниот дел има сложена геометрија, со цел да се зголеми доверливоста на споредбата помеѓу моделите, избрани се некои од позициите во референтните рамнини X, Y, Z, како опции за споредба во 2D простор на пресеци. Специфичните пресеци (1 до 8) се прикажани на Слика 4.33.



Слика 4.33: 2D пресеци за споредба со специфичната референтна рамнина.

Согласно пресеците прикажани на Слика 4.33, извршени се 2D споредбите за делот произведен со АП и CNC. Резултатите се добиени за секој пресек, при што за споредба се избрани само вредноста на RMS и стандардната девијација. Резултатите за соодветните пресеци се прикажани на Слика 4.34.



Слика 4.34: AP-CNC 2D споредба за специфични пресеци.

Врз основа на Сликата 4.34, може да се заклучи дека делот произведен со AP, во пресеците 1, 2, 3, 4 и 6, има повисока точност во споредба со делот произведен со CNC, додека делот произведен со CNC во пресеците 5, 7 и 8 има повисока точност во споредба со делот произведен со AP. Од оваа анализа произлегува дека 5 пресеци одат во прилог на AP, а 3 пресеци се во прилог на CNC, што докажува дека делот произведен со AP е поточен од делот произведен со CNC. Ова се должи на сложениот облик, при што алатите кои се употребуваат кај класичните технологии не можат прецизно да ги следат различните криви и неправилности. За разлика од класичните технологии, AP не се соочува со тој проблем, бидејќи не се потребни алати.

4.1.6 Металографија на индустриски дел

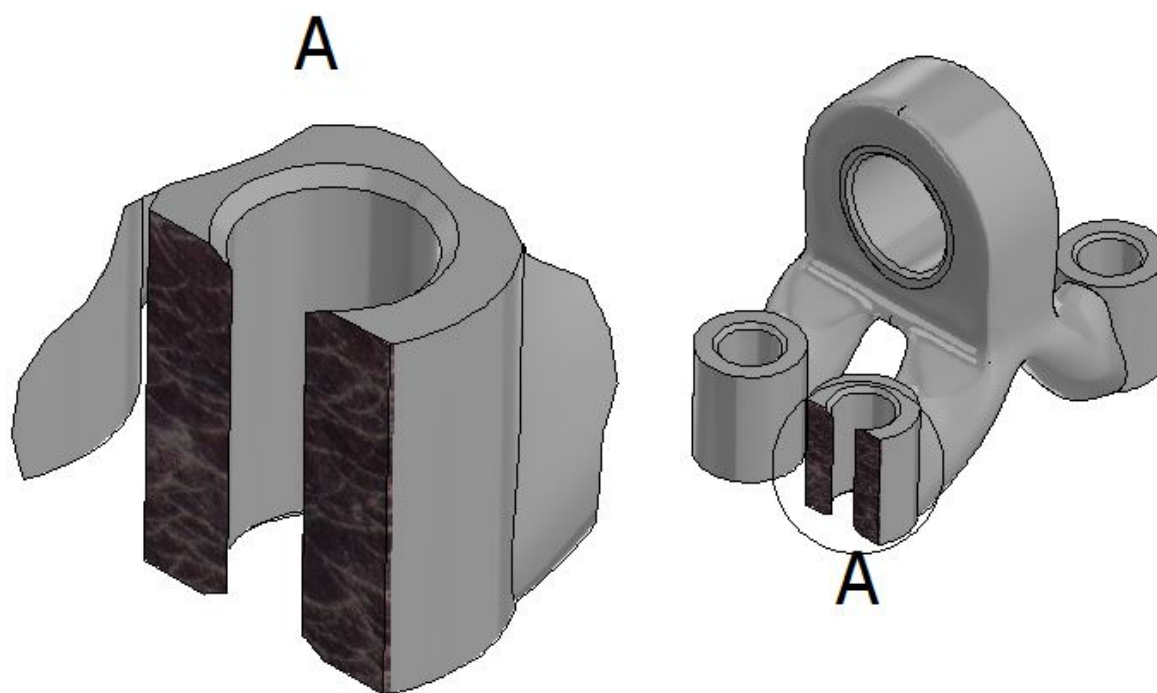
Слично на металографската анализа презентирана кај примерот на денталниот дел, направена е анализа и на индустрискиот дел. За разлика од претходниот пример, овде се разликуваат материјалот и компаративните технологии. Индустрискиот дел е произведен со AP и CNC обработка со користење на алуминиумски легури.

Поконкретно, кај АП е користен материјалот AlSi10Mg, додека за CNC обработка е користена алуминиумска легура 6082. И во двата случаи, применета е добро познатата постапка за полирање на примероците, со користење на Келеровиот реагенс како нагризувач. Неговиот состав е прикажан во Табелата 4.9.

Табела 4.9: Состав на Келеровиот реагенс.

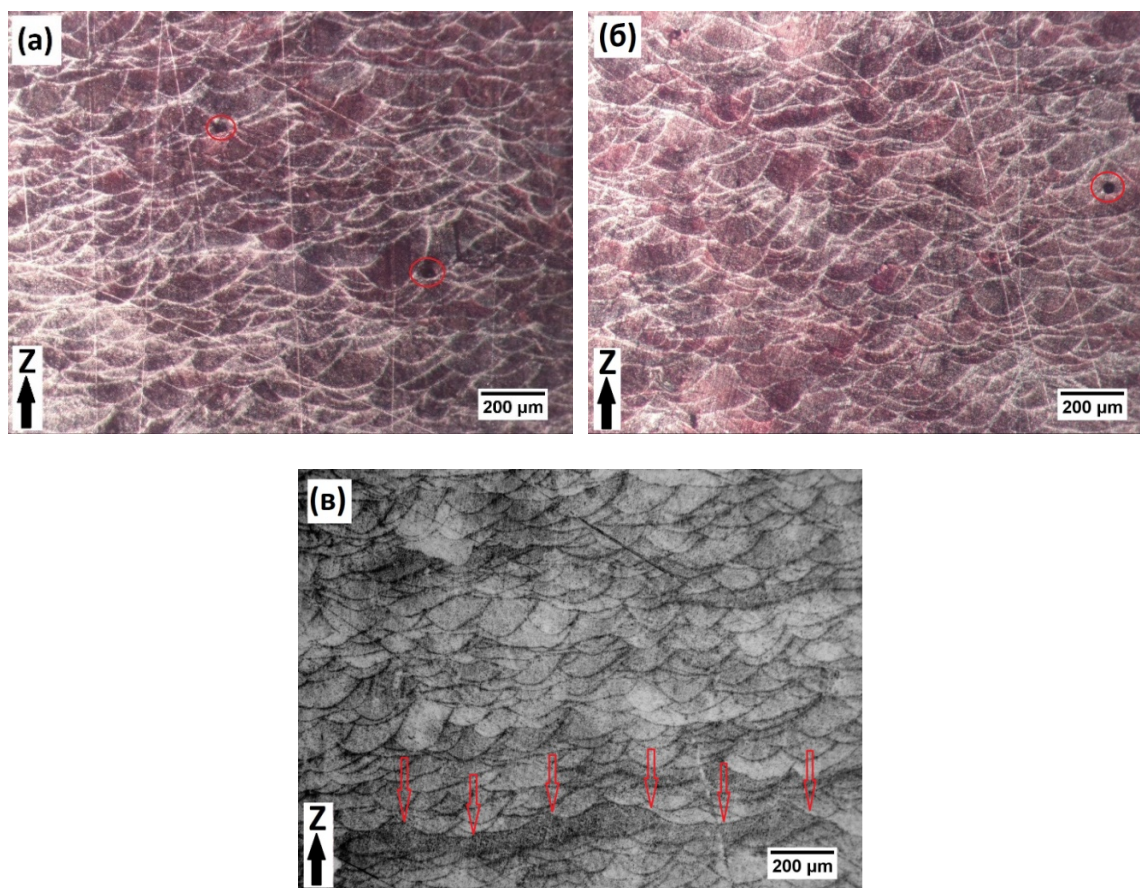
HF	HCl	HNO ₃	H ₂ O
1 ml	1.5 ml	2.5 ml	95 ml

Микроструктурната карактеризација е направена со користење на оптички микроскоп (ОМ) Carl Zeiss Jena Metaval (ZEISS GmbH, Германија), а резултатите се анализирани со користење на ImageJ (National Institutes of Health, САД) софтвер. Анализата на микроструктурата на индустрискиот дел за случајот на АП е направена со земање на примерок од конкретниот попречен пресек (Слика 4.35).



Слика 4.35: Конкретен попречен пресек на индустрискиот дел за металографската анализа.

За конкретната позиција, направени се три анализи. Првата е поврзана со областа на топење, втората се однесува на порозноста, а третата се однесува на општата микроструктура. Со користење на мало зголемување на сликата (25x) може да се забележи областа на топење во структурата на материјалот AlSi10Mg во постапката на изработка со Л-ФСП (Слика 4.36).

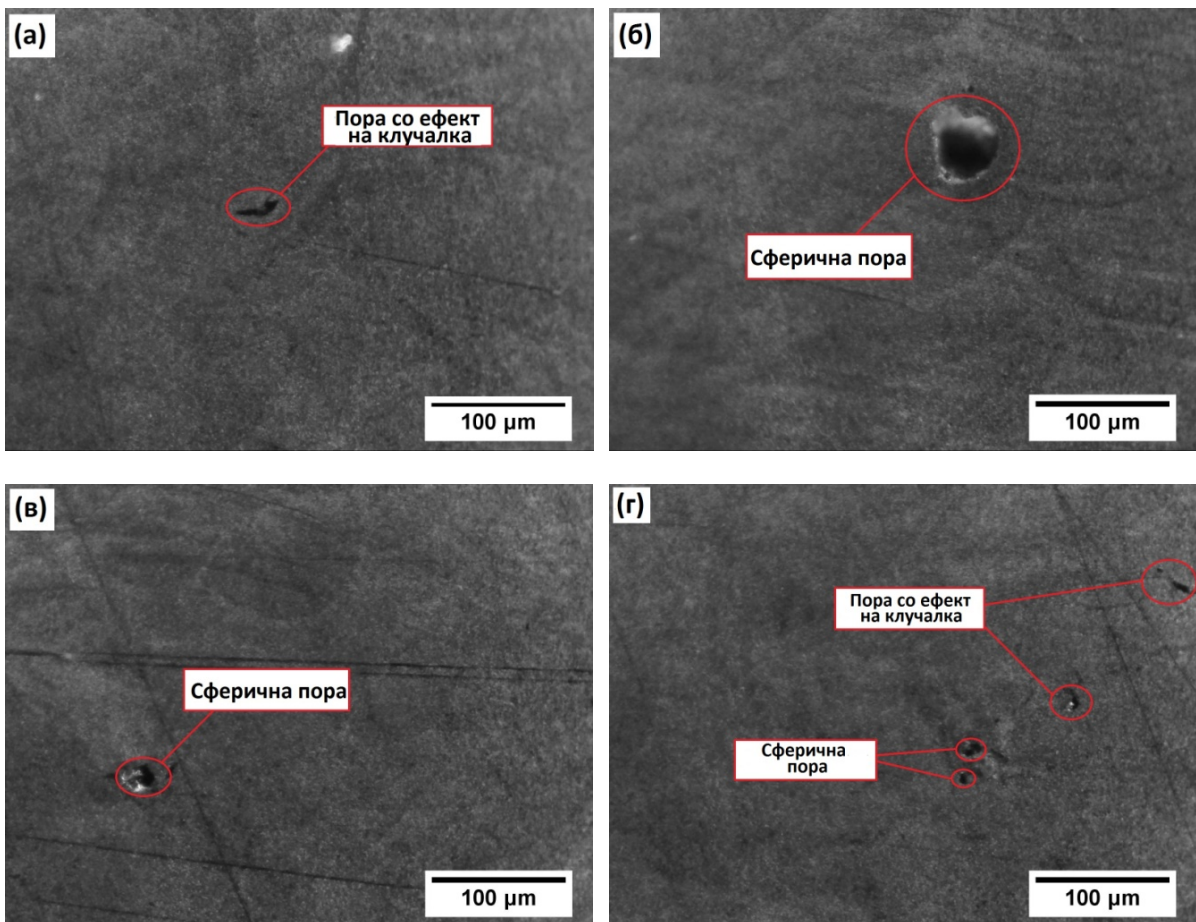


Слика 4.36: Оптички слики на AlSi10Mg (по изработката) во насоката на изработка Z: (а) и (б) сферични пори на водород (означени со црвено); (в) хомогена структура во еден слој (под црвените стрелки).

На Сликата 4.36, кај сите три погледи, може да се види дека областа на топење се протега истовремено и во Z насоката и странично. Исто така, забележливи се полу-елиптични форми на областа на топење, што потекнува од гаусовиот ефект (според равенката 2.12 во Точка 2.2.5) на ласерскиот сноп (Maamoun, Elbestawi, and Veldhuis 2018). Промената на обликот и големината на областа на топењето, зависи од процесните параметри (Krishnan et al. 2014). Притоа, растојанието на премините игра многу важна улога. Ако ова растојание се зголемува, тенденција е да се создава порозност како резултат на намалувањето на минувањата, додека во случај на намалување на растојанието на премините, се зголемува енергетската густина и може да се појави ефект на вртлог. Друг параметар кој влијае врз микроструктурата е брзината на скенирање. Кога брзината на скенирање се намалува, областа на топењето станува поширока, додека со нејзиното зголемување, се појавува преклопување на линиите на скенирање. Споменатите параметри се во корелација со густината на енергијата, која во овој случај е 62.69 J/mm^3 . Оваа вредност не ја надминува дозволената граница, наречена “висок

степен на густина”, презентирана во истражувањето на Maatoun, Xue, et al. (2018). Во врска со презентираниите слики, треба да се истакне дека се присутни одредени сферични пори на водород (Слика 4.36а, б), а исто така и некои слоеви со хомогена структура (Слика 4.36в), но, не низ целата структура. Густината на енергијата, изразена преку равенката 2.5 во Точката 2.2.5, ја диктира стапката на кристализација.

Сликата 4.37, прикажува некои фотографии (зголемување 100x) со порозност и структура со ефект на клучалка, кај дел изработен од материјалот AlSi10Mg, произведен со Л-ФСП.

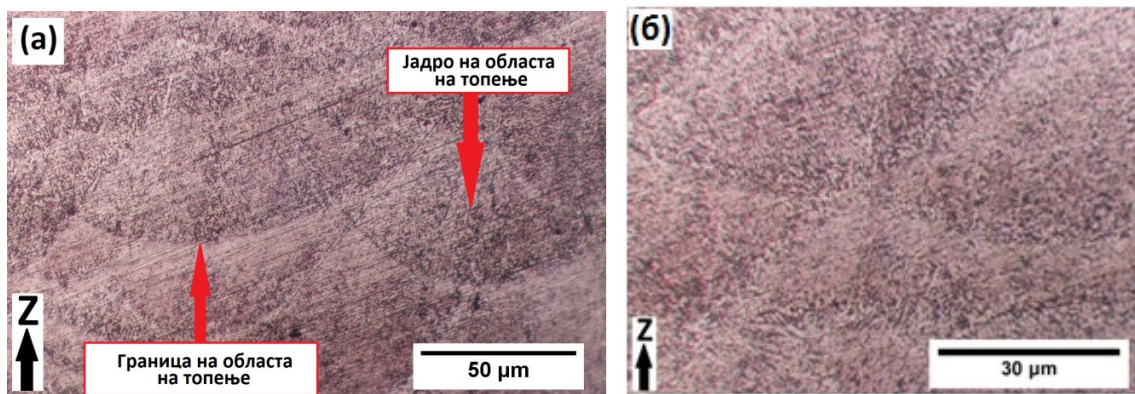


Слика 4.37: Некои слики (зголемување 100x) со порозност и структура со ефект на клучалка кај AlSi10Mg (по изработката) во различни точки од попречниот пресек.

Сликата 4.37, покажува порозна структура со ефект на клучалка и пори со сферични облици. На сликите 4.37а и г, се забележуваат ефекти на клучалка со неправилни форми и мали димензии, кои се појавуваат како резултат на нерастопениот прашок заради недоволната фузија, но тие се помалку присутни бидејќи ласерот има голема моќност (395 W). На Сликите 4.37в и г, се забележуваат сферични форми, при

што оние со помали димензии се припишуваат на заостанатите гасови во честичките од прашокот, додека во (б), големината на порите е приближно $50 \mu\text{m}$, што може да се смета како недоволна фузија. Како и да е, магнитудата на моќноста на ласерот 395 W , влијае врз структурата, на начин што нема многу пори со ефект на клучалка, но релативно високата брзина на скенирање 1500 mm/s , го намалува времето на изработка на делот.

Сликата 4.38, го прикажува процесот на изработка со Л-ФСП, за материјалот AlSi10Mg , при што микроструктурата е дендрична (во вид на разгранети гранки на дрво, кои растат од дното на областа на топење, каде што започнува топењето). Ова е вообичаено за леените делови кои не поминуваат низ процес на термичка обработка. Станува збор за механички слаба и кршлива микроструктура. Затоа, потребен е процес на синтерување.

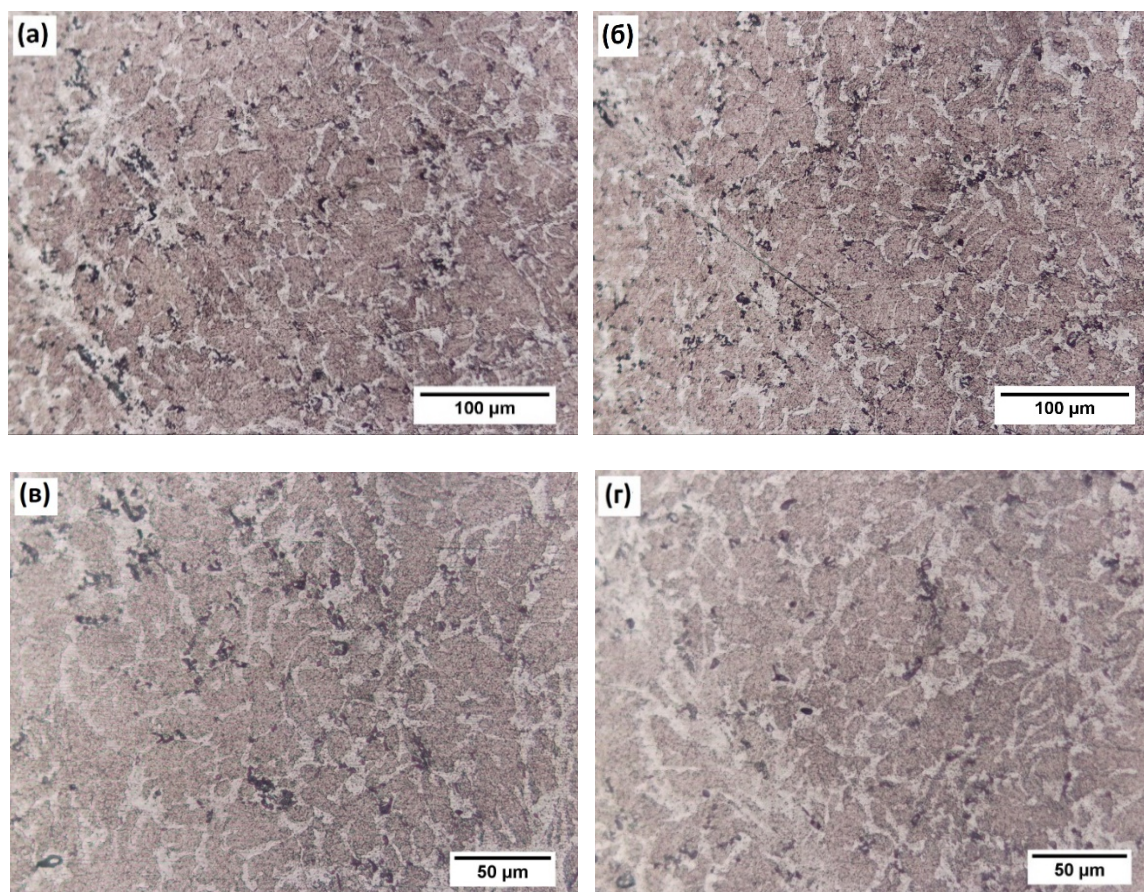


Слика 4.38: Микроструктурата на AlSi10Mg по изработката во Z насока на изработка: (а) мало зголемување ($200\times$); (б) големо зголемување ($500\times$).

На Сликата 4.38а, се гледа границата на областа на топење и јадрото на областа на топење (означено со црвени стрелки). Во основа, микроструктурата на AlSi10Mg треба да се набљудува со поголемо зголемување ($500\times$), со цел истата да се препознае, што е јасно покажано на Сликата 4.38б. Од анализите може да се заклучи дека микроструктурата е многу важна и влијае врз механичките карактеристики на делот произведен со Л-ФСП. Ова е исто така докажано и преку анализата направена од Kemp et al. (2012), каде што порозноста на граничните линии влијае на појавата на лом при испитувањето на истегање. Read et al. (2015), докажале дека нерастопениот прашок влијае врз порастот на локалните пукнатини. Larrosa et al. (2018), направиле корелација помеѓу микроструктурата и механичките карактеристики, при што е заклучено дека порозноста треба да се смета како фактор во анализите на замор на материјалот. Uriati et al. (2020), покажале дека микроструктурата е поврзана со потенцијалните дефекти кај

затегнувачката цврстина на материјалот. Повисокиот процент на порозност, придонесува за пониска максимална затегнувачка цврстина на материјалот. Затоа, процесните параметри се од особена важност за добивање на густина на енергијата која ќе резултира во добри механички карактеристики.

Покрај анализата која е направена за случајот на АП и CNC обработката е исто така предмет на металографска анализа. Притоа, технологијата за производство и начинот на обработка се разликуваат од случајот со АП. Направени се неколку видови на истражувања во однос на различните аспекти на испитување на алуминиумска легура 6082 (Wan et al. 2014; Jakobsen 2016; Fujda 2017; Chang, Hung, and Lui 2019; Xu et al. 2020). Примерокот за металографската анализа е земен од сегмент од произведениот дел. Фотографиите од оптичкиот микроскоп со различни зголемувања, за алуминиумска легура 6082, се прикажани на Слика 4.39.



Слика 4.39: Оптички слики на алуминиумска легура 6082: (а) и (б) зголемување (100x); (в) и (г) зголемување (160x).

Сликата 4.39 (а, б, в, г), го покажува преминот помеѓу погрубата површина и пофиниот внатрешен регион. Исто така, може да се види дека цврстите честички од

втората фаза се пофини и похомогено се распоредени низ структурата. Грубите цврсти честички се растворени и раширени низ матрицата со пофините честички. (Surmen et al. 2018). Целото испитување на металографијата на индустрискиот делови е направено во лабораторијата за металографија и испитување без разорување на Машинскиот факултет во Скопје, УКИМ (Република Северна Македонија).

По анализите направени за двата случаи (AlSi10Mg и алуминиумската легура 6082), може да се заклучи дека микроструктурата се разликува. Ова води до различни зајакнувања и различни подобрувања на механичките карактеристики. Групата легури бxxx (за CNC) е слични на челикот, тие се зајакнуваат во процесот на термичка обработка (зголемување на тврдината на цврстите честички). Легуриите AlSi10Mg, се Al-Si легури за леење. Тоа се Al легури кои може термички да се третираат (Tosci et al. 2020; Hitzler et al. 2020). Крајните механички карактеристики се дефинирани со применетиот термички третман после топењето. Групата легури бxxx, имаат само еден механизам за постигнување на максималната затегачка цврстина преку термичка обработка, и тој е ограничен. Тој е повторувачки и секогаш се добива истиот стандарден производ. Како и да е, легуриите за Al-Si кои може термички да се третираат, може да ги подесат нивната затегачка цврстина и другите механички карактеристики, врз основа на начините на кој се спроведува термичката обработка после топењето (Sarentica 2019). Од примероците добиени со леење/или со Л-ФСП, со ист состав, може да се добијат сетови од различни карактеристики (добри, подобри и одлични). Кај групата легури бxxx, може да се добие (врз основа на хемискиот состав) само еден сет механички карактеристики, и може да се примени само еден вид на термичка обработка. Секоја од овие легури е наменета за специфичен производствен процес. Во основа, групата легури бxxx не можат да се леат, а Al-Si легуриите за леење не можат да се обработуваат со пластична деформација. Повикувајќи се на оваа споредбена анализа, може да се заклучи дека изработката на дел од AlSi10Mg, со процесот на Л-ФСП, може да се споредува со алуминиумската легура 6082 кај CNC, кај практични апликации, во случаите кога се познати максималното оптоварување и другите услови, и истите не ги надминуваат границите кои се зададени кај делот произведен со Л-ФСП.

5. ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ И СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА НА СЛОЖЕНИ ДЕЛОВИ

5.1 Економски модел

Важноста на економскиот аспект е суштинска за развојот на производот. Како дополнување на техничките барања, неопходна е анализата на економските аспекти и барањата на пазарот. Многу економски анализи и модели се веќе развиени за класичните производства, како што се формативното и субтрактивното производство. Но, истото не може да се каже и за АП, бидејќи во последните 20 години не се презентирани многу модели, анализи и истражување за определување на трошоци (Hopkinson and Dicknes 2003; Ruffo, Tuck, and Hague 2006; Ruffo and Hague 2007; Baumers et al. 2012; Lindemann et al. 2012; Rickenbacher, Spierings, and Wegener 2013; Costabile et al. 2017). Знаејќи дека АП (Л-ФСП процес) има различен работен процес од формативното и субтрактивното производство, моделите и пресметките исто така ќе се разликуваат. Секоја операција и секој фактор во процесот влијаат врз вкупните трошоци на делот. Еден таков модел е презентираан од Galati et al. (2020), каде се пресметани и измерени значителен број на процесни фактори и времиња на изведување на операциите. Овој економски модел е адаптиран за ова истражување, со одредени промени во структурата, номенклатурата, како и со додавање на некои трошоци. Кај цитираното истражување, трошоците за завршната обработка се лоцирани во проектниот дел на моделот, но во ова истражување, таа активност е прикажана одделно, со оглед дека не сите делови добиени со АП бараат завршна обработка. Во врска со ова, најголем дел од деловите произведени со АП се речиси со исти карактеристики како финалниот дел, а доколку се бара специфична толеранција и квалитет на површините, потребен е дополнителен процес на обработка. Во ова истражување, анализите на примери се од областа на денталната медицина и индустријата. Кај проектирањето и анализата на денталниот дел, вклучен е процес на РИ, и тоа треба да биде земено во предвид во моделот, како и трошоците за дизајн за индустрискиот дел.

Трошоците се поделени на директни и индиректни трошоци. Индиректните трошоци се базираат на трошоците надвор од процесот, кои вклучуваат амортизација на машините и другата опрема, административни трошоци, како и трошоци за закуп на просториите. Директните трошоци се базираат на трошоци поврзани со

производствениот процес, вклучувајќи ги трошоците за проектирање и РИ за конкретниот пример, трошоци за подесување на машините, трошоци за материјал, трошоци за производство, трошоци во пост производство и трошоци за завршна обработка. Вкупниот трошок, $C_{(ВКУПЕН)}$, е збир од индиректните и директните трошоци, и прикажан е со равенката како:

$$C_{(ВКУПЕН)} = C_{(ИНДИРЕКТЕН)} + C_{(ДИРЕКТЕН)} \quad (5.1)$$

Индиректниот трошок се пресметува како збир од амортизацијата и другите индиректни трошоци кои се поврзани со вкупното работно време, помножен со времето на изработка $T_{(изработка)}$, што го претставува вкупното време на производство на делот. Индиректниот трошок може да се пресмета како:

$$C_{(ИНДИРЕКТЕН)} = \left(\sum D + \frac{\sum \text{индиректен трошок}}{T_{(работно време)}} \right) \cdot T_{(изработка)} \quad (5.2)$$

Пресметката на амортизацијата на машината D , како трошок на час, е прикажана со следната равенка:

$$D = \frac{C(1+I)^n}{n \cdot H_{(годишно)}} \quad (5.3)$$

каде што C е цената на машината или уредот, I е каматна стапка, n го претставува бројот на години во експлоатација, и $H_{(годишно)}$ се работните часови годишно.

Пресметката на директниот трошок вклучува специфични трошковни елементи за РИ и АП, и се определува согласно равенката:

$$C_{(ДИРЕКТЕН)} = C_{(ПР) \text{ или } (РИ)} + C_{(ПО)} + C_{(М)} + C_{(ПРЗ)} + C_{(ПП)} + C_{(З)} \quad (5.4)$$

каде што $C_{(ПР) \text{ или } (РИ)}$ е трошокот за проектирање или РИ, во зависност од тоа што е применето, $C_{(ПО)}$ е трошокот за подесување на машините, $C_{(М)}$ е трошокот за материјал, $C_{(ПРЗ)}$ е трошокот за производство, $C_{(ПП)}$ е трошокот во пост производство и $C_{(З)}$ е трошокот за завршна обработка.

- **Трошок за проектирање.** Може да се дефинира како потребно време за проектирање и оптимизирање на геометријата. Бидејќи од проектирањето за производство мора да се добие оптимизирана геометрија, $C_{(ПР)}$ исто така укажува на времето кое е потрошено за комплетирање на работата (сите активности вклучувајќи и изработка на STL модел, ориентација, изработка на подржувачите,

определување на пресеците и подесување на работните параметри. $C_{(ПР)}$ може да се пресмета на следниот начин:

$$C_{(ПР)} = \frac{1}{N_{(пар)}} \left[\left(C_{пр} + \frac{C_{CAD}}{T_{CAD}} \right) T_{пр} + \left(C_{пр} + \frac{C_{CAM}}{T_{CAM}} \right) k_1 T_{(работа)} \right] \quad (5.5)$$

каде што $C_{пр}$ е цената на проектантот по час, C_{CAD} и C_{CAM} се трошоците по корисник за годишна лиценца за софтверот за CAD моделот и подготовка на работата, соодветно. T_{CAD} и T_{CAM} се број на часови на користење на софтверот на годишно ниво, за CAD моделот и подготовка на работата, соодветно, $T_{пр}$ е времето потребно за проектирање, а $T_{(работа)}$ е времето потребно за подготовка на работата, кое е вреднувано преку k_1 , што е сооднос помеѓу волуменот на делот $V_{(O+A+S)}$ и вкупниот волумен на работата $V_{(работа)}$. k_1 се користи за да се утврди уделот на изработката на делови со различна геометрија во рамките на истата работа. k_1 има во предвид дека колку е поголем волуменот на делот, потребно е повеќе време за изработка. $N_{(пар)}$ го означува вкупниот број на парчиња од одреден дел кои треба да бидат произведени.

- **Трошок за РИ.** Во случаите кога делот веќе постои, и таквата геометрија сакаме да ја конвертираме во 3D CAD модел за понатамошно користење, тогаш е потребно да имаме информации за геометријата на делот или специфичниот облик. Овие информации главно се добиваат од безконтактни уреди за мерење, односно во случајов тоа е 3D скенер. Добиениот модел од облак со точки, може да се третира во неколку фази, а на крајот се добива 3D CAD моделот. Овој процес се именува како РИ. Создадениот модел, по преобрати во STL, може да се користи за процес на АП. Равенката за пресметка на трошокот за РИ е:

$$C_{(РИ)} = \frac{1}{N_{(пар)}} \left[C_{(опер)} T_M + \left(C_{пр} + \frac{C_{CAD}}{T_{CAD}} \right) T_{пр} + \left(C_{пр} + \frac{C_{CAM}}{T_{CAM}} \right) k_1 T_{(работа)} \right] \quad (5.6)$$

каде што $C_{(опер)}$ е цената по час на операторот за мерење, T_M е времето потребно за мерење на делот (3D скенирање), додека другите ознаки се идентични како кај моделот за трошоци за проектирање. Процесирањето на точките и развојот на моделот се вклучени во CAD фазата, додека подготовката на работата е вклучена во CAM фазата.

- **Трошок за подесување.** Овој трошок се однесува на подготовката на машината пред започнување со работа. Трошокот за подесување ги вклучува трошокот за полнење на садот $C_{(пол)}$, трошок за подготовка и проверка на комората (протоколот

на гас), $C_{(\text{подесување гас})}$, и трошок за подготовка на површината на платформата за изработка $C_{(\text{подготовка на површината})}$. Платформата за изработка во овој случај е подготвена (обработена) со површинско брусење. Равенката за трошокот за подесување е:

$$C_{(\text{ПО})} = k_2 C_{(\text{пол})} + k_1 C_{(\text{подесување гас})} + k_3 C_{(\text{подготовка на површината})} \quad (5.7)$$

каде што $C_{(\text{пол})} = C_{(\text{опер})} \cdot T_{(\text{пол})}$. Трошокот за работна рака по час е изразен како $C_{(\text{опер})}$ а $T_{(\text{пол})}$ е потребното време за полнење на садот. Трошокот за подготовка на површината на платформата за изработка со брусење во една операција е $C_{(\text{подготовка на површината})} = C_{(\text{обработка})} \cdot T_{(\text{производство})} + C_{(\text{брусна плоча})}/N$. Оваа пресметка се разликува доколку за подготовка на површината на платформата за изработка се избере друга обработка со режење. $C_{(\text{обработка})}$ е трошок на час за машината вклучувајќи: плати, режиски трошоци и трошоци за одржување, $T_{(\text{производство})}$ е времето на производство, $C_{(\text{брусна плоча})}$ е трошокот за брусната плоча, и N е вкупниот број на платформи за изработка обработени од страна на брусната плоча. Бидејќи k_1 ја земаат во предвид изработката на делови со различна геометрија во рамките на истата работа. k_2 го зема во предвид материјалот кој се користи за изработка на делот наспроти оној кој е употребен за полнење на садот. $M_{(\text{полнење на сад})}$ се однесува на количината на прашокот изразена во kg која соодветствува на количината на материјал за полнење на волуменот за изработка што одговара на максималната височина на работата помножена со факторот на количината. Факторот на количината зависи од заситеноста на платформата за изработка. Коефициентот k_2 се определува на следниот начин:

$$k_2 = \frac{M_{(\text{дел})} + M_{(\text{подржувачи})}}{M_{(\text{полнење на сад})}} \quad (5.8)$$

каде што $M_{(\text{дел})}$ и $M_{(\text{подржувачи})}$ се количините на материјал употребени за изработка на делот и подржувачи. k_3 зема во предвид дека поголемата проектирана област на делот врз платформата за изработка, носи поголеми трошоци за делот во смисла на подготовка на површината на платформата. Коефициентот k_3 се определува на следниот начин:

$$k_3 = \frac{\text{површина на платформата за изработка зафатена од делот}}{\text{вкупна површина на зафатената платформа за изработка}} \quad (5.9)$$

Трошокот за подготовка и проверка на комората $C_{(\text{подесување гас})}$ може да се пресмета на следниот начин:

$$C_{(\text{подесување гас})} = C_{(\text{гас})}V_{(\text{гас по})} + C_{(\text{опер})}T_{(\text{опер гас})} \quad (5.10)$$

каде што $C_{(\text{гас})}$ е цената на гасот по m^3 , $V_{(\text{гас по})} = T_{(\text{полнење гас})}G_{(\text{чистење})}$ е вкупниот волумен на гас употребен за полнење на комората за изработка, со цел постигнување на бараниот притисок пред започнување на процесот, $G_{(\text{чистење})}$ ја претставува просечната потрошувачка на гас во процесот на чистење, $T_{(\text{опер гас})}$ е времето кое му е потребно на операторот за започнување и контрола на процедурата.

- **Трошок за производство.** Се однесува на директниот трошок за изработка на делот. Овој трошок ја вклучува потрошувачката на енергија од страна на машината и другите системи, вклучувајќи ја и потрошувачката на гас. Дополнително, овој трошок го опфаќа и одржувањето на машината и на другите системи, за што е потребен период на застој. Како и да е, овие трошоци не се земаат во предвид кога машината не се користи, како што е тоа случај со индиректните трошоци, кои мора да се пресметуваат дури и кога производството е запрено. Равенката за пресметка на трошокот за производство е:

$$C_{(\text{ПРЗ})} = C_{(\text{гас ил})}(T_{(\text{изл})} + k_4 T_{(\text{ладење})}) + C_{(\text{АП})}T_{(\text{изработка})} \quad (5.11)$$

каде што $C_{(\text{гас ил})} = (C_{(\text{гас})}V_{(\text{гас и})})/T_{(\text{полнење гас})}$ е трошокот на час за гасот кој се користи за време на изработката и ладењето на делот, $V_{(\text{гас и})}$ е просечната потрошувачка на гас за време на изработката, $C_{(\text{АП})}$ е директниот часовен трошок на системот за АП, и претставува збир на трошоците за потрошувачката на енергија на час и одржувањето на машината.

- **Трошок за материјал.** Се добива како производ од цената на прашокот $C_{(\text{прашок})}$ и количината на потребниот материјал, а се пресметува како:

$$C_{(M)} = C_{(\text{прашок})}(M_{(\text{дел})} + M_{(\text{подржувачи})}) + C_{(\text{прашок})}(M_{(\text{вкупно})}w)k_1 \quad (5.12)$$

каде што $M_{(\text{дел})}$ е материјалот кој е потребен за изработка на делот, $M_{(\text{подржувачи})}$ е материјалот за подржувачите, $M_{(\text{вкупно})}$ е вкупниот материјал потребен за изработката, и w е процентот на загуба на материјал кој се случува за време на процес и операцијата на чистење.

- **Време на производство.** Станува збор за времето на изработка, кое го вклучува и времето во празен од, и времето на изложеност $T_{(изл)}$, по дел, како што е прикажано со равенката:

$$T_{(изработка)} = k_1(T_{(загревање\ п)} + T_{(пом)} + T_{(полнење\ гас)}) + T_{(изл)} + k_4 T_{(ладење)} \quad (5.13)$$

каде што $T_{(загревање\ п)}$ е потребното време за загревање на платформата за изработка, $T_{(пом)}$ е дополнителното време кое се бара пред започнувањето на процесот, $T_{(полнење\ гас)}$ е времето потребно за полнење на комората со гас, $T_{(изл)}$ е времето кое е директно поврзано со изработката на делот во АП машината, а $T_{(ладење)}$ е времето потребно за ладење на делот. k_4 е коефициент кој ја зема во предвид изработката на делови со различни геометрии во рамките на истата работа, и се однесува на констатацијата дека колку е поголема површината на делот, толку е побрз процесот на ладење. Коефициентот се определува на следниот начин:

$$k_4 = 1 - \frac{\text{вкупна површина на делот}}{\Sigma (\text{површина на деловите})} \quad (5.14)$$

- **Трошок за пост производство.** Овој трошок ги вклучува операциите кои се задолжителни за комплетирање на процесот на АП. Според тоа, $C_{(ПП)}$ го содржи трошокот за отстранување на подржувачите, $C_{(оп)}$, трошокот за пост третманот $C_{(пт)}$, и трошокот за полирање на делот $C_{(пол)}$. Трошокот за пост производство се пресметува на следниот начин:

$$C_{(ПП)} = k_3 C_{(оп)} + k_1 C_{(пт)} + C_{(пол)} \quad (5.15)$$

$$C_{(оп)} = (C_{(EDM)} v_{(EDM)} + C_{(пила)} v_{(пила)}) L_{(платформа\ за\ изработка)} + C_{(опер)} T_{(отст)} \quad (5.16)$$

Подржувачите можат да бидат отстранети со процес на обработка со електроерозија (EDM - Electro Discharge Machining) со жица, рачно или со пила. $C_{(EDM)}$ и $C_{(пила)}$ се трошоците на час за EDM машината и за пилата, соодветно. $v_{(EDM)}$ и $v_{(пила)}$ се продуктивноста за EDM и за процесот на пилање, соодветно. $L_{(платформа\ за\ изработка)}$ е должината на платформата за изработка, $T_{(отст)}$ е времето кое е потребно за рачно отстранување на подржувачите. $C_{(пт)}$ и $C_{(пол)}$ се определуваат како трошоци на час за машината и за времето потребно за завршување на операцијата. k_3 зема во предвид дека за поголеми површини се потребни повеќе подржувачи. k_1 има во предвид дека на поголемите делови им треба подолго време во печка.

- **Трошок за завршна обработка.** Ги опфаќа дополнителните операции после пост производството, со цел постигнување на бараните димензии и квалитет на површините. Трошокот за завршна обработка, $C_{(3)}$ се пресметува според избраниот операција и соодветната машина. За индустрискиот дел, се користи операција на дупчење со CNC машина. Равенката за на овој трошок е:

$$C_{(3)} = C_{(обработка)} \cdot (T_{(обработка)} + T_{(непроизводно)}) \quad (5.17)$$

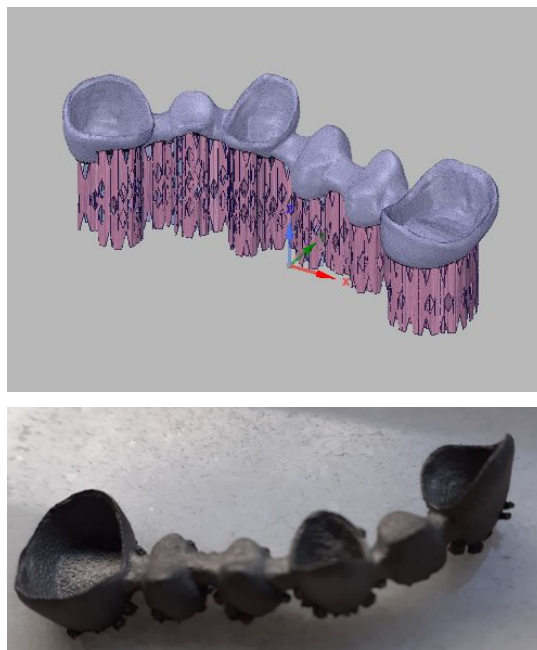
каде што $C_{(обработка)}$ е трошок на час на машината, кој вклучува амортизација, плати, ренески трошоци, одржување и алати, $T_{(обработка)} = K/v$ е времето на обработка кое е очекувано за соодветната операција K (во случајов, операција на дупчење) при што v е брзина на сечење, и додека $T_{(непроизводно)}$ е непроизводното време.

5.1.1 Анализа на трошокот на денталниот дел

Врз основа на претходните согледувања, многу е важно да се анализира времето и трошокот за производство, особено во денталната медицина. Делот (дентален мост) кој е произведен со АП, ќе биде спореден со еден производ со идентичен модел, но произведен со КЛ. Иако станува збор за уникатен дизајн (дизајн според клиентот) наменет за само една личност, важно е да се разбере разликата помеѓу двете технологии за истиот дизајн.

Бидејќи делот има мали димензии, симулацијата е направена на машината SLM 125 Single Optic 400W (SLM Solutions Group AG, Германија) со платформа за изработка $125 \times 125 \text{ mm}^2$. Симулацијата е направена во софтверот SpaceClaim (Ansys, Inc., САД). Користени се истите процес параметри како и за другите анализи, односно моќност на ласерот од 195 W, брзина на скенирање 1100 mm/s, и дебелина на слојот од 0.03 mm. Цената на материјалот CoCrMo во вид на прашок е приближно 400 €/kg. Во поголемиот број случаи има загуба на материјалот после процесот, што е резултат на чистењето и различниот отпад и на самата структура, па затоа се смета дека загубата на материјал е 5%. Покрај трошоците за материјалот, треба да се земат во предвид и трошоците за работните часови на машината (потрошувачка на енергија и неопходното одржување), што за овој случај е утврдено да бидат 2.5 €/h. Другите цени, односно часовните цени за машината и работната рака (оператор, проектант) се земени согласно европскиот

животен стандард. Денталниот мост заедно со подржувачите има маса од 0.00518 kg. Делот заедно со подржувачите е прикажан на Сликата 5.1.



Слика 5.1: Дентален мост со подржувачи: (горе) симулација; (долу) АП дел.

Имајќи ги во предвид многуте фактори кои влијаат врз производството, пресметката е базирана на вредностите кои се прикажани во табелата подолу. Некои од нив се земени директно од лабораторијата Alp Dental (Косово) како и од компанијата за АП Digital Dentistry (Косово) како резултат на нивното искуство. Други вредности се прилагодени и искористени од примерот елабориран од страна на Galati et al. (2020). Деталните пресметки се направени со помош на равенките прикажани во Точката 5.1. Општите податоци за машината SLM 125 (SLM 125, Technical specifications datasheet) се прикажани во Табелата 5.1.

Табела 5.1: Општи податоци за машината SLM 125.

Опис	Вредност
Работен простор ($W \times L \times H$)	125 x 125 x 125 mm
Конфигурација на 3D оптиката	Еден (1x 400 W) IPG ласер со оптичко влакно
Променлива дебелина на слојот	20 μm - 75 μm
Максимална брзина на скенирање	10 m/s
Просечна потрошувачка на гас за време на изработката	0.6 l/min
Просечна потрошувачка на гас за време на чистењето	70 l/min
Влезна моќност	3 kW
Димензии на машината (L x W x H)	1400 mm x 900 mm x 2460 mm

Коефициентите, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 се многу важни и влијаат врз соодветните равенки при определувањето на трошокот. Нивните вредности, како и другите релевантни податоци за анализираниот пример се прикажани во Табелата 5.2.

Табела 5.2: Коефициенти и други податоци за денталниот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Количина на материјал за садот за изработка	$M_{(полнење\ на\ сад)}$	10	(kg)
Волумен (дел и подржувачи)	$V_{(дел\ подржувачи)}$	600	(mm ³)
Површина на платформата за изработка зафатена од делот	$S_{(дел)}$	476	(mm ²)
Број на парчиња по работа на изработка	$N_{(пар)}$	1	(парче)
Однос помеѓу волуменот на делот и вкупниот волумен на изработката	k_1	1	
Употребен материјал за изработка, наспроти количината на материјал во садот	k_2	0.001	
Област на изработениот дел поврзана со платформата за изработка	k_3	1	
Изработени делови со различна геометрија во рамките на иста работа за изработка	k_4	-	

Оперативното време вклучува: загревање на платформата, време за нивелирање и подесување на платформата, време за полнење на комората со гас, време на изложеност и време за ладење (Табела 5.3).

Табела 5.3: Оперативни времиња за дентален дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Загревање на платформата	$T_{(загревање\ n)}$	0.10	(h)
Нивелирање на платформата	$T_{(ном)}$	0.10	(h)
Потребно време за полнење на комората со гас	$T_{(полнење\ гас)}$	0.35	(h)
Време потребно за комплетирање на работата за изработка	$T_{(изл)}$	1.11	(h)
Време за ладење	$T_{(ладење)}$	-	(h)
Вкупно време по дел (равенка 5.13)	$T_{(изработка)}$	1.66	(h)

За секоја операција, направени се пресметки за специфичните трошоци, препознавајќи ги индиректните и директните трошоци. Во индиректниот трошок се вклучени: административниот трошок и трошокот за закуп на просториите. Исто така, вклучен е и трошокот за амортизација на машините и уредите. Индиректниот трошок е прикажан во Табела 5.4:

Табела 5.4: Амортизација на машината и индиректни трошоци за денталниот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Цена на машината	$C_{(машина)}$	400,000	(€)
Користење*	n	5	(година)
Камата*	I	5	(%)
Работни часови годишно	$H_{(година)}$	7500	(h/година)
Трошок за амортизација	D	13.61	(€/h)
Збир на индиректни трошоци	Σ Индиректен	4.28	(€/h)
Индиректен трошок по дел (равенка. 5.2)	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	29.70	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Бидејќи во примерот е употребено РИ, во текот на процесот е користен 3D скенер. Затоа се пресметани амортизацијата на овој уред и индиректните трошоци. Пресметките се прикажани во Табела 5.5.

Табела 5.5: Амортизација на уредот и индиректни трошоци за денталниот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Цена на 3D скенерот (3Shape D900)	$C_{(3D скенер)}$	8000	(€)
Користење	n	5	(година)
Камата	I	5	(%)
Работни часови годишно	$H_{(година)}$	1800	(h/година)
Трошок за амортизација	D	1.13	(€/h)
Збир на индиректни трошоци	Σ Индиректен	0.50	(€/h)
Индиректен трошок по дел (равенка. 5.2)	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	0.40	(€/дел)

По пресметувањето на индиректните трошоци, се продолжува со пресметката на директните трошоци. Првиот чекор на директниот трошок се прикажани во Табела 5.6.

Табела 5.6: Трошоци за РИ на деналниот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Цена на час за операторот на 3D скенер	$C_{(опер)}$	20	(€/h)
Време за процесот на 3D скенирање	T_M	0.25	(h)
Цена на час за проектантот	$C_{ПР}$	30	(€/h)
Лиценца за САD софтверот (3Shape)	$C_{САD}$	2300	(€/година)
Лиценца за САМ софтверот (CAMbridge)	$C_{САМ}$	500	(€/година)
Време на користење на САD	$T_{САD}$	1800	(h/година)
Време на користење на САМ	$T_{САМ}$	1800	(h/година)
Потребно време за САD	$T_{пр}$	0.5	(h)
Потребно време за САМ	$T_{(работа)}$	0.3	(h)
Вкупен број на парчиња кои треба да се произведат	$N_{(пар)}$	1	(парче)
Трошок за РИ по дел (равенка. 5.6)	$C_{(РИ)}$	29.72	(€/дел)

Како втор чекор во пресметувањето на директниот трошок, следува пресметката на трошоците за подесување, кои се неопходни за подготовка на машината пред започнување со прозиводството на делот. Факторите кои влијаат врз конечните трошоци за подесување се мерени и пресметани. Трошоците и пресметката се прикажани во Табела 5.7.

Табела 5.7: Трошоци за подесување на денален дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошоци за работна рака*	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Потребно време за полнење на садот	$T_{(пол)}$	0.17	(h)
Трошок за полнење на садот по дел	$C_{(пол)}$	0.002	(€/дел)
Време потребно на операторот за започнување на процесот	$T_{(опер гас)}$	0.05	(h)
Трошок за гас (аргон) по m^3 *	$C_{(гас)}$	3.7	(€/m ³)
Просечна потрошувачка на гас за чистење	$G_{(чистење)}$	70	(l/min)
Вкупен волумен на гас за полнење на комората	$V_{(гас по)}$	1.47	(m ³)
Трошок на гасот за подесување по дел	$C_{(подесување гас)}$	6.58	(€/дел)
Цена на час за машината	$C_{(обработка)}$	20	(€/h)
Време на производство	$T_{(изработка)}$	0.2	(h)
Трошок за брусната плоча	$C_{(брусна плоча)}$	10	(€/дел)
Број на платформи за изработка обработени со брусната плоча	$N_{(пар)}$	20	(парче)
Трошок за подготовка на површината на платформата за изработка, по дел	$C_{(подготовка на површината)}$	4.5	(€/дел)
Трошок за подесување по дел (равенка 5.7)	$C_{(ПО)}$	11.09	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Третиот чекор од пресметувањето на директните трошоци е пресметката на трошокот за материјал. Пресметката е прикажана во Табела 5.8.

Табела 5.8: Трошок за материјал за дентален дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошок за прашокот	$C_{(прашок)}$	400	(€/kg)
Маса на материјалот за делот	$M_{(дел)}$	0.004	(kg)
Маса на материјалот за подржувачи	$M_{(подржувачи)}$	0.00118	(kg)
Вкупен материјал за изработка на делот	$M_{(вкупно)}$	1.93	(kg)
Процент на загуба на материјал*	w	5	(%)
Трошок за материјал по дел (равенка. 5.12)	$C_{(M)}$	40.67	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Четврти чекор од пресметката на директниот трошок, се трошоците за производство. Покрај трошокот за АП на час, постојат и други фактори кои влијаат врз вкупно трошок за производство. Пресметката е прикажана во Табела 5.9.

Табела 5.9: Трошоци за производство за дентален дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Просечна потрошувачка на гас за време на изработката	$G_{(чистење)}$	0.6	(l/min)
Трошок за гас (аргон) по m^3 *	$C_{(гас)}$	3.7	(€/m ³)
Вкупен волумен на гасот за изработка	$V_{(гас и)}$	0.013	(m ³)
Трошок за гасот за изработка и ладење	$C_{(гас ил)}$	0.13	(€/h)
Трошок за АП	$C_{(АП)}$	2.5	(€/h)
Трошок за производство по дел (равенка. 5.11)	$C_{(ПРЗ)}$	4.29	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

По завршување на производната фаза, во која се генерираат трошоците за производство, потребно е да се извршат уште некои операции, со цел финалниот производ да биде употреблив. Ова ги вклучува трошоците за пост производство, како петти чекор во пресметувањето на директните трошоци. Пресметката е прикажана во Табела 5.10.

Табела 5.10: Трошоци за пост производство за дентален дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошок за работна рака*	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Трошоци за пила	$C_{(пила)}$	5	(€/h)
Потребно време за рачно отстранување на подржувачите	$T_{(отст)}$	0.05	(h)
Трошок за термичка обработка	$C_{(терм)}$	8	(€/h)
Време за термичка обработка	$T_{(терм)}$	3.5	(h)
Трошок за полирање	$C_{(пол)}$	0.5	(€/дел)
Трошок за пост производство по дел (равенка. 5.15)	$C_{(шт)}$	33.27	(€/дел)

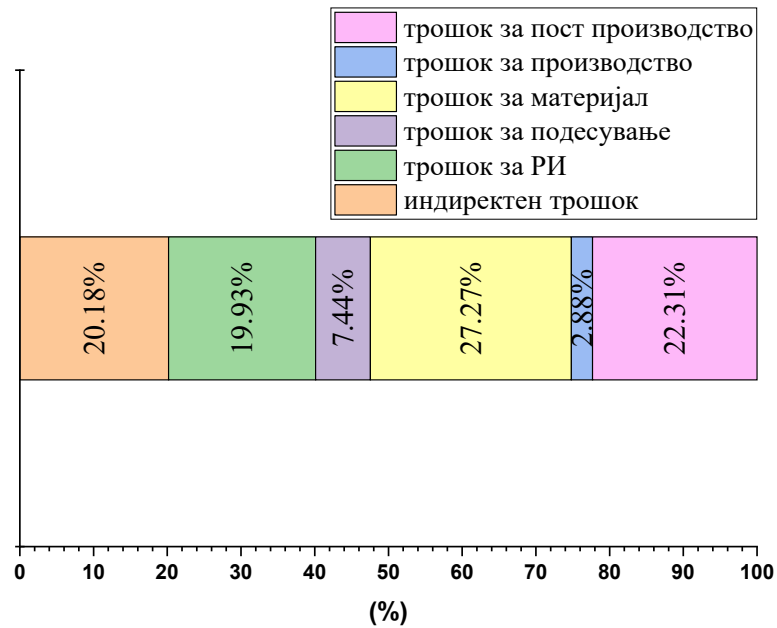
* адаптирано од Galati et al. (2020).

На крајот, прикажана е вкупно пресметка (Табела 5.11), која ги вклучува индиректните и директните трошоци, кои го определуваат вкупниот трошок за денталниот дел.

Табела 5.11: Вкупни трошоци за денталниот дел.

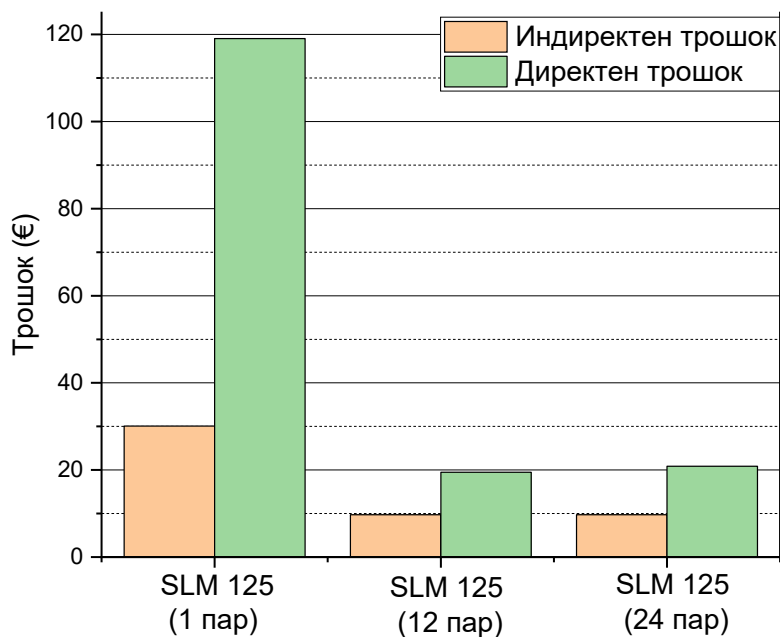
Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Индиректен трошок	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	30.10	(€/дел)
Директен трошок	$C_{(ДИРЕКТЕН)}$	119.05	(€/дел)
Вкупен трошок по дел (равенка. 5.1)	$C_{(ВКУПНО)}$	149.15	(€/дел)

Вкупниот трошок според Табела 5.11 е 149.15 €/дел. Доколку одделно се анализира секоја од пресметките, тогаш се заклучува дека трошокот за материјал е директно поврзан со загубата на материјал за работата при изработка, а тоа има значајно влијание врз вкупните трошоци. Доколку се изработува само еден дел, трошокот е висок. Понатаму, трошокот за пост производство исто така влијае врз зголемување на вкупниот трошок. Тоа се должи на фактот дека овој трошок е функција од количината на изработени делови, а во овој пример сите подготовки се поврзани со изработката на само еден дел. Ваквата ситуација би била поинаква доколку се извршува целосната работа за изработка на многу делови. Понатаму, како трет фактор кој влијае врз вкупниот трошок е индиректниот трошок. Постојат и други пропратни трошоци како што се трошокот за РИ, трошокот за подесување и трошокот за производство, кои имаат соодветно влијание врз вкупниот трошок. Уделот на секој од овие трошоци, односно распределбата на трошокот за денталниот дел, е прикажана на Слика 5.2.



Слика 5.2: Распределба на трошоците за денталниот дел.

Од анализите може да се заклучи дека 79.82% од трошоците припаѓаат на директниот трошок, а 20.18% на индиректниот трошок. Потребна е понатамошна анализа со цел намалување на вкупниот трошок, вклучувајќи ги анализите за производство на повеќе парчиња во еден процес на АП. Во врска со тоа, направена е апроксимација на условите со цел пресметка на трошокот за истиот дел со 12 парчиња и со 24 парчиња на изработка. Споредбата на трошоците може да се види на Слика 5.3.



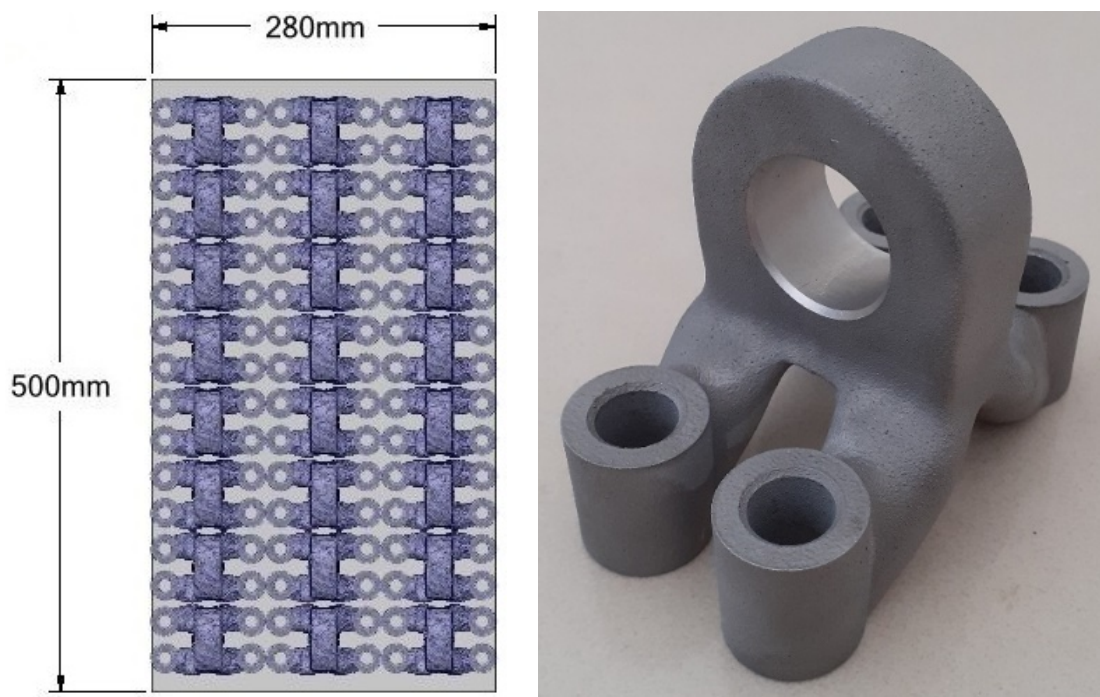
Слика 5.3: Вкупни трошоци при производство на различни количини (анализа на пример за дентален дел).

Според Сликата 5.3, при зголемување на количините на 12 односно 24 парчиња, трошокот за изработка по парче се намалува за 80%. Покрај останатите, трошокот за пост производство и трошокот за материјал драстично се намалуваат. Пресметаниот трошок за целокупната работа на изработка е приближно 30 €/дел, што е потврдено и од страна на вработен во Лабораторијата како реален трошок. И покрај фактот дека секој дентален мост е различен, сепак обликот на забите не се разликува многу, и може да се прифати како идентичен со пресметковна цена (од пракса) од 5 €/заб, што во овој случај помножено со 6 заби ја дава споменатата цена од 30 €/дентален мост.

5.1.2 Анализа на трошокот на индустрискиот дел

Делот (50% НМ) кој беше анализиран во претходните фази, ќе биде исто така анализиран во однос на времето и трошоците. Во овој случај, моделот произведен со АП, ќе биде споредуван како единечен дел и како сериско производство, со оригиналниот дизајн, произведен со CNC машина со 3 оски. Исто така, резултатите од истиот дизајн (50% НМ) ќе бидат споредувани во однос на АП и CNC технологиите според времето и трошоците. Во презентираниот случај, сериското производство е можна опција, што не беше случај кај денталниот дел.

Избрана е машината SLM 500 Quad Optic 400W (SLM Solutions Group AG, Германија), која има платформа за изработка 500 x 280 mm², како прифатлива опција за симулација. Quad optic претставува број на ласери во машината за АП, што значи во случајот на SLM 500, четири ласери со моќност од 400 W. Симулацијата е направена во софтверот SpaceClaim (Ansys, Inc., САД). Цената на материјалот, за прашокот од AlSi10Mg е 65 €/kg. Се смета на загуба на материјалот од 5%, и 10 €/h како трошок по час за машината за АП (потрошувачка на енергија и одржување). Параметрите на машината, како што се моќноста на ласерот од 395 W, брзината на скенирање од 1500 mm/s и дебелината на слојот од 0.03 mm, се избрани врз основа на претходните пресметки. Идентично како и во примерот со денталниот мост, за аспектите на цени и трошоци, користен е европскиот животен стандард. Масата на моделот е 0.26 kg заедно со подржувачите. Деловите (24 парчиња) се поставени на платформата за изработка на рационален начин (Слика 5.4).



Слика 5.4: (лево) Платформа за изработка за примерот со индустриски дел (SLM 500); (десно) АП дел.

Анализите на трошокот се базирани на машината SLM 500, која е соодветна за производство на делот, согласно капацитетот и можностите кои ги има со четирите ласери. Некои вредности и цени за процесот на АП се слични со примерот елабориран од страна на Galati et al. (2020), и се прифатени за анализата на овој пример, додека некои податоци се обезбедени од АП производител на делот Additive 3D (Франција) како подизведувач. Другите пресметки се направени според равенките презентирани во Точката 5.1. Општите податоци за машината SLM 500 (SLM 500, Technical specifications datasheet) се прикажани во Табела 5.12.

Табела 5.12: Општи податоци за машината SLM 500.

Опис	Вредност
Работен простор ($W \times L \times H$)	500 x 280 x 365 mm
Конфигурација на 3D оптиката	Quad (4x 400 W) IPG ласери со оптичко влакно
Променлива дебелина на слојот	20 μm - 90 μm
Максимална брзина на скенирање	10 m/s
Просечна потрошувачка на гас за време на изработката	16 l/min
Просечна потрошувачка на гас за време на чистењето	250 l/min
Влезна моќност	8 - 10 kW
Димензии на машината (L x W x H)	6080 mm x 2530 mm x 2620 mm

Соодветните коефициенти се пресметани на истиот начин како кај деналниот дел, но со други параметри. Нивните вредности за прикажани во Табелата 5.13.

Табела 5.13: Коефициенти и други податоци за индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Количина на материјал за садот за изработка	$M_{(полнење на сад)}$	50	(kg)
Волумен на делот и подржувачите	$V_{(дел подржувачи)}$	98252	(mm ³)
Површина на платформата за изработка зафатена од делот	$S_{(дел)}$	5244	(mm ²)
Број на парчиња по работа на изработка		24	(парче)
Однос помеѓу волуменот на делот и вкупниот волумен на изработка	k_1	0.042	
Употребен материјал за изработка, наспроти количината на материјал во садот	k_2	0.005	
Област на делот што се изработува во однос на платформата за изработка	k_3	0.042	
Изработени делови со различна геометрија во рамките на иста изработка	k_4	-	

Исто како и кај деналниот дел, постојат оперативни времиња кои влијаат врз вкупното време на изработка, а кои се прикажани во Табелата 5.14.

Табела 5.14: Оперативни времиња за индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Загревање на платформата*	$T_{(загревање\ n)}$	0.33	(h)
Нивелирање на платформата*	$T_{(пом)}$	0.33	(h)
Потребно време за полнење на комората со гас*	$T_{(полнење\ гас)}$	1.67	(h)
Потребно време за комплетирање на работата на изработка	$T_{(изл)}$	70.36	(h)
Време за ладење	$T_{(ладење)}$	-	(h)
Вкупно време по дел (равенка 5.13)	$T_{(изработка)}$	3.02	(h)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

За разлика од првата анализа на пример, овде се пресметуваат само амортизацијата на машината и другите индиректни трошоци, и истите се прикажани во Табелата 5.15.

Табела 5.15: Амортизација на машината и индиректни трошоци за индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Цена на машината*	$C_{(машина)}$	1,200,000	(€)
Користење*	n	5	(година)
Камата*	I	5	(%)
Работни часови годишно	$H_{(година)}$	7500	(h/година)
Трошок за амортизација	D	40.84	(€/h)
Збир на индиректни трошоци	Σ Индиректен	6.13	(€/h)
Индиректен трошок по дел (равенка. 5.2)	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	141.85	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Врз основа на фактот дека оригиналниот дизајн е наново проектиран, редизајнот е вкалкулиран како директен трошок. Иако за производство од голем обем трошокот за проектирање не се зема во предвид, овде тој ќе биде пресметан со цел добивање на што е можно попрецизен вкупен трошок. Дотоку повеќе, во старт ќе се добие реален трошок поврзан со количината. Пресметките се прикажани во Табела 5.16.

Табела 5.16: Трошоци за проектирање на индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единечна мерка
Цена на час за проектант	$C_{пр}$	50	(€/h)
Лиценца за CAD софтвер (ANSYS, Inventor, Geomagic)	C_{CAD}	32150	(€/година)
Лиценца за CAM софтвер (SpaceClaim)	C_{CAM}	13750	(€/година)
Време на користење на CAD	T_{CAD}	1800	(h/година)
Време на користење на CAM	T_{CAM}	1800	(h/година)
Потребно време за CAD	$T_{пр}$	14	(h)
Потребно време за CAM	$T_{(работа)}$	6	(h)
Вкупен број на парчиња кои треба да се произведат	$N_{(пар)}$	24	(парче)
Трошок за проектирање по дел (равенка. 5.5)	$C_{(ПР)}$	40.18	(€/дел)

Наредната активност е пресметка на трошоците за подесување, при што се земаат во предвид бројни фактори кои влијаат врз вкупните трошоци. Оваа пресметка е прикажана во Табелата 5.17.

Табела 5.17: Трошоци за подесување на индустриски дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошоци за работна рака*	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Потребно време за полнење на садот*	$T_{(пол)}$	0.7	(h)
Трошок за полнење на садот по дел	$C_{(пол)}$	0.003	(€/дел)
Потребно време за операторот за започнување на процесот*	$T_{(опер\ гас)}$	0.08	(h)
Трошок за гас (аргон) по m^3 *	$C_{(гас)}$	3.7	(€/m ³)
Просечна потрошувачка на гас за чистење	$G_{(чистење)}$	250	(l/min)
Вкупен волумен на гас за полнење на комората	$V_{(гас\ по)}$	25.05	(m ³)
Трошок на гасот за подесување по дел	$C_{(подесување\ гас)}$	3.93	(€/дел)
Цена на час за машината	$C_{(обработка)}$	30	(€/h)
Време на производство	$T_{(изработка)}$	1	(h)
Трошок за брусната плоча	$C_{(брусна\ плоча)}$	15	(€/дел)
Број на платформи за рамнење, обработени со брусната плоча	$N_{(пар)}$	20	(парче)
Трошок за подготовка на површината за изработка по дел	$C_{(подготовка\ на\ површината)}$	1.28	(€/дел)
Трошок за подесување по дел (равенка. 5.7)	$C_{(по)}$	5.30	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Трошокот за материјал има забележително влијание врз вкупно трошок на делот, што можеше да се забележи и од претходните анализи. Пресметката е прикажана во Табелата 5.18.

Табела 5.18: Трошок за материјал за индустриски дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единечна мерка
Трошок за прашок*	$C_{(прашок)}$	65	(€/kg)
Маса на материјалот за делот	$M_{(дел)}$	0.23	(kg)
Маса на материјалот за подржувачите	$M_{(подржувачи)}$	0.03	(kg)
Вкупен материјал при изработка на делот	$M_{(вкупно)}$	18.04	(kg)
Процент на загуба на материјал*	w	5	(%)
Трошок за материјал по дел (равенка. 5.12)	$C_{(M)}$	19.34	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Покрај трошокот за АП на час, постојат и други фактори кои влијаат врз вкупно трошок за производство. Пресметките се прикажани во Табелата 5.19.

Табела 5.19: Трошоци за производство за индустриски дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Просечна потрошувачка на гас за време на чистење	$G_{(чистење)}$	16	(l/min)
Трошок за гас (аргон) по m^3 *	$C_{(гас)}$	3.7	(€/m ³)
Вкупен волумен на гас за изработка	$V_{(гас и)}$	1.60	(m ³)
Трошок за гас за изработка и ладење	$C_{(гас ил)}$	3.55	(€/h)
Трошок за АП*	$C_{(АП)}$	10	(€/h)
Трошок за производство по дел (равенка. 5.11)	$C_{(ПРЗ)}$	40.67	(€/дел)

* адаптирано од (Galati et al. 2020).

Понатаму, со цел да се комплетира делот по процесот на АП, потребен е чекорот на пост производство. Пресметките за овој чекор се прикажани во Табела 5.20.

Табела 5.20: Трошоци за пост производство за индустриски дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошок за работна рака*	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Трошок за EDM*	$C_{(EDM)}$	30	(€/h)
Потребно време за рачно отстранување на подржувачите	$T_{(отст)}$	2.5	(h)
Трошок за термичка обработка*	$C_{(терм)}$	35	(€/h)
Време за термичка обработка*	$T_{(терм)}$	8	(h)
Трошок за полирање*	$C_{(пол)}$	5	(€/h)
Трошок за пост производство по дел (равенка. 5.15)	$C_{(ПП)}$	21.09	(€/дел)

* адаптирано од Galati et al. (2020).

Кај индустрискиот дел, отворот за лежиштето треба да биде завршно обработен според толеранцијата. За завршната обработка, се користи CNC обработка. Пресметките се претставени во Табела 4.21.

Табела 5.21: Трошок за завршната обработка за индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Трошок на час за машината	$C_{(обработка)}$	58	(€/h)
Време на обработка	$T_{(обработка)}$	0.0005	(h)
Непроизводно време	$T_{(непроизводно)}$	0.033	(h)
Трошок за завршна обработка по дел (равенка. 5.17)	$C_{(з)}$	1.94	(€/дел)

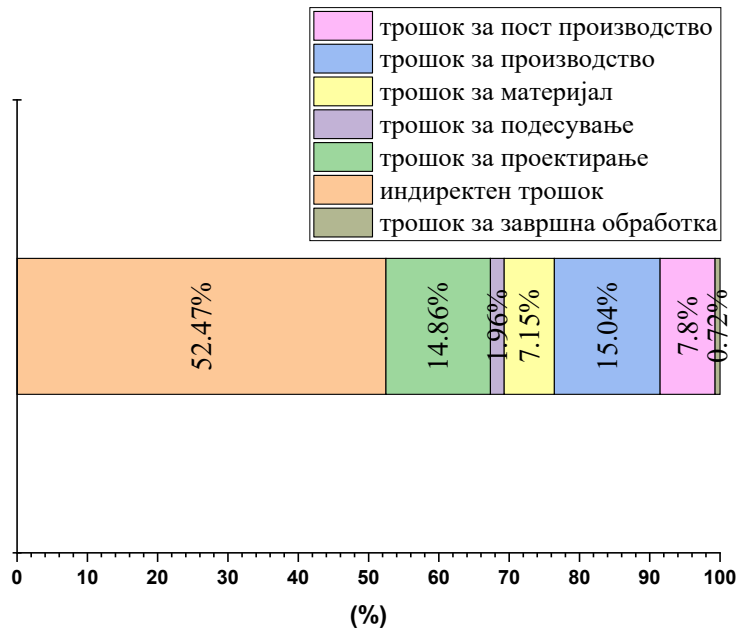
На крајот, во Табелата 5.22, прикажана е конечната пресметка, која ги вклучува индиректните и директните трошоци, кои го определуваат вкупниот трошок за индустрискиот дел.

Табела 5.22: Вкупни трошоци за индустрискиот дел.

Опис	Ознака	Вредност	Единица мерка
Индиректен трошок	$C_{(ИНДИРЕКТЕН)}$	141.85	(€/дел)
Директен трошок	$C_{(ДИРЕКТЕН)}$	128.54	(€/дел)
Вкупен трошок по дел (равенка. 5.1)	$C_{(ВКУПНО)}$	270.39	(€/дел)

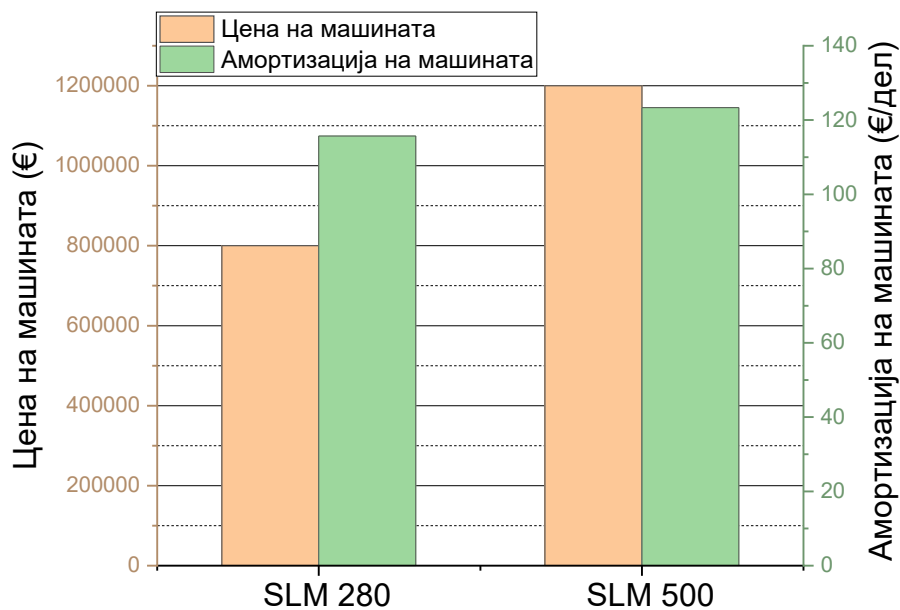
Согласно Табелата 5.22, вкупниот трошок е 270.39 €/дел. Доколку се анализираат посебно трошоците, тогаш се заклучува дека индиректните трошоци значително влијаат врз зголемувањето на вкупните трошоци. Тоа се должи на фактот дека трошокот главно зависи од времето на изработка и трошокот за машината. Како втор фактор кој влијае на вкупните трошоци се посочува трошокот за производство, кој зависи од потрошувачката на гас, потрошувачката на енергија и времето на изработка. Третиот фактор кој влијае врз вкупните трошоци е проектирањето, што се базира на фактот дека за репроектирање се потребни искуство и користење на професионални софтвери за постигнување на геометрија која ќе биде идентична со оригиналниот дизајн од аспект на функционалност. Следниот трошок кој влијае врз вкупните трошоци е трошокот за пост производство кој директно е поврзан со отстранувањето на подржувачите, термичката обработка и полирањето. Другите трошоци се: трошоците за материјал, трошоците за подесување и трошокот за завршна обработка. Процентот на распределба на трошоците за индустрискиот дел е прикажан на Сликата 5.5.

Ако одделно се анализираат индиректните трошоци, директните трошоци и нивната распределба, се утврдува дека 52.47% се индиректни, а 47.53% директни трошоци. Ова го покажува влијанието на времето на изработка, трошокот за машината и користењето на машината од една страна, а од друга страна влијанието на директните фактори врз процесот на АП, односно врз вкупните трошоци.



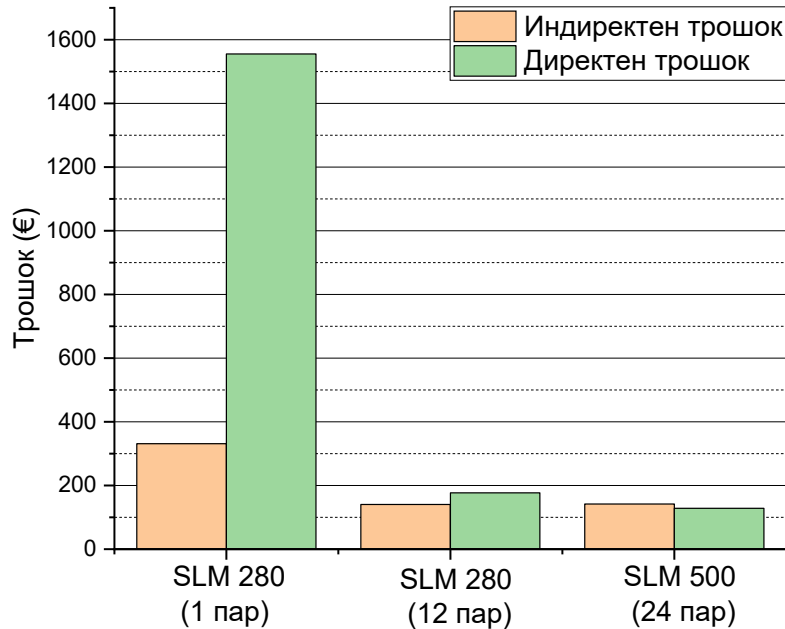
Слика 5.5: Распределба на трошоците за индустрискиот дел.

На самиот почеток, а врз основа на сопствена проценка, помеѓу различните опции избрана е машината SLM 500 за сериското производство. Познато е дека трошокот за машината и времето на изработка имаат влијание врз индиректните трошоци, а тоа е особено изразено кај трошокот за амортизација на машината по дел. Врз основа на ова сознание, направена е споредба помеѓу две машини, SLM 280 и SLM 500. Разликата помеѓу овие две машини е во суштина помеѓу цените на машините, капацитетот и бројот на ласери. Зависноста помеѓу цената на машината и амортизацијата на машината е прикажана на Слика 5.6.



Слика 5.6: Зависност цена на машина – амортизација на машината.

Врз основа на Сликата 5.6, разликата во цената на машините SLM 280 и SLM 500 е 33.33%, а разликата во трошокот за амортизација на машината по дел е 6.20%. Ова покажува дека времето на изработка има клучно влијание врз вкупните трошоци. Споредбата на разликата на трошоците за АП за 1 парче, 12 и 24 парчиња избрани за производство во рамките на една изработка, е прикажана на Слика 5.7.

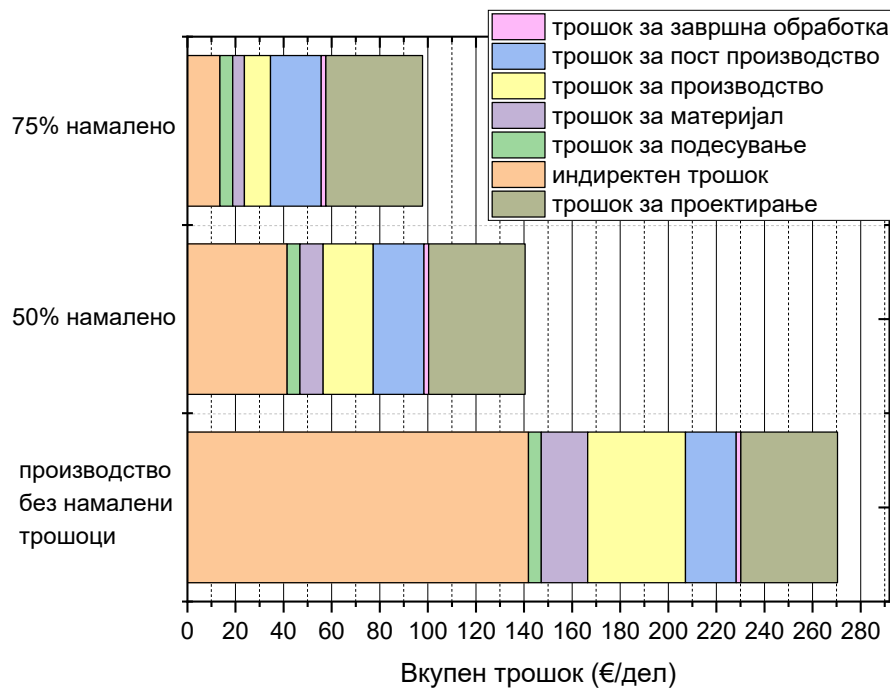


Слика 5.7: Разлика на трошоците за различни машини и број на произведени парчиња (анализа на пример за индустриски дел).

Од Сликата 5.7, може да се заклучи дека, за SLM 280 (1 парче) индиректниот трошок е повеќе од двојно повисок во споредба со останатите два случаи. Ова главно се должи на големото време за изработка по дел. Ако се анализираат директните трошоци, главниот фактор кој го зголемува трошокот е трошокот за проектирање, кој е поврзан со бројот на произведени парчиња. При споредба на случаите со 12 парчиња и 24 парчиња, со соодветните машини, разликата е концентрирана кај директните трошоци и истите се главно поврзани со разликите во трошоците за проектирање, трошокот за производство и трошокот за пост производство. Според Сликата 5.7 и анализата, трошокот за еден дел кај машината SLM 280 е 14.81% повисок од трошокот за еден дел произведен со машината SLM 500. Беше за очекување дека во ваков случај капацитетот и бројот на ласерите ќе направат разлика.

Повикувајќи се на прелиминарните анализи, може да се заклучи дека придонес кон зголемувањето на вкупниот трошок, меѓу другите имаат цената на машината, времето на изработка и трошокот за материјал, базирани врз актуелните цени на пазарот

и техничките аспекти. Со потенцирањето на овие три фактори, истите се согледуваат и од аспект на класичното производство, при што нивното влијание е многу пониско споредено со АП. За да се направи споредба со актуелното производство, ќе се претпостави намалување за 50% и 75% соодветно на цената на машината, времето за изработка и трошокот за материјал. Резултатите кои се добиени заради овие промени, се прикажани на Слика 5.8



Слика 5.8: Промени на избраните фактори кај АП со намалувања на трошоците за 50% и 75%.

Според Сликата 5.8, при намалување на вредноста на соодветните фактори за 50%, вкупниот трошок е 140.49 €/дел. Притоа, цената на машината е 600,000 €, времето на изработка е 1.49 h, и 32.5 €/kg е трошокот за материјал. Во случај на намалување на вредноста на соодветните фактори за 75%, вкупниот трошок е 97.79 €/дел. Притоа, цената на машината е 300,000 €, времето на изработка е 0.82 h, а трошокот за материјал е 16.25 €/kg. Од прикажаните вредности може да се види дека дури и во случај на намалување на цената на машината и трошокот за материјал за 75%, овие решенија се и натаму поскапи од класичното производство, имајќи ги во предвид актуелните пазарни цени. И во двата случаи, пресметан е и трошокот за проектирање, а со оглед на фактот дека во споредбата на АП и класичното производство станува збор за големи произведени количини, тој трошок ќе биде незначителен. Од анализите може да се заклучи дека дури и при така значајно намалување на доминатните трошоци, трошоците за класичното производство се пониски од трошоците кај АП.

5.2 Споредбена анализа на АП и класичното производство

Врз основа на прелиминарните економски анализи, неопходно е да се направи споредба на АП со субтрактивното и формативното производство, со цел подобро разбирање на економските разлики помеѓу нив. Разликите помеѓу овие технологии се евидентни, имајќи предвид дека кај класичното производство материјалот за производство се отстранува/обликува со различни техники на обработка, или се лее во калап. Овој процес е различен при користењето на АП, бидејќи овде материјалот се додава слој по слој, што нуди многу можности за слобода во проектирањето, елиминирајќи притоа многу ограничувања кои се присутни кај класичните технологии. Дополнително, цената на производот варира во зависност од примената на релевантните технологии. При споредбата помеѓу АП со КЛ, и односно АП со CNC обработката со 3 оски, ќе бидат земени во предвид сите фактори кои го определуваат времето и трошок потребно за целиот процес. Економските анализи за КЛ, CNC обработката и анализата на критичната точка на рентабилноста, се базирани на процедурата презентирана од Atzeni et al. (2013) со усвојување на некои дополнителни фактори кои се карактеристични за конкретната анализа на пример. Како што тоа беше случај кај АП, и овде се земаат податоци согласно европскиот животен стандард, во однос на цените и другите трошковни аспекти. Спроведените економски анализи за избраните делови се презентирани во следните поглавја.

5.2.1 АП и КЛ

Истиот дел (дентален мост) кој е произведен со АП, ќе биде произведен и со КЛ. Економските анализи започнуваат со пресметка на индиректните трошоци кои се земени во предвид кај АП. Цената на машината за леење е приближно 6500 € за машина со моќност од 4.5 kW. Степенот на искористеност на машината е многу низок и се заснова на кратки работни циклуси. Во однос на амортизацијата на машината и другата опрема, и овде за процесот на РИ се користи 3D скенер, исто како и кај АП. Другите трошоци вклучуваат административни трошоци и трошоци за закуп на простории, кои се вклучени во индиректните трошоци и кај двете технологии. Разликата помеѓу АП и КЛ е евидентна во однос на материјалот кој се користи за производство. Во клучајот на КЛ, CoCrMo материјалот се користи во вид на прачки со кружен пресек, со маса од 6 g по парче. За денталниот мост, употребени се 3 парчиња, со цел да се има доволно материјал

за поголема компресија во текот на процесот на инјектирање. Суштинската разлика е во цената на материјалот, која е 200 €/kg, односно 100% пониска отколку кај АП. Понатаму, кај АП постојат трошоци за подесување, додека кај КЛ постојат трошоци за алати, бидејќи неопходни се дополнителни подготовки пред започнување со процесот на производство. Подготовката подразбира брза изработка на алати со помош на АП технологијата (ФП технологија). Материјалот кој се користи во овој случај е смола, при што многу е важна точноста и квалитетот на површината. Овој дел е произведен од надворешен производител, а неговата цена е 3 €/дел. Следниот чекор е подготовка на процесот на прецизно леење, при што цената по килограм е 6.25 €/kg. За овој случај, употребени се 240 g, па вкупниот трошок по дел е 1.5 €/дел. За време на подготовката за прецизно леење, потребен е и мешач. Мешачот чини 1200 € а во случајов се користи околу една минута. Како втор дел од трошоците за алати, се сметаат други трошоци кои се категоризираат како помошни трошоци, вклучувајќи ја тука и азбестната лента со цена од 1 €/m. Во овој пример се користат само 20 cm, што значи трошок од 0.2 €/дел. Азбестот се користи како изолатор со цел одржување на бараната температура за време на процесот на леење и превенција на брзо ладење. Исто така, се користи и за брзо отстранување на калапот на алатот кај прецизното леење. Азбестот нема контакт со делот. Овде се вклучени и некои други трошоци, како што се трошоците за калапот каде е сместен делот и цевките кои овозможуваат поврзување на алатот (брза изработка на алати) со отворот за инјектирање. Заедно со азбестот, сите овие трошоци имаат вредност од 0.8 €/дел. Третата и последна компонента од трошоците за алати, е процесот на загревање, каде што се користи печка за топење (брза изработка на алати). Цената на печката со моќност од 2.5 kW е 2500 €. Степенот на нејзино користење во рамките на денот е во зависност од работата која се извршува, но приближно е околу 2 h/ден. Целиот процес на топење трае околу 1h и 15 min, па ако се пресмета заедно со трошокот за електрична енергија по час, трошокот за загревање е 1.8 €/дел. Многу важен дел од вкупниот трошок е трошокот во процесот на производство, почнувајќи од пресметката на потрошувачката на енергија на машината за време на работниот процес. Во овој случај, целиот процес трае една минута. Врз основа на моќноста на машината и цената на енергијата, трошокот за енергија на машината е 0.27 €/h. Во текот на овој процес, операторот кој е задолжен за леењето е зафатен 100%. Со оглед дека делот се обликува за една минута, работниот циклус е 0.016 h. На крајот, како дел од вкупниот трошок се земаат трошоците за пост производство. Во случајов, потребен е микро мотор со алат за отстранување на дополнителните елементи од делот. Цената на микро моторот е 1800 €,

а во овој случај тој се користи околу 30 минути. За да ја заврши работата, микро моторот користи алат чиј трошок е 10 €/парче, но може да се користи за вкупно 50 парчиња.

Табела 5.23: Трошоци за КЛ за дентален дел.

Опис и равенка	Ознака	Вредност	Единица мерка
Индиректни трошоци (вклучувајќи машина)	$C_{(индиректен1)}$	0.17	(€)
Индиректни трошоци (вклучувајќи уред)	$C_{(индиректен2)}$	0.40	(€)
Индиректен трошок по дел = $C_{(индиректен1)} + C_{(индиректен2)}$	$C_{(И)}$	0.57	(€/дел)
Трошок за РИ по дел (равенка. 5.6, без пресметка за работата)	$C_{(РИ)}$	20.63	(€/дел)
Цена на материјалот по kg	$C_{(материјал)}$	200	(€/kg)
Маса на парчето	$M_{(маса на парче)}$	0.018	(kg)
Трошок за материјал по дел = $C_{(материјал)} * M_{(маса на парче)}$	$C_{(М)}$	3.6	(€/дел)
Трошок за брза изработка на алат (ФП)	$C_{(БИА)}$	3	(€)
Трошок за прецизно леење	$C_{(прецизно л)}$	1.5	(€)
Помошни трошоци	$C_{(помошни)}$	0.8	(€)
Трошок за процес на загревање	$C_{(загревање)}$	1.8	(€)
Трошок за алат по дел = $C_{(БИА)} + C_{(прецизно л)} + C_{(помошни)} + C_{(загревање)}$	$C_{(А)}$	7.1	(€/дел)
Потрошувачка на енергија на машината на час	$C_{(енергија)}$	0.27	(€/h)
Трошок за работна рака на час	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Време на зафатеност на операторот	$T_{(оператор)}$	100	(%)
Време на циклусот	$T_{(циклус)}$	0.016	(h)
Трошок за леење по дел = $[C_{(енергија)} + C_{(опер)} * T_{(оператор)}\%] * T_{(циклус)}$	$C_{(Л)}$	0.372	(€/дел)
Трошок за работна рака на час	$C_{(опер)}$	23	(€/h)
Потребно време за операторот	$T_{(оператор)}$	1	(h)
Трошок за полирање	$C_{(полирање)}$	3.08	(€)
Трошок за пост производство по дел = $C_{(опер)} * T_{(оператор)} + C_{(полирање)}$	$C_{(ПП)}$	26.08	(€/дел)
Вкупен трошок по дел = $C_{(И)} + C_{(РИ)} + C_{(М)} + C_{(А)} + C_{(Л)} + C_{(ПП)}$	$C_{(ВКУПНО)}$	58.35	(€/дел)

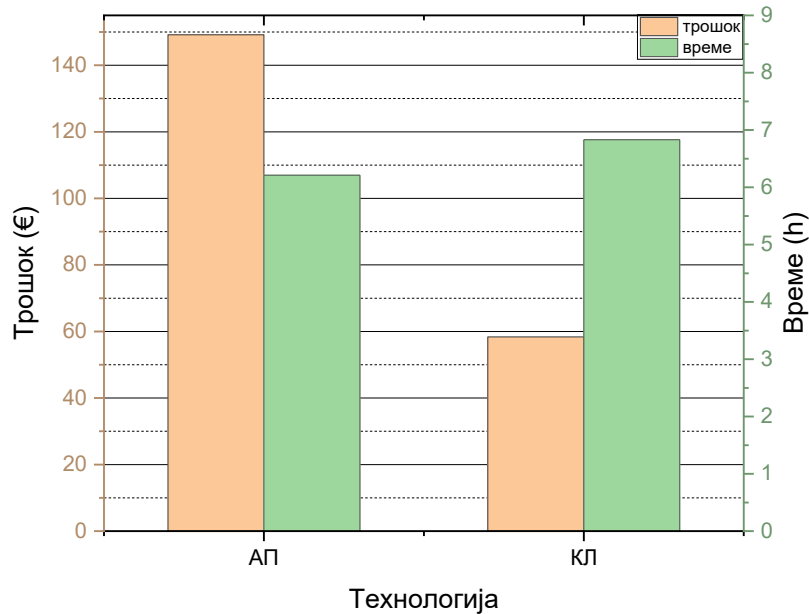
Во случајот на дентален мост овој трошок е 0.2 €/дел. Потоа, се користи машина за пескарење (800 €) во време од околу 5 минути. Оваа машина користи јаглероден и алуминиумски песок кој чини 5 €/kg, што во овој случај претставува трошок од 0.12 €/дел. Збирот на трошоците за КЛ со соодветните равенки е прикажан во Табела 5.23.

Според Табелата 5.23, вкупниот трошок за денталниот мост произведен со КЛ е 58.35 €/дел. При определувањето на трошокот, многу важен елемент е комплетирањето односно опфаќањето на целиот процес на производство од почетокот до крајот. Во однос на измерените времиња, процесот на РИ заедно со неопходните подготовки е 0.75 h, печатењето и сушењето кај брзата изработка на алат (ФП), е 1.33 h, подготовката за процесот на леење 1 h, процесот на загревање (греење и ладење) 3 h, леењето 1 min, грубото чистење 0.25 h и финализацијата 0.5 h. Ако се сумира целиот процес, тогаш вкупното времетраење е 6.83 h. Истата постапка е следена и при мерењето на времињата кај процесот на АП. Овде постојат разлики во времињата, почнувајќи од фазата на РИ, потребата од примена на САМ за АП, со времетраење од 1.05 h, потоа 1.66 h за изработка, вклучувајќи ги тука и потребните дополнителни подготовки, како и 3.5 h потребни за термичката обработка и на крајот 5 min за операцијата во пост производство. Ако се направи збир, вкупното време е 6.21 h. Производството, како и мерењето на процесните податоци и вредности се направени во денталната лабораторија Alp Dental (Косово). Денталниот мост произведен со КЛ е прикажан на Сликата 5.9.



Слика 5.9: Дентален мост (КЛ).

Со оглед дека веќе се познати податоците за времето и трошокот, можна е споредбата помеѓу двете технологии (АП и КЛ). Врз основа на податоците од претходната анализа за АП и од анализата за КЛ, времето и трошокот се прикажани на Сликата 5.10.



Слика 5.10: Споредба на АП и КЛ (време и трошок).

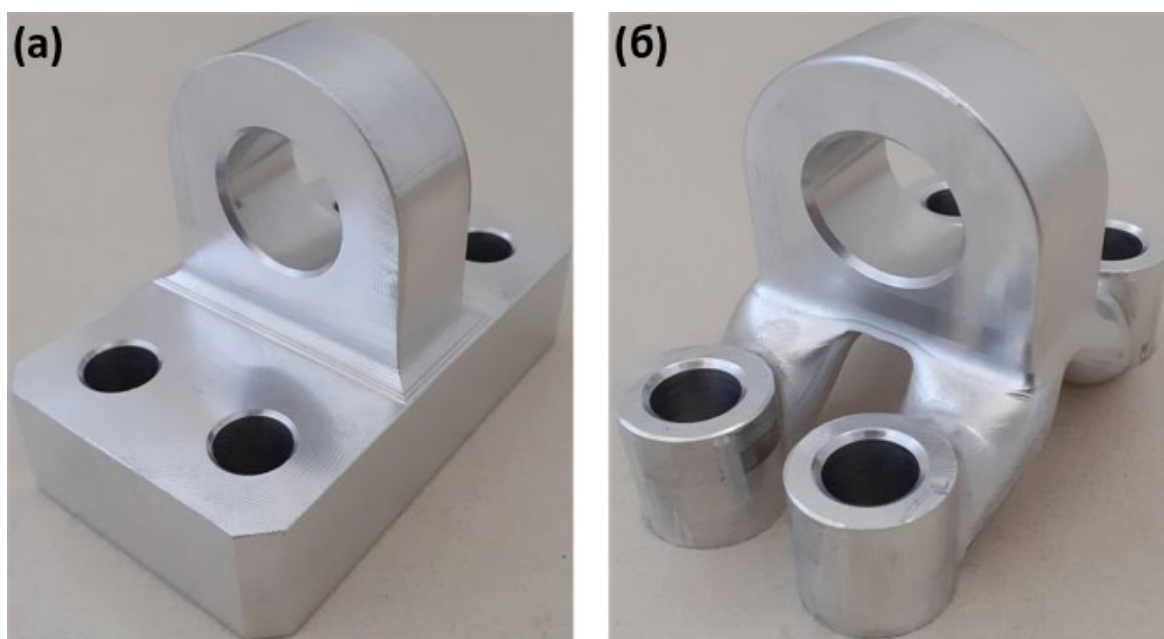
Од Сликата 5.10 може да се заклучи дека денталниот мост произведен со технологија на КЛ е 60.87% поефтин отколку кога е произведен со АП. Покрај индиректниот трошок кој влијае на зголемувањето на вкупниот трошок, секоја оперција поврзана со директните трошоци е поврзана со максимална искористеност на работата на изработка. Во случаите кога работата на изработка во процесот на АП се искористува максимално, како што е во реалните примери, тогаш вкупниот трошок по произведен дел со АП е 48.58% понизок отколку при производството со КЛ, согласно анализата прикажана во Точката 5.1.1, (Слика 5.3). Од друга страна, вкупното потребно време за целиот процес е во корист на АП, односно процесот на АП трае за 9.07% пократко споредено со времето кај КЛ. Оваа разлика е поврзана со искористеноста на работата на изработка. На оваа состојба влијае термичката обработка, која зафаќа речиси повеќе од половината од вкупното време. Во вакви случаи, целата платформа се става во печка, па вкупното време за процесот драстично се намалува.

5.2.2 АП и CNC обработка по три оски

Економската анализа и споредбата е направена и кај примерот со индустрискиот дел. Овде анализата е поделена на два дела. Прво, направена е споредба помеѓу АП и CNC обработката за ОД, а потоа, во вториот дел, направена е споредба помеѓу АП и CNC обработката за делот со 50% НМ. Во двата случаи, користена е CNC машина за режење

со три оски YCM (Yeong Chin Machinery, Кина). Цената на оваа машина е околу 200,000 € и има максимална моќност од 32 kW. Степенот на искористување е 5000 h/годишно. Како и во претходните анализи, земени се во предвид индиректните трошоци, вклучувајќи ги административните трошоци и трошокот за закуп на просториите. Во овој дел се вклучени и трошоците на CNC обработка, бидејќи се дистрибуирани на широк спектар на делови. По пресметката на индиректните трошоци, се пресметуваат директните трошоци. Во однос на трошоците за материјал, во овој случај за алуминиумска легура 6082, цената е 5 €/kg. За ОД, потребна е маса на материјал од 1.58 kg, или парче материјал со димензии 70 x 80 x 105 mm, додека за 50% НМ, потребна е маса од 1.25 kg или парче со димензии од 60 x 80 x 97 mm. Следниот чекор во пресметката е да се изберат алатите потребни за целиот процес на обработка. Тие се селектирани согласно технолошкиот процес. На крајот, собран е вкупниот трошок за сите алати и помагала кои се користени за време на процесот за 10,000 парчиња. За секој алат, поставен е векот на траење, што на крајот е дефинирано како максимален број на произведени парчиња со конкретниот алат. Било какво оштетување на алатот за време на производството не се зема во предвид. Следните пресметки се вклучени во групата трошоци за обработка, започнувајќи со генерирањето на програмата за делот. Притоа, вклучени се времето кое му е потребно на операторот за подготовка на САМ програмата, при што за овој вид на трошок е земена вредност од 30 €/h, потоа трошокот за лиценцата за користење на софтверот, во вредност од 2410 € а согласно времето на неговото користење, што во случајов е 1800 h/годишно. Во овој случај, користен е софтверот Inventor САМ (Autodesk, Inc., САД). Овие вредности потоа се множат со времето кое е потребно за работа со соодветната програма. Понатаму, се пресметува трошокот за работа на машината на час, амортизација на машината на час, трошок за работна рака, трошок за одржување на машината, трошок за подмачкување, трошок за системот за ладење и трошок за потрошената енергија. Сите овие трошоци се пресметани и изнесуваат 58 €/h. Трошокот за машината на час и трошокот за генерирање на програмата за изработка на делот се собрани и поделени со вкупниот број на произведени парчиња. Овој трошок е променлив и се менува со промената на вкупниот број на произведени парчиња. Времето за подесување, времето за обработка и непроизводното време се директно поврзани со комплетирањето на процесот на производство на делот. Времето за подесување е поврзано со вкупната количина на произведени парчиња во серии, односно ќе опаѓа со бројот на произведени парчиња. Времето на обработка, е директно поврзано со производството на делот. Како

непроизводно е означено времето за поставување и симнување на секој дел, вклучувајќи го и манипулирањето со алатот пред обработката. Трошокот за машината на час и времето на обработка меѓусебно се множат со цел да се добие трошокот за производство, додека трошокот за машината на час и непроизводното време меѓусебно се множат за да се добие непроизводниот трошок. На крајот двата вида на трошоци (трошокот за производство и непроизводниот трошок) се собираат за да се добие трошокот за обработка. Конечно, се собираат сите пресметани трошоци, вклучувајќи ги тука индиректниот трошок, трошокот за материјал и трошокот за обработка, и се добива вкупниот трошок. Она што останува како променлив трошок се однесува на програмирањето на делот и трошокот за машината на час. Овој трошок треба да се подели со бројот на парчиња определени за производство. Производството на деловите и сите неопходни мерења се направени во Tools Factory "PLUS" А.Е (Косово). Деловите за ОД и за 50% НМ произведени со CNC обработка се прикажани на Сликата 5.11.



Слика 5.11: CNC обработка на деловите: (а) ОД; (б) 50% НМ.

Бидејќи споредбата помеѓу АП и CNC обработката ќе се прави и за ОД и за делот со 50% НМ, првата споредба ќе биде направена во однос на ОД. Во овој случај трошокот за проектирање ќе биде занемарен бидејќи се претпоставува дека делот е веќе во производство, односно проектот и соодветните технички цртежи за него веќе постојат. Трошоците, соодветните равенки и другите податоци за ОД произведен со режење на CNC машина се прикажани во Табелата 5.24.

Табела 5.24: Трошоци за CNC обработка за ОД.

Опис и равенка	Ознака	Вредност	Единица мерка
Број на парчиња во серијата	$L_{(серија)}$	24	(парчиња)
Индириктен трошок по дел (равенка. 5.2, без амортизација на машината)	$C_{(И)}$	7.36	(€/дел)
Цена на материјалот по kg	$C_{(материјал)}$	5	(€/kg)
Маса на парчето	$M_{(маса по парче)}$	1.58	(kg)
Трошок за материјал по дел = $C_{(материјал)} * M_{(маса по парче)}$	$C_{(М)}$	7.90	(€/дел)
Ø16 mm трошок за 3 алати за челно глодање	$C_{(алат 1)}$	148.65	(€/пар)
Ø25 mm R4 трошок за вретенесто глодало	$C_{(алат 2)}$	441.1	(€/пар)
Ø10 mm трошок за алат за задупчување	$C_{(алат 3)}$	62.95	(€/пар)
Ø12.5 mm трошок за 3 алати за дупчење	$C_{(алат 4)}$	193.05	(€/пар)
Ø24 mm трошок за развртувач (2 заба)	$C_{(алат 5)}$	320.95	(€/пар)
Ø25 J6 mm трошок за развртувач по мерка	$C_{(алат 6)}$	590.75	(€/пар)
Ø8 mm трошок за закосување на рабови	$C_{(алат 7)}$	113.9	(€/пар)
Трошок за алати по дел (за серија од 10,000 парчиња)	$C_{(А)}$	0.18	(€/пар)
Генерирање на програма за делот по бројот на парчиња во серијата	$P_{(генерирање)}$	39.17	(€/L)
Цена за машината на час	$C_{(машина)}$	58	(€/h)
Време за подесување за бројот на парчиња во серијата	$T_{(подесување)}$	1	(h/L)
Време на обработка	$T_{(обработка)}$	0.55	(h)
Непроизводно време	$T_{(непроизводно)}$	0.25	(h)
Трошок за обработка по дел = $C_{(машина)} * [T_{(обработка)} + T_{(непроизводно)}] + [P_{(генерирање)} + C_{(машина)} * T_{(подесување)}] / L_{(серија)}$	$C_{(О)}$	50.44	(€/дел)
Вкупен трошок по дел = $C_{(И)} + C_{(М)} + C_{(А)} + C_{(О)}$	$C_{(ВКУПНО)}$	65.89	(€/дел)

Врз основа на Табелата 5.24, вкупниот трошок за производството на ОД е 65.89 €/дел. Со оглед дека кај анализата на АП во една изработка беа сместени 24 парчиња (Табела 5.13), заради споредба и овде се користи истиот податок. Оттука може да се заклучи дека трошокот за делот произведен со АП е понизок за 75.63%. Друг аспект кој може да биде предмет на споредба помеѓу АП и ОД (CNC обработката) е потребното

време за комплетното изработување на делот. Во овој случај, со процесот на CNC обработка, делот се завршува за 0.8 h, додека со користење на АП делот се завршува за 3.02 h, односно делот се произведува за 73.5% побрзо со CNC обработка, отколку со АП. Според тоа, може да се заклучи дека во овој случај економскиот бенефит е на страната на производството на ОД со CNC машина со три оски. Репроектирањето на ОД и производството со АП не е соодветно во економска смисла за овој случај, особено ако се има во предвид дека времето потребно за производството на делот и трошокот за машината имаат суштинско влијание врз вкупниот трошок. Исто така, кај процесот на АП, потребно е да се применат дополнителни операции и завршни операции на обработка, што кај CNC обработката не е случај. Тоа доведува до намалување на вкупните трошоци кај CNC обработката. Она што може да се каже како предност на АП во овој контекст е искористувањето на материјалот. Во случајот на производство на ОД со CNC обработка, потребен е материјал со маса од 1.58 kg (0.46 kg маса на делот, 70.88% отстранет материјал). Ваквото нерационално користење на материјалот има значително влијание кога станува збор за производство на големи количини, бидејќи тоа се разликува кај процесот на АП.

Истата споредба помеѓу АП и CNC обработката е направена и за производство на 50% НМ. Машината и процедурите кои се користени во овој случај се исти како и во случајот на производство на ОД, а кои претходно веќе се објаснети. Некои направени промени, вклучувајќи го и трошокот за проектирање се согласно истата постапка применета кај АП, но без пресметка за подготовката на работата, со оглед дека овде тој дел е вклучен во генерирањето на програма за делот. Трошоците, соодветните равенки и другите податоци за делот со 50% НМ, произведен со CNC режење по три оски се прикажани во Табела 5.25.

Врз основа на Табелата 5.25, вкупниот трошок за производството на делот со 50% НМ е 643.38 €/дел. И овде е користен истиот број на парчиња во серијата, како кај ОД и АП примерот (Табела 5.13). Според тоа, доколку трошокот се спореди со оној на делот произведен со АП, тогаш производството со CNC обработка е поскапо за 57.97%. Исто така, времето на производство драстично се менува во однос на времето кај АП, бидејќи времето на обработка со CNC машина е 8.8 h односно 65.68% подолго. Според оваа анализа, може да се заклучи дека репроектираниот ОД за АП не е соодветен за производство со CNC обработка со машина со три оски. Ова се должи на фактот дека

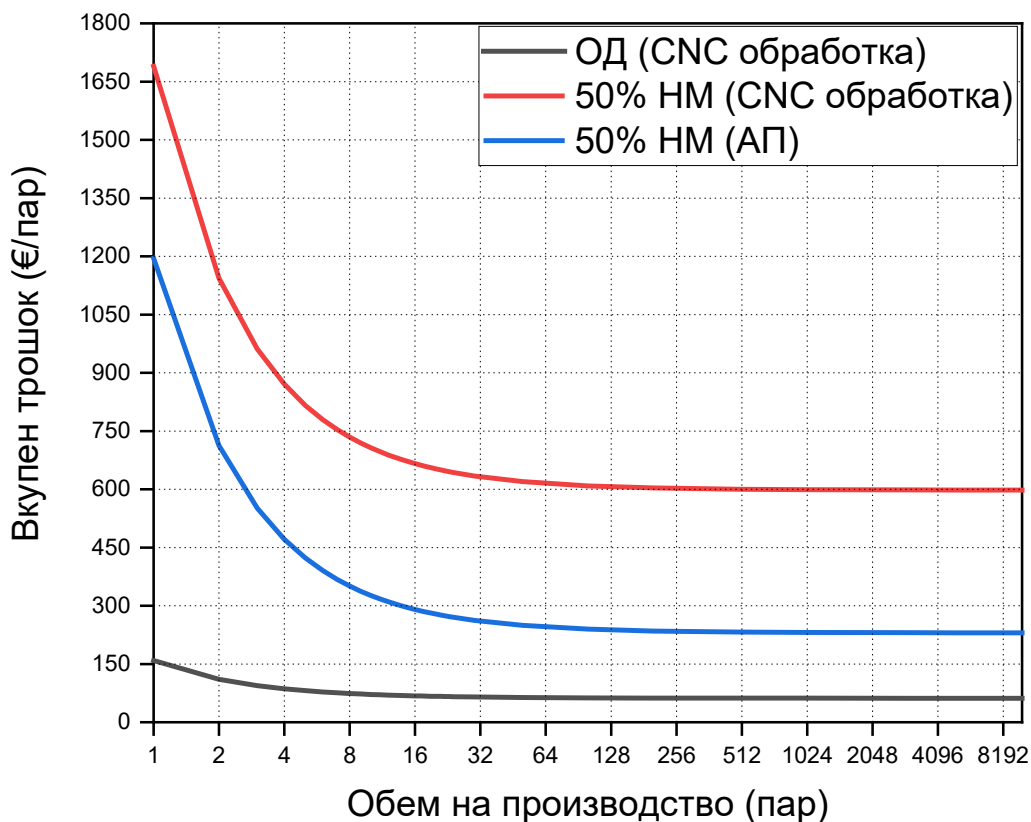
времето за производство по дел е многу долго, што значително влијае врз трошоците за производство и вкупниот трошок.

Табела 5.25: Трошоци за CNC обработка за 50% НМ.

Опис и равенка	Ознака	Вредност	Единица мерка
Број на парчиња во серијата	$L_{(серија)}$	24	(пар)
Индириктен трошок по дел (равенка 5.2, без амортизација на машината)	$C_{(И)}$	80.96	(€/дел)
Трошок за проектирање по дел (равенка 5.5, без пресметка на работата)	$C_{(ПР)}$	39.58	(€/дел)
Цена на материјалот по kg	$C_{(материјал)}$	5	(€/kg)
Маса на парчето	$M_{(маса на парче)}$	1.25	(kg)
Трошок за материјал по дел = $C_{(материјал)} * M_{(маса на парче)}$	$C_{(М)}$	6.25	(€/дел)
Ø16 mm трошок за 3 алати за челно глодање	$C_{(алат 1)}$	148.65	(€/пар)
Ø10 mm трошок за алат за задупчување	$C_{(алат 2)}$	62.95	(€/пар)
Ø12.5 mm трошок за 3 алати за дупчење	$C_{(алат 3)}$	193.05	(€/пар)
Ø24 mm трошок за развртувач (2 заба)	$C_{(алат 4)}$	320.95	(€/пар)
Ø25 J6 mm трошок за развртувач по мерка	$C_{(алат 5)}$	590.75	(€/пар)
Ø8 mm трошок за алат за закосување на рабови	$C_{(алат 6)}$	113.9	(€/пар)
Ø6 mm трошок за вретенесто глодало за 10 алати	$C_{(алат 7)}$	424	(€/пар)
Ø4.8 mm трошок за топчесто глодало за 20 алати	$C_{(алат 8)}$	1111	(€/пар)
Трошок за алати по дел (за серија од 10,000 парчиња)	$C_{(А)}$	0.29	(€/дел)
Генерирање на програма за делот за бројот на парчиња во серијата	$P_{(генерирање)}$	83.36	(€/L)
Цена за машината по час	$C_{(машина)}$	58	(€/h)
Време за подесување за бројот на парчиња во серијата	$T_{(подесување)}$	1	(h/L)
Време на обработка	$T_{(обработка)}$	8.5	(h)
Непроизводно време	$T_{(непроизводно)}$	0.3	(h)
Трошок за обработка по дел = $C_{(машина)} * [T_{(обработка)} + T_{(непроизводно)}] + P_{(генерирање)} + C_{(машина)} * T_{(подесување)} / L_{(серија)}$	$C_{(О)}$	516.29	(€/дел)
Вкупен трошок по дел = $C_{(И)} + C_{(М)} + C_{(А)} + C_{(О)}$	$C_{(ВКУПНО)}$	643.38	(€/дел)

Во ваков случај, доколку делот е со сложена геометрија, АП е соодветната технологија за производство, која е исто така и економски оправдана. Дотолку повеќе што (како и во примерот на ОД) искористувањето на материјалот кај АП е многу поволно, со оглед дека со репроектирањето се намалува масата на ОД за 50%. За производство на делот со CNC обработка, потребна е маса на материјал од 1.25 kg, за маса од 0.23 kg на финалниот дел, што значи дека 81.60% се отстранува во процесот на обработка.

Повикувајќи се на претходните претпоставки дека вкупната количина која треба да се произведе не е ограничена, одлучено е да се направат и некои анализи кои се однесуваат на обемот на производство. Притоа, направена е споредба помеѓу ОД и делот со 50% НМ, произведени со CNC обработка, и делот со 50% НМ произведен со АП. Кај оваа споредба, не е земен во предвид трошокот за проектирање за делот со 50% НМ. Трошокот за проектирање ќе биде незначителен откако ќе се зголемат количините. Оваа споредба е прикажана на Сликата 5.12.

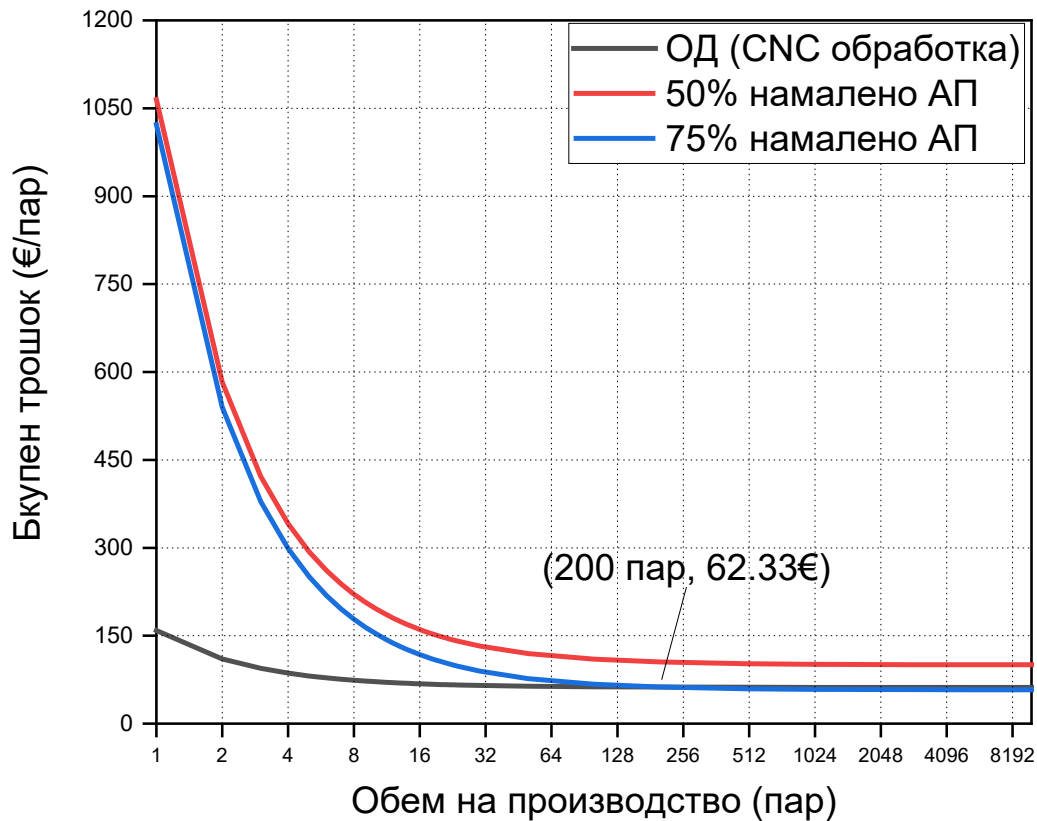


Слика 5.12: Споредба помеѓу АП и CNC обработка.

Од Сликата 5.12 може да се заклучи дека ОД произведен со CNC обработка, има пораст на трошокот за првичните помали количини, а потоа трошокот се намалува и се

стабилизира. За максималниот обем на производство, трошокот изнесува 61.85 €/дел, односно 61.10% понизок од трошокот при производство на мали количини. Кај примерот со CNC обработка на 50% НМ, се забележува дека на почетокот (за мали количини), трошокот е повисок во споредба со оној кај ОД, и со делот произведен со АП. За производство на максимални количини, трошокот е 598.02 €/дел, или 64.59% понизок отколку трошокот за производство на мали количини. Кај АП, трошокот при производство на максимална количина е 230.29 €/дел, или 80.72% понизок од трошокот за еден дел. Според оваа анализа, делот произведен со АП за количини од 10,000 парчиња е економски поефтин отколку истиот дел произведен со CNC обработка, но е поскап во однос на ОД произведен исто така со CNC обработка. Ако се споредат почетниот трошок за ОД и делот произведен со АП, тогаш разликата е 30.89% повисок трошок за АП. Помеѓу останатото, ова се должи на високиот трошок за машината и долгото време на производство по дел, што несомнено ќе биде намалено во иднина со намалување на цените на машината за АП и зголемување на брзината на производство. Кај примерот со 50% НМ (CNC обработка), делот произведен со АП е супериорен и во однос на трошокот и во однос на времето на производство.

Добиените резултати прикажани на Слика 5.12, се однесуваат на споредба на актуелната ситуација за двете технологии кај избраните примери на делови за истражувањето. Притоа, може да се види дека делот произведен со АП е скап во споредба со ОД делот произведен со CNC обработка. За очекување е дека со оглед на досегашниот развој, АП е економски поефтино само во случаите кога делот има сложена геометрија, како што е тоа во случајот на споредба со CNC обработката за делот со 50% НМ. Кога станува збор за делови како ОД чија геометрија има вообичаени карактеристики и постојат реални можности за производство со класични технологии, како на пример со CNC обработка, тогаш вкупниот трошок оди во прилог на класичното производство. Врз основа на претпоставките и анализите направени во Точката 5.1.2, (Слика 5.8), имаме различни резултати поврзани со актуелното производство со АП. Ова се должи на фактот дека трите главни фактори кои се исти и кај двата процеси (АП и CNC обработка) се намалени за 50% и 75%, соодветно. Ова создава ситуација со која се приближуваат пазарните цени помеѓу АП и класичното производство. Споредбата на ОД (CNC обработка) со 50% намалено и 75% намалено АП е прикажана на Слика 5.13.



Слика 5.13: Споредба помеѓу ОД (CNC обработка) и АП (50% и 75% намалено).

Од Сликата 5.13, може да се заклучи дека после 200 парчиња, трошокот за делот произведен со АП (пример со намалување од 75%) започнува да паѓа под трошокот за примерот со ОД, а на крајот трошокот за производството на делот со АП е 57.68 €/дел. Ова е поефтино отколку вкупниот трошок за ОД произведен со CNC обработка. Истото не важи за АП (пример со намалување од 50%), бидејќи овде вкупниот трошок е повисок од оној во примерот со ОД. Се укажува дека во блиска иднина, цената на машината, техничките подобрувања за зголемување на брзината, и трошокот за материјалот значително ќе влијаат кон подобрување на економските аспекти кои се директно поврзани со АП. Доколку пазарните цени во блиска иднина забележат пад во корист на машините и материјалите, критичната точка на рентабилноста ќе се помести дури и поблиску до почетните количини, што го прави производството со АП поприфатливо. Конечно, АП би било конкурентно со другите технологии на масовно производство, доколку се забележи намалување на вредностите на факторите кои се посочени во овие анализи.

6. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ПОНАТАМОШНА РАБОТА

6.1 Заклучоци

Придонесот на оваа теза е во областа на РИ и АП за проектирање и производство на сложени делови, преку проучување на следните атрибути: време, трошок, квалитет и флексибилност. Истражувањето е направено преку два примера, пример од денталната медицина и индустриски пример. Кај примерот од областа на денталната медицина, станува збор за дентален мост, кој е проектиран и произведен со РИ и АП, додека кај примерот од областа на индустријата, направено е репроектирање на оригиналниот дизајн на држач за ракавец, со користење на методата за оптимизација на топологијата, по што е реализирано производството на делот со АП. Презентирано е и споредбено истражување помеѓу АП и класичните технологии на производство. Врз основа на направените анализи и добиените резултати, произлегува следниот краток опис на заклучоците:

- Интегрирањето на РИ и АП е продуктивна метода за проектирање и производство на денталниот мост како сложен дел. Резултатите покажуваат флексибилност и краток целокупен процес, со користење на двете технологии, без потреба од дополнителни алати и помошни елементи кои обично се неопходни кај класичните технологии на производство.
- За репроектирањето на индустрискиот дел (оригинален дизајн), користена е методата на оптимизирање на топологијата базирано на поставување на слоевите. Генерирани се четири модели со критериум за намалување на масата на секој од нив. Моделите со намалување на масата од 40% и 50% имаат речиси идентични статички и резултати од модалната анализа во однос на оригиналниот дизајн. Моделот со 50% НМ е избран за споредба со делот со истата геометрија изработен на CNC машина. Методата оптимизирање на топологијата базирано на поставување на слоевите е пресметковно ефикасна и ефективна.
- За денталниот пример, каде се користи материјалот CoCrMo, преку симулација се добиени неколку процесни параметри. За проучување на влијанието на процес параметрите врз квалитетот на производство, испитувани се областа на топење и порозноста. Во обид да се најде компромис помеѓу густината на енергијата и

времето на изработка на делот, испитувано е влијанието на процес параметрите, како: брзина на скенирање, растојание на премините, и дебелина на слојот. Оптимизираните процесни параметри се користени за производство на делот со технологијата на Л-ФСП. Истата постапка е следена и за индустрискиот дел изработен од материјалот AlSi10Mg. Оптимизираните процесни параметри се користени за макро симулација на АП и производство на делот со технологијата на Л-ФСП. Симулацијата од можност за промена на различните параметри, дозволува предвидување на областа на топење и карактеристиките на порозноста.

- Од анализите на макро симулацијата на АП за индустрискиот дел, може да се забележи влијанието на процесот на АП врз распределбата на температурата и вкупната деформација. Деформацијата пред и по процесот на ладење е мала, така што таа не покажува никакви значајни промени. Исто така, од анализата напон–напрегања, може да се заклучи дека се присутни одредени пластични деформации. Макро термичката и статичка симулација се корисни методи за проектирање на производот во однос на предвидувањата на деформациите, со истовремено минимизирање на скапите експериментални истражувања.
- Избрана е оптичката метода со користење на 3D скенер за контрола на внатрешните облици на денталниот мост произведен со технологијата на Л-ФСП. Споредбата на ФП и КЛ со Л-ФСП, покажува дека Л-ФСП е по точен од ФП и КЛ. Истиот пристап е применет и во случајот на индустрискиот дел. Индустрискиот дел произведен со АП е спореден со дел изработен на CNC машина. Резултатите покажуваат дека делот произведен со АП е по точен отколку делот произведен со CNC обработка. Предмет на споредба се и одредени попречни пресеци. Овие резултати се во корист на делот произведен со АП. 3D скенирањето е ефективен пристап, а 3D скенерите се флексибилни алатки за димензионална анализа на деловите, особено за деловите со сложена геометрија. Тие можат лесно да бидат интегрирани во пошироки системи.
- Металографската анализа на денталниот дел изработен од CoCrMo со технологијата на Л-ФСП, покажува дека како резултат на процесот на синтерување, структурата е по хомогена, а порозноста е концентрирана само на рабовите на денталниот мост. Исто така, во микроструктурата можат да бидат идентификувани и границите на областа на топење, границите на зрното и јадрата. Ова се разликува кај делот од CoCrMo изработен со леење, каде се

појавуваат дендрични гранки и разгранувања со различна ориентација на кристализацијата, а присутна е и појава на пукнатини помеѓу зрната. Направена е исто така и металографска анализа на индустрискиот дел изработен од AlSi10Mg и произведен со технологијата на Л-ФСП. Во областа на топење, присутни се одредени полу-елиптични облици и некои сферични пори на водород. Границите на областа на топење и јадрата се добро идентификувани. Порозноста е евидентна во некои делови на примерокот, каде се забележуваат сферични пори и пори со облик на клучалка. Што се однесува до металографијата на алуминиумската легура 6082, микроструктурата е целосно различна од онаа кај AlSi10Mg, што значи дека постојат и разлики во механичките карактеристики. Процесните параметри и пост производството на деловите произведени со АП, се клучните елементи за добивање на фина и хомогена микроструктура, која води кон добри мехнички карактеристики.

- Времето за производство на денталниот дел со АП е 9.07% пократко отколку кај КЛ, вклучувајќи ја и термичката обработка како неопходна кај пост производството во АП. Термичката обработка опфаќа повеќе од 50% од вкупното време. Овде е вклучено исто така и времето потребно за процесот на РИ. Времето за производство на индустрискиот дел со АП е побавно во споредба со оригиналниот дизајн произведен со CNC обработка, за 73.5%. Ова се разликува кај репроектираниот дел (50% НМ), каде што времето за делот произведен со CNC обработка е побавно за 65.68%, споредено со АП. Анализите покажуваат дека операциите на пост производство имаат влијание врз вкупното време за деловите произведени со АП, но не може да се каже истото за сложеноста на геометријата, каде што има позитивно влијание поради намалувањето на масата, а тоа влијае врз намалување на времето на изработка.
- Кај денталниот дел, директниот трошок има влијание од 79.82% врз вкупниот трошок на делот, наспроти влијанието од 20.18% на индиректниот трошок. Распределбата на трошокот е диктирана од трошокот за материјал. Во споредбата на различните количини произведени со истата технологија на АП, вкупниот трошок може да се намали за околу 80%. Што се однесува до КЛ, во реален случај, кога производствениот простор е целосно зафатен со производи, вкупниот трошок по парче од делот произведен со АП е понизок за 48.58%. Во нереален случај, односно при споредба на само едно произведено парче, делот произведен

со КЛ е 60.87% поефтин од делот произведен со АП. Кај индустрискиот дел, индиректниот трошок има влијание од 52.47% во вкупниот трошок на индустрискиот дел, додека уделот на директниот трошок е 47.53%. Распределбата на трошокот е диктирана од производствените трошоци во рамките на директниот трошок. При споредбата со различните количини и капацитетот на машината, постои голема разлика во однос на тоа дали се работи за едно парче или поголема серија. Кај CNC обработката, делот произведен согласно оригиналниот дизајн е 75.63% поефтин отколку кај АП. Ова се разликува при споредба на комплесни делови (50% НМ), па во тој случај CNC обработката е 57.97% поскапа од АП. За поголеми серии, ситуацијата се разликува. Делот произведен со АП е 30.89% поскап отколку оригиналниот дизајн произведен со CNC обработка. Доколку се претпостави дека може да се намали трошокот за машината, материјалот и времето при АП за 75%, тогаш критичната точка на достигнување на трошоците на CNC обработката е 200 произведени парчиња.

6.2 Препораки за понатамошна работа

Препораките за понатамошна работа вклучуваат:

- Истражување на процесот во насока на одржување на дадени ограничувања при репродукцијата на сложени делови. Ова би вклучувало истражување на целиот процес, почнувајќи од почетниот дизајн, производството со некоја од класичните технологии, процесот на РИ и репродукција на делот со АП.
- Оригиналниот дизајн на индустрискиот дел може да биде оптимизиран и врз основа на методата на генеративен дизајн (GD - Generative Design). Со тоа би се постигнала висока стапка на флексибилност за АП и можноста за рана пресметка на трошоците на деловите произведени со АП, во споредба со трошоците кај класичната технологија.
- Од симулацијата во еден слој и симулацијата на порозноста за соодветните материјали, може да се направи посеопфатна анализа која ќе вклучува термичка историја и симулација на микроструктурата. Термичката историја дава увид во избраниот дел и може да ги предвиди топлиите и ладните области. Со симулација на микроструктурата, може да се идентификуваат карактеристиките на областа

на топење, топлинските влезови, ориентацијата на зрната, како и распределбата на големината на зрната. На овој начин ќе може многу поточно да се определат процесните параметри за АП.

- Макро симулацијата на индустрискиот дел може да биде проширена со анализа за предвидување на деформацијата базирана на методата на заостанати напрегања. Притоа, напрегањата се пресметуваат врз основа на факторот на нормализирање на напрегањата за секоја насока од анизотропската структура. Дотолку повеќе, симулационата анализа на термичката обработка на делот изработен со АП, со цел ослободување од заостанатите напрегања, може да биде многу важна за понатамошни истражувања.
- Врз основа на анализите на микроструктурата на експерименталните делови, во иднина може да се направат различни испитувања на механичките карактеристики при истите процесни параметри. Со тоа, истражувањето ќе биде посеопфатно и поквалитетно.
- Со оглед дека анализите во однос на времето и трошокот за РИ и АП се направени врз идентични делови во два примера, во понатамошната работа може да се направат испитувања за различни делови.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- Abdullah, Ahmad Ridhwan, Nur Aidah Nabihah Dandang, Nur Zalikha Khalil, and Wan Sharuzi Wan Harun. 2017. 'Effect of sintering temperature on physical properties & hardness of CoCrMo alloys fabricated by metal injection moulding process', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257.
- Aboulkhair, Nesma T, Ian Maskery, Ian Ashcroft, Chris Tuck, and Nicola M Everitt. 2015. "The role of powder properties on the processability of Aluminium alloys in selective laser melting." In: *22nd World of Photonics Congress: Lasers in Manufacturing conference*.
- Aboulkhair, Nesma T., Nicola M. Everitt, Ian Ashcroft, and Chris Tuck. 2014. 'Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting', *Additive Manufacturing*, 1-4: 77-86.
- Aboulkhair, Nesma T., Marco Simonelli, Luke Parry, Ian Ashcroft, Christopher Tuck, and Richard Hague. 2019. '3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting', *Progress in Materials Science*, 106.
- Allaire, Grégoire, Charles Dapogny, Rafael Estevez, Alexis Faure, and Georgios Michailidis. 2017. 'Structural optimization under overhang constraints imposed by additive manufacturing processes: an overview of some recent results', *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 2: 385-402.
- ANSYS. 2020. "Additive User's Guide (Print and Science)."
- Atia, MA, AA El-Gheriani, and DJ Ferguson. 2015. 'Validity of 3 shape scanner techniques: A comparison with the actual plaster study casts', *Biom Biostat Int J*, 2: 00026.
- Atzeni, E., L. Iuliano, G. Marchiandi, P. Minetola, A. Salmi, E. Bassoli, L. Denti, and A. Gatto. 2013. 'Additive manufacturing as a cost-effective way to produce metal parts.' In: *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*.
- Aversa, A., G. Marchese, A. Saboori, E. Bassini, D. Manfredi, S. Biamino, D. Ugues, P. Fino, and M. Lombardi. 2019. 'New Aluminum Alloys Specifically Designed for Laser Powder Bed Fusion: A Review', *Materials (Basel)*, 12.
- Awd, Mustafa, Felix Stern, Alexander Kampmann, Daniel Kotzem, Jochen Tenkamp, and Frank Walther. 2018. 'Microstructural Characterization of the Anisotropy and Cyclic Deformation Behavior of Selective Laser Melted AlSi10Mg Structures', *Metals*, 8.
- Bassoli, E., and L. Denti. 2018. 'Assay of Secondary Anisotropy in Additively Manufactured Alloys for Dental Applications', *Materials (Basel)*, 11.
- Baumers, M, C Tuck, R Wildman, I Ashcroft, E Rosamond, and R Hague. 2012. "Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering."

- In: *From Proceedings of Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*.
- Bell, Tyler, Beiwen Li, and Song Zhang. 2016. 'Structured Light Techniques and Applications.' In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
- Bendsoe, Martin Philip, and Noboru Kikuchi. 1988. 'Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method'.
- Bendsoe, Martin Philip, and Ole Sigmund. 2013. *Topology optimization: theory, methods, and applications* (Springer Science & Business Media).
- Bernardini, Fausto, Chandrajit L Bajaj, Jindong Chen, and Daniel R Schikore. 1999. 'Automatic reconstruction of 3D CAD models from digital scans', *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 9: 327-69.
- Bey, Aurelien, Raphaelle Chaine, Raphael Marc, Guillaume Thibault, and Samir AKKOUCHE. 2011. "Reconstruction of consistent 3D CAD models from point cloud data using a priori CAD models." In: *ISPRS workshop on laser scanning*.
- Biffi, C. A., J. Fiocchi, P. Bassani, and A. Tuissi. 2018. 'Continuous wave vs pulsed wave laser emission in selective laser melting of AlSi10Mg parts with industrial optimized process parameters: Microstructure and mechanical behaviour', *Additive Manufacturing*, 24: 639-46.
- Bikas, H., A. K. Lianos, and P. Stavropoulos. 2019. 'A design framework for additive manufacturing', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103: 3769-83.
- Boehler, Wolfgang, Guido Heinz, and Andreas Marbs. 2002. 'The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording', *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34: 430-36.
- Booth, Joran W., Jeffrey Alperovich, Pratik Chawla, Jiayan Ma, Tahira N. Reid, and Karthik Ramani. 2017. 'The Design for Additive Manufacturing Worksheet', *Journal of Mechanical Design*, 139.
- Boschetto, Alberto, Luana Bottini, Luciano Macera, and Francesco Veniali. 2020. 'Post-Processing of Complex SLM Parts by Barrel Finishing', *Applied Sciences*, 10.
- Bourell, David, Jean Pierre Kruth, Ming Leu, Gideon Levy, David Rosen, Allison M. Beese, and Adam Clare. 2017. 'Materials for additive manufacturing', *CIRP Annals*, 66: 659-81.
- Brackett, D, I Ashcroft, and R Hague. 2011. "Topology optimization for additive manufacturing." In: *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium, Austin, TX*, 348-62.

- Brajlih, Tomaz, Spela Ekselenski, Igor Drstvensek, and Urska Kostevsek. 2018. 'Accuracy Test of Dental Three-Dimensional Optical Scanner', *Journal of Production Engineering*, 21: 35-38.
- Brajlih, Tomaz, Tadej Tasic, Igor Drstvensek, Bogdan Valentan, Miodrag Hadzistevic, Vojko Pogacar, Joze Balic, and Bojan Acko. 2011. 'Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection', *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 57: 826-33.
- Buchbinder, D, W Meiners, K Wissenbach, and R Poprawe. 2015. 'Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties', *Journal of Laser Applications*, 27: S29205.
- Buchbinder, D, H Schleifenbaum, S Heidrich, W Meiners, and JJPP Bültmann. 2011. 'High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts', *Physics Procedia*, 12: 271-78.
- Buchon-Moragues, F., J. M. Bravo, M. Ferri, J. Redondo, and J. V. Sanchez-Perez. 2016. 'Application of Structured Light System Technique for Authentication of Wooden Panel Paintings', *Sensors (Basel)*, 16.
- Budzik, Grzegorz, Paweł Turek, Tomasz Dziubek, and Michał Gdula. 2019. 'Elaboration of the measuring procedure facilitating precision assessment of the geometry of mandible anatomical model manufactured using additive methods', *Measurement and Control*, 53: 181-91.
- Buj-Corral, Irene, Aitor Tejo-Otero, and Felip Fenollosa-Artés. 2020. 'Development of AM Technologies for Metals in the Sector of Medical Implants', *Metals*, 10.
- Buonamici, Francesco, Monica Carfagni, Rocco Furferi, Lapo Governi, Alessandro Lapini, and Yary Volpe. 2017. 'Reverse engineering modeling methods and tools: a survey', *Computer-Aided Design and Applications*, 15: 443-64.
- Buonamici, Francesco, Monica Carfagni, Rocco Furferi, Lapo Governi, and Yary Volpe. 2020. 'CAD Reconstruction: A Study on Reverse Modelling Strategies.' In: *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*.
- Buonamici, Francesco, Monica Carfagni, Rocco Furferi, Yary Volpe, and Lapo Governi. 2020. 'Reverse engineering by CAD template fitting: study of a fast and robust template-fitting strategy', *Engineering with Computers*.
- Butt, Javid. 2020. 'Exploring the Interrelationship between Additive Manufacturing and Industry 4.0', *Designs*, 4.
- Cabrini, M., F. Calignano, P. Fino, S. Lorenzi, M. Lorusso, D. Manfredi, C. Testa, and T. Pastore. 2018. 'Corrosion Behavior of Heat-Treated AlSi10Mg Manufactured by Laser Powder Bed Fusion', *Materials (Basel)*, 11.

- Calignano, Galati, and Iuliano. 2019. 'A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations', *Machines*, 7.
- Calignano, Flaviana, Luca Iuliano, Manuela Galati, Paolo Minetola, and Giovanni Marchiandi. 2020. 'Accuracy of down-facing surfaces in complex internal channels produced by laser powder bed fusion (L-PBF)', *Procedia CIRP*, 88: 423-26.
- Caspi, Dalit, Nahum Kiryati, and Joseph Shamir. 1998. 'Range imaging with adaptive color structured light', *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, 20: 470-80.
- Catalucci, Sofia, Nicola Senin, Danny Sims-Waterhouse, Stefan Ziegelmeier, Samanta Piano, and Richard Leach. 2020. 'Measurement of complex freeform additively manufactured parts by structured light and photogrammetry', *Measurement*, 164.
- Chang, Yi-Ling, Fei-Yi Hung, and Truan-Sheng Lui. 2019. 'Study of microstructure and tensile properties of infrared-heat-treated cast-forged 6082 aluminum alloy', *Journal of Materials Research and Technology*, 8: 173-79.
- Chen, C, and A Kak. 1987. "Modeling and calibration of a structured light scanner for 3-D robot vision." In: *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 807-15. IEEE.
- Chen, Jing, Wei Hou, Xiuzhuan Wang, Songlin Chu, and Zhiyi Yang. 2020. 'Microstructure, porosity and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg', *Chinese Journal of Aeronautics*, 33: 2043-54.
- Chowdary, Boppana V, Divesh R Sahatoo, and Raj Bhatti. 2007. "Some STL file generation issues in rapid prototyping." In: *Fifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2007) Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribbean: Education, Innovation, Technology and Practice//29 May–1 June*.
- Chu, Chen, Greg Graf, and David W Rosen. 2008. 'Design for additive manufacturing of cellular structures', *Computer-Aided Design and Applications*, 5: 686-96.
- Costabile, G., M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase, and D. Pham. 2017. 'Cost models of additive manufacturing: A literature review', *International Journal of Industrial Engineering Computations*: 263-83.
- DebRoy, T., H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, and W. Zhang. 2018. 'Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties', *Progress in Materials Science*, 92: 112-224.
- Despeisse, Mélanie, Martin Baumann, Phil Brown, Fiona Charnley, Simon J Ford, Alysia Garmulewicz, S Knowles, THW Minshall, Letizia Mortara, and FP Reed-Tsochas. 2017. 'Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda', *Technological Forecasting and Social Change*, 115: 75-84.

- Despeisse, Mélanie, and Simon Ford. 2015. 'The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability.' In: *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*.
- Diegel, Olaf, Axel Nordin, and Damien Motte. 2019. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing* (Springer).
- Dong, Z., X. Zhang, W. Shi, H. Zhou, H. Lei, and J. Liang. 2018. 'Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting', *Materials (Basel)*, 11.
- Fetisov, K. V., and P. V. Maksimov. 2018. 'Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts', *Journal of Physics: Conference Series*, 1015.
- Fleming, Thomas J., Alan Kavanagh, Greg Duggan, Brian O'Mahony, and Mackenzie Higgins. 2019. 'The effect of induction heating power on the microstructural and physical properties of investment cast ASTM-F75 CoCrMo alloy', *Journal of Materials Research and Technology*, 8: 4417-24.
- Frazier, William E. 2014. 'Metal Additive Manufacturing: A Review', *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23: 1917-28.
- Fujda, Martin. 2017. 'Microstructure and mechanical properties of EN AW 6082 aluminium alloy prepared by equal-channel angular pressing', *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 17.
- Galantucci, Luigi M, Maria Grazia Guerra, Michele Dassisti, and Fulvio Lavecchia. 2019. "Additive Manufacturing: New Trends in the 4 th Industrial Revolution." In: *International Conference on the Industry 4.0 model for Advanced Manufacturing*, 153-69. Springer.
- Galati, Manuela, Flaviana Calignano, Marco Viccica, and Luca Iuliano. 2020. 'Additive Manufacturing Redesigning of Metallic Parts for High Precision Machines', *Crystals*, 10.
- Galy, Cassiopée, Emilie Le Guen, Eric Lacoste, and Corinne Arvieu. 2018. 'Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences', *Additive Manufacturing*, 22: 165-75.
- Gebhardt, Andreas. 2011. 'Understanding additive manufacturing'.
- Gebhardt, Andreas, and Jan-Steffen Hötter. 2016. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing* (Carl Hanser Verlag GmbH Co KG).
- Gebisa, A. W., and H. G. Lemu. 2017. 'A case study on topology optimized design for additive manufacturing', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 276.

- Geng, Zhaohui, and Boraya Bidanda. 2017. 'Review of reverse engineering systems – current state of the art', *Virtual and Physical Prototyping*, 12: 161-72.
- Gerbino, Salvatore, Domenico Maria Del Giudice, Gabriele Staiano, Antonio Lanzotti, and Massimo Martorelli. 2015. 'On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84: 1787-99.
- Ghafoor, H. 2018. 'Reverse Engineering in Orthodontics', *Turk J Orthod*, 31: 139-44.
- Ghodsi, S., M. Alikhasi, and N. Soltani. 2019. 'Marginal Discrepancy of Single Implant-Supported Metal Copings Fabricated by Various CAD/CAM and Conventional Techniques Using Different Materials', *Eur J Dent*, 13: 563-68.
- Gibson, Ian, David W Rosen, and Brent Stucker. 2014. *Additive manufacturing technologies* (Springer).
- Gouge, Michael, and Pan Michaleris. 2017. *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing* (Butterworth-Heinemann).
- Goutianos, Stergios. 2017. 'Selective Laser Melting of Hot Gas Turbine Components: Materials, Design and Manufacturing Aspects', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 219.
- Guo, Xu, Jianhua Zhou, Weisheng Zhang, Zongliang Du, Chang Liu, and Ying Liu. 2017. 'Self-supporting structure design in additive manufacturing through explicit topology optimization', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 323: 27-63.
- Hällgren, Sebastian, Lars Pejryd, and Jens Ekengren. 2016. '(Re)Design for Additive Manufacturing', *Procedia CIRP*, 50: 246-51.
- Hamidi Nasab, Milad, Alessandro Giussani, Dario Gastaldi, Valeria Tirelli, and Maurizio Vedani. 2019. 'Effect of Surface and Subsurface Defects on Fatigue Behavior of AlSi10Mg Alloy Processed by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)', *Metals*, 9.
- Han, Quanquan, Heng Gu, Shwe Soe, Rossi Setchi, Franck Lacan, and Jacob Hill. 2018. 'Manufacturability of AlSi10Mg overhang structures fabricated by laser powder bed fusion', *Materials & Design*, 160: 1080-95.
- Han, X., T. Sawada, C. Schille, E. Schweizer, L. Scheideler, J. Geis-Gerstorfer, F. Rupp, and S. Spintzyk. 2018. 'Comparative Analysis of Mechanical Properties and Metal-Ceramic Bond Strength of Co-Cr Dental Alloy Fabricated by Different Manufacturing Processes', *Materials (Basel)*, 11.
- Harston, Stephen P, and Christopher A Mattson. 2010. 'Metrics for evaluating the barrier and time to reverse engineer a product', *Journal of Mechanical Design*, 132.

- Herrero, David, Jesús Martínez, and Pascual Martí. 2013. "An implementation of level set based topology optimization using GPU." In: *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Orlando, Florida, USA*, 1-10.
- Hitzler, L., S. Hafenstein, F. Mendez Martin, H. Clemens, E. Sert, A. Ochsner, M. Merkel, and E. Werner. 2020. 'Heat Treatments and Critical Quenching Rates in Additively Manufactured Al-Si-Mg Alloys', *Materials (Basel)*, 13.
- Hopkinson, Neil, and P Dicknes. 2003. 'Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217: 31-39.
- Hovig, Even Wilberg, Håkon Dehli Holm, and Knut Sørby. 2018. "Effect of processing parameters on the relative density of AlSi10Mg processed by laser powder bed fusion." In: *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, 268-76. Springer.
- Hull, Charles W. 1986. "APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREOGRAPHY." Edited by US Patent. United States of America.
- Ingle, Kathryn A. 1994. *Reverse engineering* (McGraw-Hill Professional Publishing).
- ISO/ASTM 52900. 2015. "Additive manufacturing - General principles - Terminology."
- Jakobsen, Jonas Vestfjell. 2016. 'Microstructure and Mechanical Properties of Welded AA6082 Aluminium Alloys', NTNU.
- Jebeile, Julie. 2017. 'Computer simulation, experiment, and novelty', *International Studies in the Philosophy of Science*, 31: 379-95.
- Jeong, Y. G., W. S. Lee, and K. B. Lee. 2018. 'Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method', *J Adv Prosthodont*, 10: 245-51.
- Junk, Stefan, Benjamin Klerch, Lutz Nasdala, and Ulrich Hochberg. 2018. 'Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot', *Procedia CIRP*, 70: 102-07.
- Junk, Stefan, and Rebecca Matt. 2014. 'New Approaches to the Application of Additive Manufacturing and Reverse Engineering in Design Education', *DS 81: Proceedings of NordDesign 2014, Espoo, Finland 27-29th August 2014*.
- Karpouzias, GK, and Eugene De Villiers. 2014. "Level-set based topology optimization using the continuous adjoint method." In: *An International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization. OPT-I*.

- Kazantseva, N. V., I. V. Ezhov, D. I. Davydov, and A. G. Merkushev. 2020. 'Analysis of Structure and Mechanical Properties of Co–Cr–Mo Alloy Obtained by 3D Printing', *Physics of Metals and Metallography*, 120: 1172-79.
- Kempen, K, L Thijs, E Yasa, M Badrossamay, W Verheecke, and JP Kruth. 2011. "Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg." In: *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 484-95.
- Kempen, K., L. Thijs, J. Van Humbeeck, and J. P. Kruth. 2012. 'Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting', *Physics Procedia*, 39: 439-46.
- Khorasani, AmirMahyar, Ian Gibson, Umar Shafique Awan, and Alireza Ghaderi. 2019. 'The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V', *Additive Manufacturing*, 25: 176-86.
- Kim, H. R., S. H. Jang, Y. K. Kim, J. S. Son, B. K. Min, K. H. Kim, and T. Y. Kwon. 2016. 'Microstructures and Mechanical Properties of Co-Cr Dental Alloys Fabricated by Three CAD/CAM-Based Processing Techniques', *Materials (Basel)*, 9.
- Klahn, Christoph, Bastian Leutenecker, and Mirko Meboldt. 2015. 'Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing', *Procedia CIRP*, 36: 230-35.
- Koutsoukis, Theodoros, Spiros Zinelis, George Eliades, Khalid Al-Wazzan, Mohammed Al Rifaiy, and Youssef S Al Jabbari. 2015. 'Selective laser melting technique of Co-Cr dental alloys: a review of structure and properties and comparative analysis with other available techniques', *Journal of Prosthodontics*, 24: 303-12.
- Krishnan, Manickavasagam, Eleonora Atzeni, Riccardo Canali, Flaviana Calignano, Diego Manfredi, Elisa Paola Ambrosio, and Luca Iuliano. 2014. 'On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS', *Rapid Prototyping Journal*, 20: 449-58.
- Krznar, Nino, Ana Pilipović, and Mladen Šercer. 2016. 'Additive Manufacturing of Fixture for Automated 3D Scanning – Case Study', *Procedia Engineering*, 149: 197-202.
- Kumar, A., P. K. Jain, and P. M. Pathak. 2012. 'Industrial Application of Point Cloud / STL Data for Reverse Engineering.' in, *Daaam International Scientific Book 2012*.
- Kumbhar, V. K., P. M. Pandey, and P. V. M. Rao. 2007. 'Improved intermediate point curve model for integrating reverse engineering and rapid prototyping', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37: 553-62.
- Langelaar, Matthijs. 2016. 'An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs', *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55: 871-83.
- Larrosa, N. O., W. Wang, N. Read, M. H. Loretto, C. Evans, J. Carr, U. Tradowsky, M. M. Attallah, and P. J. Withers. 2018. 'Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy', *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 98: 123-33.

- Le, K. Q., C. Tang, and C. H. Wong. 2018. 'A Study on the Influence of Scanning Strategies on the Levelness of the Melt Track in Selective Laser Melting Process of Stainless Steel Powder', *Jom*, 70: 2082-87.
- Lee, Kwan H, and H Woo. 2000. 'Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping', *Computers & Industrial Engineering*, 38: 21-38.
- Lee, Y. S., and W. Zhang. 2016. 'Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion', *Additive Manufacturing*, 12: 178-88.
- Lewandowski, John J., and Mohsen Seifi. 2016. 'Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties', *Annual Review of Materials Research*, 46: 151-86.
- Li, Yali, and Dongdong Gu. 2014. 'Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder', *Materials & Design*, 63: 856-67.
- Li, Z., B. Q. Li, P. Bai, B. Liu, and Y. Wang. 2018. 'Research on the Thermal Behaviour of a Selectively Laser Melted Aluminium Alloy: Simulation and Experiment', *Materials (Basel)*, 11.
- Li, Zhonghua, Zezhou Kuai, Peikang Bai, Yunfei Nie, Guang Fu, Wenpeng Liu, and Shuai Yang. 2019. 'Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Multi-Laser Beam Selective Laser Melting (SLM)', *Metals*, 9.
- Lindemann, Christian, Ulrich Jahnke, Matthias Moi, and Rainer Koch. 2012. "Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing." In: *23th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin Texas USA 6th-8th August*.
- Liou, Frank W. 2007. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development* (Crc Press).
- Liu, Zhenyu, and Jan G Korvink. 2008. 'Adaptive moving mesh level set method for structure topology optimization', *Engineering Optimization*, 40: 529-58.
- Pastorius, Walt. 2015. "STRUCTURED LIGHT VS. LASER TRIANGULATION FOR 3D SCANNING AND INSPECTION". *LMI Technologies*. <https://lmi3d.com/company/digital-hub/blog/structured-light-vs-laser-triangulation-3d-scanning-and-inspection>. Published: 2015.12.7.
- Maamoun, A. H., Y. F. Xue, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis. 2018. 'The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys', *Materials (Basel)*, 12.
- Maamoun, Ahmed, Mohamed Elbestawi, and Stephen Veldhuis. 2018. 'Influence of Shot Peening on AlSi10Mg Parts Fabricated by Additive Manufacturing', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2.

- Maamoun, Ahmed H., Mohamed Elbestawi, Goulmara K. Dosbaeva, and Stephen C. Veldhuis. 2018. 'Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder', *Additive Manufacturing*, 21: 234-47.
- Madachy, Raymond J, and Daniel Houston. 2017. *What Every Engineer Should Know about Modeling and Simulation* (CRC Press).
- Manfredi, Diego, and Róbert Bidulský. 2017. 'Laser powder bed fusion of aluminum alloys', *Acta Metallurgica Slovaca*, 23.
- Marchese, Giulio, Alberta Aversa, Massimo Lorusso, Diego Manfredi, Flaviana Calignano, Mariangela Lombardi, Sara Biamino, and Matteo Pavese. 2018. 'Development and characterisation of aluminium matrix nanocomposites AlSi10Mg/MgAl₂O₄ by laser powder bed fusion', *Metals*, 8: 175.
- Medikonda, Sandeep, Sriraghav Sridharan, Sunil Acharya, and John Doyle. 2019. "Light Weighting Solutions for Additively Manufactured Aviation Components." In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, V02AT02A053. American Society of Mechanical Engineers.
- Mergulhão, Marcello. 2017. "Investigation of mechanical, microstructural and thermal behavior of CoCrMo alloy manufactured by selective laser melting and casting techniques." In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*.
- Milewski, John O. 2017. 'Additive manufacturing of metals', *From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*: 134-57.
- Minetola, Paolo, Manuela Galati, Flaviana Calignano, Luca Iuliano, Giovanni Rizza, and Luca Fontana. 2020. 'Comparison of dimensional tolerance grades for metal AM processes', *Procedia CIRP*, 88: 399-404.
- Mirzendehtdel, Amir M., and Krishnan Suresh. 2016. 'Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing', *Computer-Aided Design*, 81: 1-13.
- Montlahuc, Jérémy, Ghazanfar Ali Shah, Arnaud Polette, and Jean-Philippe Pernot. 2019. 'As-scanned point clouds generation for virtual reverse engineering of CAD assembly models'.
- Moshiri, Candeo, Carmignato, Mohanty, and Tosello. 2019. 'Benchmarking of Laser Powder Bed Fusion Machines', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3.
- Müller, Marlene. 2012. 'Generalized linear models.' In: *Handbook of Computational Statistics* (Springer).
- Niaki, Mojtaba Khorram, and Fabio Nonino. 2018. 'The Management of Additive Manufacturing', *Springer*. doi, 10: 978-3.

- Oh, Yosep, Chi Zhou, and Sara Behdad. 2018. 'Part decomposition and assembly-based (Re) design for additive manufacturing: A review', *Additive Manufacturing*, 22: 230-42.
- Orme, Melissa, Ivan Madera, Michael Gschweidl, and Michael Ferrari. 2018. 'Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware', *Designs*, 2.
- Orqu era, Myriam, S ebastien Campocasso, and Dominique Millet. 2017. 'Design for Additive Manufacturing Method for a Mechanical System Downsizing', *Procedia CIRP*, 60: 223-28.
- Park, Johnny, Guilherme N DeSouza, and Avinash C Kak. 2001. "Dual-beam structured-light scanning for 3-D object modeling." In: *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 65-72. IEEE.
- Park, Johnny, and Guilherme N. DeSouza. 2005. '3-D Modeling of Real-World Objects Using Range and Intensity Images.' In: *Machine Learning and Robot Perception*.
- Paul, CP, AN Jinoop, and KS Bindra. 2018. 'Metal additive manufacturing using lasers.' in, *Additive Manufacturing: Applications and Innovations* (CRC Press Florida).
- Paulic, Matej, Tomaz Irgolic, Joze Balic, Franc Cus, Andrej Cupar, Tomaz Brajljeh, and Igor Drstvensek. 2014. 'Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing', *Procedia Engineering*, 69: 795-803.
- Pereira, Tanisha, John V Kennedy, and Johan Potgieter. 2019. 'A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job', *Procedia Manufacturing*, 30: 11-18.
- Pimenta, M. A., L. C. Frasca, R. Lopes, and E. Rivaldo. 2015. 'Evaluation of marginal and internal fit of ceramic and metallic crown copings using x-ray microtomography (micro-CT) technology', *J Prosthet Dent*, 114: 223-8.
- Plocher, J anos, and Ajit Panesar. 2019. 'Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures', *Materials & Design*, 183: 108164.
- Podrez-Radziszewska, M, K Haimann, W Dudziński, and M Morawska-Sołtysik. 2010. 'Characteristic of intermetallic phases in cast dental CoCrMo alloy', *Archives of Foundry Engineering*, 10: 51-56.
- Pradel, Patrick, Zicheng Zhu, Richard Bibb, and James Moultrie. 2018. 'A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design', *Journal of Engineering Design*, 29: 291-326.
- Promoppatum, Patcharapit, and Shi-Chune Yao. 2020. 'Influence of scanning length and energy input on residual stress reduction in metal additive manufacturing: Numerical and experimental studies', *Journal of Manufacturing Processes*, 49: 247-59.

- Protopsaltis, Antonis I., and Ioannis Fudos. 2010. 'A Feature-Based Approach to Re-engineering CAD Models from Cross Sections', *Computer-Aided Design and Applications*, 7: 739-57.
- Raja, Vinesh, and Kiran J Fernandes. 2007. *Reverse engineering: an industrial perspective* (Springer Science & Business Media).
- Read, Noriko, Wei Wang, Khamis Essa, and Moataz M. Attallah. 2015. 'Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development', *Materials & Design (1980-2015)*, 65: 417-24.
- Redwood, Ben, Filemon Schffer, and Brian Garret. 2017. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications* (3D Hubs).
- Rias, A, and F Segonds. 2016. "Design for Additive Manufacturing: A Creative Approach. DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference 411–420."
- Rickenbacher, L., A. Spierings, and K. Wegener. 2013. 'An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)', *Rapid Prototyping Journal*, 19: 208-14.
- Rigo, O, and C Engel. 2013. "Selective Laser Melting versus Electron Beam Melting." In: *Sirrus*.
- Robinson, Alan, Lyuba Alboul, and Marcos Rodrigues. 2004. 'Methods for indexing stripes in uncoded structured light scanning systems'.
- Rocchini, C., P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno. 2001. 'A low cost 3D scanner based on structured light', *Computer Graphics Forum*, 20: 299-308.
- Rodrigues, Marcos, Mariza Kormann, C Schuhler, and P Tomek. 2013. "Structured light techniques for 3D surface reconstruction in robotic tasks." In: *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2013*, 805-14. Springer.
- Ruffo, M., C. Tuck, and R. Hague. 2006. 'Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220: 1417-27.
- Ruffo, Massimiliano, and Richard Hague. 2007. 'Cost estimation for rapid manufacturing'simultaneous production of mixed components using laser sintering', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221: 1585-91.
- Sahin, O., S. Uzunoglu, and E. Sahin. 2015. 'Mechanical Characterization of CoCrMo Alloys Consisting of Different Palladium Ratios Produced by Investment Casting Method', *Acta Physica Polonica A*, 128: B-149-B-52.

- Salonitis, Konstantinos. 2016. 'Energy efficiency of metallic powder bed additive manufacturing processes.' In: *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* (Springer).
- Salvi, Joaquim, Jordi Pagès, and Joan Batlle. 2004. 'Pattern codification strategies in structured light systems', *Pattern Recognition*, 37: 827-49.
- Sarentica, Atilla. 2019. "Conventional heat treatment of additively manufactured AlSi10Mg."
- Sauerwein M., Bakker C.A. and Balkenende A.R. 2017. "Additive manufacturing for circular product design: a literature review from a design perspective." In: *PLATE conference*.
- Saurabh, Jain, Nigudkar N. Niranjana, Faisal Hasan, and Atul Kumar. 2016. 'An integrated reverse engineering and rapid prototyping approach towards reconstruction of damaged impeller', *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 23.
- Seki, Erina, Yuka Kajima, Atsushi Takaichi, Nuttaphon Kittikundecha, Hla Htoot Wai Cho, Hein Linn Htat, Hisashi Doi, Takao Hanawa, and Noriyuki Wakabayashi. 2019. 'Effect of heat treatment on the microstructure and fatigue strength of CoCrMo alloys fabricated by selective laser melting', *Materials Letters*, 245: 53-56.
- Shabani, B., and V. Dukovski. 2018a. 'REVERSE ENGINEERING AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CIRCULAR ECONOMY', *Mechanical Engineering Scientific Journal*, 36: 123-29.
- Shabani, B., and Z. Pandilov. 2017. 'ANALYZING AND APPLICATION OF REVERSE ENGINEERING FOR DESIGN AND DEVELOPMENT OF MECHANICAL PARTS', *Mechanical Engineering – Scientific Journal*, 35: 89-96.
- Shabani, Betim, and Vladimir Dukovski. 2018b. "Cloud oriented Additive Technology use for Fast Prototype Development." In: *UBT International Conference*. 335.
- Shabani, Betim, and Vladimir Dukovski. 2019. "Application of decision making method (AHP) in Reverse Engineering and Additive Manufacturing Technologies." In: *UBT International Conference*. 145.
- Shabani, Betim, Gligorče Vrtanoski, and Vladimir Dukovski. 2018. 'Integrated reverse engineering and additive technology systems', *Mechanical Engineering – Scientific Journal*, 36: 47-54.
- Sharif, S., A. A. Raus, M. S. Wahab, Z. Shayfull, K. Kamarudin, M. Ibrahim, M. M. A. B. Abdullah, S. Z. Abd Rahim, M. F. Ghazali, N. Mat Saad, M. M. Ramli, S. A. Zainol Murad, and S. S. Mat Isa. 2016. 'The Influence of Selective Laser Melting Parameters on Density and Mechanical Properties of AlSi10Mg', *MATEC Web of Conferences*, 78.
- Sigmund, Ole, and Kurt Maute. 2013. 'Topology optimization approaches', *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48: 1031-55.

- Sing, S. L., and W. Y. Yeong. 2020. 'Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments', *Virtual and Physical Prototyping*, 15: 359-70.
- Sing, Swee Leong, Sheng Huang, and Wai Yee Yeong. 2020. 'Effect of solution heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion produced cobalt-28chromium-6molybdenum', *Materials Science and Engineering: A*, 769.
- Söderhjelm, Kajsa. 2017. 'Topology Optimization for Additive Manufacturing', Lund University.
- Srivatsan, TS, and TS Sudarshan. 2015. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications* (CRC Press).
- Stugelmayer, Edward. 2018. 'Characterization of Process Induced Defects in Laser Powder Bed Fusion Processed AlSi10Mg Alloy'.
- Sun, S, M Brandt, and M Easton. 2017. 'Powder bed fusion processes: An overview.' In: *Laser Additive Manufacturing* (Elsevier).
- Surmen, Omer, Sakin Zeytin, Mehmet Tarakci, and Yucel Gencer. 2018. 'Improving the Productivity and Energy Efficiency by a Heat Treatment Method Applied to Aluminum Forged Parts', *European Scientific Journal*.
- Szala, Mirosław, Karolina Beer-Lech, Kamil Gancarczyk, Onur Baran Kilic, Paweł Pędrak, Ali Özer, and Anna Skic. 2017. 'Microstructural Characterisation of Co-Cr-Mo Casting Dental Alloys', *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11: 76-82.
- Szilvsi-Nagy, Márta, and GY Matyasi. 2003. 'Analysis of STL files', *Mathematical and computer modelling*, 38: 945-60.
- Takaichi, Atsushi, Takayuki Nakamoto, Natsuka Joko, Naoyuki Nomura, Yusuke Tsutsumi, Satoshi Migita, Hisashi Doi, Shingo Kurosu, Akihiko Chiba, and Noriyuki Wakabayashi. 2013. 'Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications', *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 21: 67-76.
- Thompson, Mary Kathryn, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrihu Ahuja, and Filomeno Martina. 2016. 'Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints', *CIRP Annals*, 65: 737-60.
- Tocci, Marialaura, Annalisa Pola, Marcello Gelfi, and Giovina Marina La Vecchia. 2020. 'Effect of a New High-Pressure Heat Treatment on Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy', *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51: 4799-811.
- Tran, Hai T., Qian Chen, Jonathan Mohan, and Albert C. To. 2020. 'A new method for predicting cracking at the interface between solid and lattice support during laser powder bed fusion additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 32.

- Ullah, Rizwan, Jan Sher Akmal, Sampsa V. A. Laakso, and Esko Niemi. 2020. 'Anisotropy of additively manufactured AlSi10Mg: threads and surface integrity', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107: 3645-62.
- Ullattuthodi, S., K. P. Cherian, R. Anandkumar, and M. S. Nambiar. 2017. 'Marginal and internal fit of cobalt-chromium copings fabricated using the conventional and the direct metal laser sintering techniques: A comparative in vitro study', *J Indian Prosthodont Soc*, 17: 373-80.
- Uriati, Federico, Filippo Da Rin Betta, Paolo Ferro, Stefano Rosso, Gianpaolo Savio, Gianmaria Concheri, and Roberto Meneghello. 2020. 'High Density AlSi10Mg Aluminium Alloy Specimens Obtained by Selective Laser Melting.' In: *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*.
- Uzan, Naor Elad, Shlomo Ramati, Roni Shneck, Nachum Frage, and Ori Yeheskel. 2018. 'On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM)', *Additive Manufacturing*, 21: 458-64.
- van Dijk, N. P., G. H. Yoon, F. van Keulen, and M. Langelaar. 2010. 'A level-set based topology optimization using the element connectivity parameterization method', *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42: 269-82.
- Vaneker, Tom, Alain Bernard, Giovanni Moroni, Ian Gibson, and Yicha Zhang. 2020. 'Design for additive manufacturing: Framework and methodology', *CIRP Annals*.
- Varady, Tamas. 2008. 'Automatic Procedures to Create CAD Models from Measured Data', *Computer-Aided Design and Applications*, 5: 577-88.
- Varady, Tamas, and Ralph Martin. 2002. 'Reverse engineering', *Handbook of computer aided geometric design*: 651-81.
- Verbart, Alexander, M. Langelaar, Nico van Dijk, and Fred Van Keulen. 2012. "Level Set Based Topology Optimization with Stress Constraints and Consistent Sensitivity Analysis." In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & BR>20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & BR>14th AIAA*.
- Vock, Silvia, Burghardt Klöden, Alexander Kirchner, Thomas Weißgärber, and Bernd Kieback. 2019. 'Powders for powder bed fusion: a review', *Progress in Additive Manufacturing*, 4: 383-97.
- Volpe, Yary, Alessandro Lapini, Lapo Governi, Rocco Furferi, Monica Carfagni, and Francesco Buonamici. 2018. 'Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach', *Journal of Computational Design and Engineering*, 5: 145-59.
- Vukašinović, Nikola, and Jože Duhovnik. 2019. 'Advanced CAD modeling', *Explicit, parametric, free-form CAD and Re-engineering. Cham: Springer Nature Switzerland AG*.

- Wan, Long, Yongxian Huang, Weiqiang Guo, Shixiong Lv, and Jicai Feng. 2014. 'Mechanical Properties and Microstructure of 6082-T6 Aluminum Alloy Joints by Self-support Friction Stir Welding', *Journal of Materials Science & Technology*, 30: 1243-50.
- Wang, J. H., J. Ren, W. Liu, X. Y. Wu, M. X. Gao, and P. K. Bai. 2018. 'Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on Microstructure and Properties of Co-Cr Alloy', *Materials (Basel)*, 11.
- Wang, Jun, Dongxiao Gu, Zhanheng Gao, Zeyun Yu, Changbai Tan, and Laishui Zhou. 2013. 'Feature-Based Solid Model Reconstruction', *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 13.
- Wang, Jun, Dongxiao Gu, Zeyun Yu, Changbai Tan, and Laishui Zhou. 2012. 'A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering', *Computers & Industrial Engineering*, 63: 1189-200.
- Wang, Wego. 2010. *Reverse engineering: Technology of reinvention* (Crc Press).
- Wang, Xian, Liqun Li, Jingyu Qu, and Wang Tao. 2019. 'Microstructure and mechanical properties of laser metal deposited AlSi10Mg alloys', *Materials Science and Technology*, 35: 2284-93.
- Wang, Yaguang, Jincheng Gao, and Zhan Kang. 2018. 'Level set-based topology optimization with overhang constraint: Towards support-free additive manufacturing', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 339: 591-614.
- Wang, Yaguang, and Zhan Kang. 2017. 'Structural shape and topology optimization of cast parts using level set method', *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 111: 1252-73.
- Wieczorowski, M, M Ruciński, and R Koteras. 2010. 'Application of optical scanning for measurements of castings and cores', *Archives of Foundry Engineering*, 10: 265-68.
- Wu, Haidong, Jian Gao, Si Li, Yaohui Zhang, and Detao Zheng. 2013. 'A review of geometric reconstruction algorithm and repairing methodologies for gas turbine components', *Telkomnika*, 11: 1609-18.
- Wu, J., X. Q. Wang, W. Wang, M. M. Attallah, and M. H. Loretto. 2016. 'Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg', *Acta Materialia*, 117: 311-20.
- Wu, Lin, Haiting Zhu, Xiuying Gai, and Yanyan Wang. 2014. 'Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strength of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting', *The Journal of prosthetic dentistry*, 111: 51-55.
- Xin, Li, Hou Wenguang, and Shang Haoliang. 2008. "The Theory and Application of Structured Light Photogrammetry with Known Angle." In: *XXIst ISPRS Congress Technical Commission V July*, 3-11.

- Xu, Zhouli, Huijuan Ma, Ning Zhao, and Zhili Hu. 2020. 'Investigation on Compressive Formability and Microstructure Evolution of 6082-T6 Aluminum Alloy', *Metals*, 10.
- Yakout, Mostafa, M. A. Elbestawi, and Stephen C. Veldhuis. 2018. 'A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies', *Solid State Phenomena*, 278: 1-14.
- Yakout, Mostafa, M. A. Elbestawi, and Stephen C. Veldhuis. 2019. 'Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L', *Journal of Materials Processing Technology*, 266: 397-420.
- Yang, Li, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballykalathil Menon, and Soeren Wiener. 2017. *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production* (Springer).
- Yap, C. Y., C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, and S. L. Sing. 2015. 'Review of selective laser melting: Materials and applications', *Applied Physics Reviews*, 2.
- Yu, Huangchao, Huajie Hong, Su Cao, and Rafiq Ahmad. 2020. 'Topology Optimization for Multipatch Fused Deposition Modeling 3D Printing', *Applied Sciences*, 10.
- Zavala-Arredondo, Miguel, Tyler London, Madie Allen, Tomaso Maccio, Sam Ward, David Griffiths, Amanda Allison, Paul Goodwin, and Carl Hauser. 2019. 'Use of power factor and specific point energy as design parameters in laser powder-bed-fusion (L-PBF) of AlSi10Mg alloy', *Materials & Design*, 182.
- Zhang, Botao, Archak Goel, Omkar Ghalsasi, and Sam Anand. 2019. 'CAD-based design and pre-processing tools for additive manufacturing', *Journal of Manufacturing Systems*, 52: 227-41.
- Zhang, J., Y. Tan, T. Bao, Y. Xu, X. Xiao, and S. Jiang. 2020. 'Discrete Element Simulation of the Effect of Roller-Spreading Parameters on Powder-Bed Density in Additive Manufacturing', *Materials (Basel)*, 13.
- Zhang, K., G. Fu, P. Zhang, Z. Ma, Z. Mao, and D. Z. Zhang. 2018. 'Study on the Geometric Design of Supports for Overhanging Structures Fabricated by Selective Laser Melting', *Materials (Basel)*, 12.
- Zhang, Zhi-Dong, Osezua Ibadode, Usman Ali, Chinedu Francis Dibia, Pouyan Rahnama, Ali Bonakdar, and Ehsan Toyserkani. 2020. 'Topology optimization parallel-computing framework based on the inherent strain method for support structure design in laser powder-bed fusion additive manufacturing', *International Journal of Mechanics and Materials in Design*.
- Zhou, Y. H., Z. H. Zhang, Y. P. Wang, G. Liu, S. Y. Zhou, Y. L. Li, J. Shen, and M. Yan. 2019. 'Selective laser melting of typical metallic materials: An effective process prediction model developed by energy absorption and consumption analysis', *Additive Manufacturing*, 25: 204-17.

- Zhu, Zuowei, Nabil Anwer, and Luc Mathieu. 2017. 'Deviation Modeling and Shape Transformation in Design for Additive Manufacturing', *Procedia CIRP*, 60: 211-16.
- Zwier, Marijn P., and Wessel W. Wits. 2016. 'Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization', *Procedia CIRP*, 55: 128-33.