



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО
СКОПЈЕ

Машински факултет - Скопје



Огнен Гоце Тутески

ПРИМЕНА НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ТЕХНОЛОГИИ НА
АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО ВО КОНСТРУКТИВНИ ИЗВЕДБИ НА
АЛАТИ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ

докторски труд

Скопје, 2023

Докторанд:
ОГНЕН, ГОЦЕ ТУТЕСКИ

Тема:
ПРИМЕНА НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ТЕХНОЛОГИИ НА АДИТИВНО
ПРОИЗВОДСТВО ВО КОНСТРУКТИВНИ ИЗВЕДБИ НА АЛАТИ ЗА ИНЈЕКЦИОНО
ВБРИЗГУВАЊЕ

Ментор:

Проф. д-р АТАНАС КОЧОВ,
Машински факултет - Скопје

Комисија за одбрана:

Проф. д-р ВЛАДИМИР ДУКОСКИ (претседател)
Машински факултет - Скопје

Проф. д-р АТАНАС КОЧОВ,
Машински факултет – Скопје

Проф. д-р ГЛИГОРЧЕ ВРТАНОСКИ,
Машински факултет - Скопје

Проф. д-р АНИТА ГРОЗДАНОВ,
Технолошко-металуршки факултет - Скопје

Prof. d-r BLAŽ NARDIN,
Faculty of Polymer Technology, Slovenj Gradec, Slovenia

Научна област:

ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМИ (21403)

Датум на одбрана:

07.05.2024

м-р Огнен Гоце Тутески

**ПРИМЕНА НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ТЕХНОЛОГИИ НА АДИТИВНО
ПРОИЗВОДСТВО ВО КОНСТРУКТИВНИ ИЗВЕДБИ НА АЛАТИ ЗА
ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ**

– А п с т р а к т –

Предметот на истражување на оваа докторска дисертација е анализа на применливоста на стереолитографските гравури како функционални елементи во алатите за инјекцино вбризгување. Зголемената побарувачка за изработка на специфични и сложени пластични делови го поттикна истражувањето на нови иновативни производствени техники. Адитивното производство, особено стереолитографијата како технологија што користи растопен фотополимер како суров материјал, нуди многу можности за малосериското производство на пластични делови со инјекцино вбризгување. Ова истражување има цел да го премости јазот помеѓу традиционалните алати за инјекцино вбризгување и можностите што ги нуди стереолитографското адитивно производство. Фокусот на анализите е во подобрување на ефикасноста, прецизноста и флексибилноста при проектирање на процесот за инјекцино вбризгување.

Според тоа, истражувањата се насочени кон анализа на некои од достапните фотополимери способни да ги издржат работните температури во процесот на инјекцино вбризгување. Во тезата детално се истражуваат стереолитографските технологии и нивната компатибилност за примена во инјекционото вбризгување. Со евалуација на механичките својства и димензионалната точност на деловите добиени во стереолитографски гравури, истражувањето воспоставува основа за нивната потенцијална употреба во овој процес. Понатаму, тезата ја истражува и оптимизацијата на дел од параметрите во стереолитографското адитивно производство за подобрување на механичките карактеристики на изработените гравури и обезбедување применливост во специфичните услови за време на инјекционото вбризгување.

Во рамките на истражувањето во докторската теза се анализирани стереолитографските техники и процесните параметри што може да се контролираат. Применувајќи ја оваа методологија, може да се влијае врз механичките карактеристики на деловите добиени со оваа постапка. На овој начин се овозможува да се утврди нивното влијание врз механичките карактеристики на изработените делови на различни степени на дополнителни постпроцесирања на парчињата, што е исто така многу важно за нивна примена како материјали за изработка на гравури за инјекцино вбризгување.

Резултатите од оваа теза имаат примена во дефинирањето на изводливоста и потенцијалните придобивки од интегрирањето на стереолитографските гравури во алатите за инјекцино вбризгување. Со испитување на клучните предизвици и оптимизирање на параметрите за изработка, ова истражување придонесува за унапредување на адитивното производство и негова примена во индустриски апликации.

Клучни зборови: инјекцино вбризгување, алати за инјекцино вбризгување, адитивно производство, 3Д-печатење, стереолитографија

Ogнен Goce Tuteski, M.Sc.

APPLICATION OF STEREO LITHOGRAPHIC TECHNOLOGIES IN ADDITIVE MANUFACTURING FOR INJECTION MOLDING TOOL DESIGN

– A b s t r a c t –

The research subject in this doctoral dissertation is the analysis of the applicability of stereolithographic molds as functional elements in injection molding tools. The increased demand for the production of specific and complex plastic parts has driven the exploration of new innovative manufacturing techniques. Additive manufacturing, particularly stereolithography, which uses liquid photopolymer as the raw material, offers many possibilities for low-volume production of plastic parts through injection molding. This research aims to bridge the gap between traditional injection molding tools and the possibilities offered by stereolithographic additive manufacturing. The focus of the analyses is on improving the efficiency, precision, and flexibility in designing the injection molding process.

Accordingly, the research is directed towards the analysis of some of the available photopolymers capable of withstanding the working temperatures in the injection molding process. The thesis extensively explores stereolithographic technologies and their compatibility for application in injection molding. By evaluating the mechanical properties and dimensional accuracy of parts obtained in stereolithographic molds, the research establishes a foundation for their potential use in this process. Furthermore, the thesis explores the optimization of some parameters in stereolithographic additive manufacturing to enhance the mechanical characteristics of the produced molds and ensure applicability in the specific conditions during injection molding.

Within the scope of the research in the doctoral thesis, stereolithographic techniques and controllable process parameters are analyzed. Applying this methodology can influence the mechanical characteristics of parts produced using this procedure. This enables determining their impact on the mechanical characteristics of manufactured parts at different levels of additional post-processing of the pieces, which is crucial for their use as materials for creating molds for injection molding.

The results of this thesis have applications in defining the feasibility and potential gains from integrating stereolithographic molds into the injection molding tools. By addressing key challenges and optimizing manufacturing parameters, this research contributes to the advancement of additive manufacturing and its application in industrial settings.

Key words: injection molding, injection molding tools, additive manufacturing, 3D printing, stereolithography

БЛАГОДАРНОСТ

Изразувам искрена благодарност на сите кои директно или индиректно на било кој начин и во било кој обем беа вклучени во реализацијата на научно-истражувачката работа и конкретизирањето на финалната верзија на овој докторски труд.

Најнапред изразувам благодарност на мојот почитуван ментор Проф. д-р Атанас Кочов, кој континуирано беше присутен во целиот период на мојата едукација и научно-истражувачка работа и со своето професионално знаење и искуство ме насочуваше и водеше се до конечната реализација на овој труд.

Голема благодарност и до сите членови на Комисијата за оценка и одбрана на мојот докторски труд кои како реномирани научници во својата област ми дадоа корисни сугестии и совети со кои придонесоа во подобрување на квалитетот на оваа докторска дисертација.

Особена благодарност сакам да изразам до сите вработени во алатницата „Лоноски“ кои ми овозможуваа да ги реализирам експериментите и беа отворени за секаква помош и ми дадоа доста практични сугестии и предлози за успешна реализација на експериментите.

Посебно би сакал да се заблагодарам на сите професори, колешки и колеги од Институтот за производно инженерство и менаџмент кои секогаш ме охрабруваа и поддржуваа во мојата научно-истражувачка работа. Особена благодарност до асс. м-р Ема Василеска за професионалната помош во финализирањето на обработката на податоците од истражувањето за овој докторски труд.

Исто така, изразувам благодарност и до Деканот, продеканите, професорите, моите колеги асистенти како и административниот кадар на Машинскиот факултет – Скопје, кои секогаш кога ми беше потребно несебично ми помагаа со совети и добронамерни укажувања.

Секако дека огромна е благодарноста до моите родители Гоце и Јованка за нивната поддршка, разбирање, љубов и инспирација за моето профилирање во научно-истражувачката работа кое резултираше и со успешното реализирање на оваа докторска дисертација.

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно.

м-р Огнен Тутески

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

м-р Огнен Тутески

Листа на слики

Слика 1.1: СТРУКТУРНА ШЕМА ЗА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО И НИВНАТА ПРИМЕНА ЗА БРЗО ПРОТОТИПИРАЊЕ (RAPID PROTOTYPING) И БРЗА ИЗРАБОТКА НА АЛАТИ (RAPID TOOLING) [ИЗВОР: [1]]	2
Слика 2.1: РАЗЛИКИ ПОМЕЃУ ПРЕДВИДЕНИТЕ И ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА СИЛА НА ИСФРЛАЊЕ КАЈ СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ГРАВУРИ (ИЗВОР: [26])	15
Слика 2.2: ЗАВИСНОСТ ПОМЕЃУ ВРЕМЕТО НА ЛАДЕЊЕ И ПОТРЕБНАТА СИЛА ЗА ИСФРЛАЊЕ ДЕЛ ИЗРАБОТЕН ВО СТЕРЕОЛИТОГРАФСКА ГРАВУРА (ИЗВОР: [26])	16
Слика 2.3: КОНЦЕПТУАЛНА МАПА НА ИНТЕРАКЦИИТЕ ПОМЕЃУ ПРИЧИНИТЕ ЗА РАЗРУШУВАЊЕ И КРАЈНИОТ ОБЛИК НА ПУКНАТИНАТА [ИЗВОР: [27]]	17
Слика 2.4: РАБОТЕН ТЕК ЗА ДЕТЕКТИРАЊЕ ПОЈАВА НА ЛОМ КАЈ ПОЛИМЕРЕН АЛАТ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ [ИЗВОР: [27]]	19
Слика 2.5: ПУКНАТИНИ КАЈ ГРАВУРАТА (ЛЕВО) И КРУТ ЛОМ СО ОДДЕЛУВАЊЕ НА СЕГМЕНТ ОД ГРАВУРАТА (ДЕСНО) [ИЗВОР: [24]]	21
Слика 2.6: ПРИНЦИП НА ФОРМИРАЊЕ ЛАМЕЛИ ЗА ВРЕМЕ НА КРИСТАЛИЗАЦИЈАТА НА ПОЛИМЕРНИОТ МАТЕРИЈАЛ. СТРЕЛКАТА ЈА ПОКАЖУВА НАСОКАТА НА ТЕМПЕРАТУРНИОТ ГРАДИЕНТ. (ИЗВОР: [35])	24
Слика 2.7: ШЕМАТСКИ МОДЕЛ НА СФЕРОЛИТ. ЦРНИТЕ СТРЕЛКИ ГО ОЗНАЧУВААТ ПРАВЕЦОТ НА МОЛЕКУЛАРНО ПОДРЕДУВАЊЕ (ИЗВОР: [35])	25
Слика 2.8: ГРАНИЧНИ СЛОЕВИ КАЈ ПРИМЕРОК ОД ПОЛИПРОПИЛЕН ШТО ЈА ОТСЛИКУВААТ РАЗЛИКАТА ВО ГОЛЕМИНАТА НА СФЕРОЛИТИТЕ КАЈ ПОЛИМЕРНИОТ МАТЕРИЈАЛ ПО НЕГОВАТА ДЕБЕЛИНА (ИЗВОР: [37]).....	25
Слика 2.9: РАЗЛИКА ВО ТРАНСПАРЕНТНОСТА КАЈ ДЕЛОВИ ОД ПОЛИПРОПИЛЕН ИЗРАБОТЕНИ ВО КОМПОЗИТЕН АЛАТ ОД ЕПОКСИДНА СМОЛА И АЛУМИНИУМ (А) И АЛАТ ОД AISI P20 ЧЕЛИК (В) (ИЗВОР: [43])	28
Слика 2.10: СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИОТ И ЧЕЛИЧНИОТ АЛАТ (А), И СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИОТ АЛАТ ПОСТАВЕН НА МАШИНАТА (ИЗВОР: [44])	29
Слика 2.11: ТЕМПЕРАТУРАТА НА ИЗРАБОТЕНИОТ ПЛАСТИЧЕН ДЕЛ КАКО ФУНКЦИЈА ОД ВРЕМЕТО НА ЛАДЕЊЕ ВО АЛАТИ ОД ТРИ РАЗЛИЧНИ МАТЕРИЈАЛИ (ИЗВОР: [44])	30
Слика 3.1: АНАТОМИЈА НА STL МОДЕЛОТ СПОРЕДЕНО СО CAD МОДЕЛОТ ОД КОЈ СЕ ДОБИВА.....	33
Слика 3.2: КЛАСИФИКАЦИЈА НА ПРОЦЕСИТЕ ЗА АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ИЗВОР: [55])	34
Слика 3.3: ПРИМЕРИ ЗА ДИРЕКТНА ПРИМЕНА НА ДЕЛОВИ ИЗРАБОТЕНИ СО SLA ТЕХНОЛОГИЈАТА (ИЗВОР: [57])	36
Слика 3.4: ШЕМАТСКИ ПРИКАЗ НА ПРОЦЕСОТ ЗА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКО АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ВЕРТИКАЛНА ОРИЕНТАЦИЈА НА ПОДЛОГАТА) (ИЗВОР: [58])	37
Слика 3.5: ШЕМАТСКИ ПРИКАЗ НА ПРОЦЕСОТ ЗА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКО АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ИНВЕРЗНА ОРИЕНТАЦИЈА НА ПОДЛОГАТА) (ИЗВОР: [60])	38
Слика 3.6: ОПЕРАЦИИ ЗА РЕАЛИЗАЦИЈА НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКО АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ИЗВОР: [61])	39
Слика 3.7: УРЕД ЗА ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ СО ПОМОШ НА УВ-СВЕТЛИНА НА ДЕЛОВИ ДОБИЕНИ СО СТЕРЕОЛИТОГРАФИЈА (SLA) (А) (Б) ШЕМАТСКИ ПРИКАЗ НА УРЕДОТ ЗА ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ (ИЗВОР: [62], [63])	40
Слика 3.8: БЛОК-ДИЈАГРАМ ЗА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКО АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ИЗВОР: [56])	42
Слика 3.9: ВЛИЈАНИЕ НА ДЕБЕЛИНАТА НА СЛОЈОТ ВРЗ ТОЧНОСТА НА ЗАКРИВЕНИ ПОВРШИНИ – ПОЈАВА НА „СКАЛЕСТ ЕФЕКТ“ (ИЗВОР: [64])	43
Слика 3.10: ПОТПОРНА СТРУКТУРА КАЈ СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ МОДЕЛ. ОЗНАЧЕНИ СЕ ОДДЕЛНИТЕ ГЕОМЕТРИСКИ КОМПОНЕНТИ ШТО ГИ ДЕФИНИРААТ ПОТПОРИТЕ (ИЗВОР: [65])	44
Слика 3.11: СТРАТЕГИЈА НА СКЕНИРАЊЕ И ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ (ИЗВОР: [66]).....	45

Слика 3.12: СПОРЕДБА НА КОНТУРАТА НА МОДЕЛОТ ОД CLI НАСПРОТИ STL ДАТОТЕКИТЕ; А) CLI VS STL ЗА СФЕРА ВО 2D; В) ЗГОЛЕМЕН ПРИКАЗ НА РЕГИОНОТ 1; С) ЗГОЛЕМЕН ПРИКАЗ НА РЕГИОНОТ 2; D) ЗГОЛЕМЕН ПРИКАЗ НА РЕГИОНОТ 3; (ИЗВОР: [67])	46
Слика 3.13: ШЕМАТСКИ ПРИКАЗ НА СТВРДНАТА ЛИНИЈА ОД ФОТОПОЛИМЕРЕН МАТЕРИЈАЛ ШТО ГО ПОКАЖУВА ПАРАБОЛИЧНИОТ ОБЛИК, ДЛАБОЧИНАТА НА СТВРДНУВАЊЕ C_b И ШИРОЧИНАТА L_w (ИЗВОР: [68])	48
Слика 3.14: РАБОТНА КРИВА ЗА ФОТОПОЛИМЕРИТЕ ШТО ДАВА ЗАВИСНОСТ ПОМЕЃУ ДЛАБОЧИНАТА НА СТВРДНУВАЊЕ C_b И ИЗЛОЖУВАЊЕТО НА СВЕТЛИНА E (ИЗВОР: [68]).....	50
Слика 3.15: ФЛЕКСУРАЛЕН МОДУЛ НА РАЗЛИЧНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА SLA АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО (ИЗВОР: [70])	51
Слика 3.16: МЕХАНИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА POLYJET МАТЕРИЈАЛИТЕ НА STRATASYS (ИЗВОР: [91, 92, 93, 94, 95]).....	55
Слика 3.17: ТЕМПЕРАТУРА НА ИЗВИТКУВАЊЕ ПОД ОПТЕРЕТУВАЊЕ (HDT) ЗА POLYJET МАТЕРИЈАЛИТЕ НА STRATASYS (ИЗВОР: [91, 92, 93, 94, 95])	56
Слика 3.18: ПРОТОТИПИ ИЗРАБОТЕНИ СО АДИТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА. А) РАЗЛИЧНИ КОМПОНЕНТИ ОД ПРОИЗВОДИ ОД ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ; Б) МОДУЛАРЕН МИКРОФЛУИДЕН СИСТЕМ; В) УРЕДИ ЗА МЕШАЊЕ И СЕПАРАЦИЈА НА ФЛУИДИ; Г) ПНЕВМАТСКИ УРЕД ЗА НАНЕСУВАЊЕ КАПКИ ОД ОРГАНСКА ЕМУЛЗИЈА (ИЗВОР: [99, 100, 101, 102]).....	57
Слика 3.19: РАЗЛИЧНИ ТИПОВИ АЛАТИ ЗА ПРОТОТИПИРАЊЕ. А) „МЕКИ“ АЛАТИ ОД СИЛИКОНСКА ГУМА; Б) КОНВЕНЦИОНАЛЕН АЛУМИНИУМСКИ АЛАТ ЗА ПРОТОТИПИРАЊЕ (ИЗВОР: [107])	58
Слика 3.20: ДЕЛОВИ ДОБИЕНИ СО ВАКУУМСКО ЛЕЕЊЕ ОД СИЛИКОНСКИ АЛАТ ДОБИЕН СО ИНДИРЕКТНА ИЗРАБОТКА (ИЗВОР: [108]).....	59
Слика 3.21: ХИБРИДЕН ВМЕТОК СО КОНФОРМАЛНИ КАНАЛИ ДОБИЕН СО SLS (ИЗВОР: [113])	61
Слика 3.22: ФАЗИ НА СПРОВЕДУВАЊЕ ДИЗАЈН НА ЕКСПЕРИМЕНТ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	63
Слика 4.1: КОМПАРАТИВЕН ДИЈАГРАМ ЗА МЕХАНИЧКИТЕ И ТЕРМИЧКИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ФОТОПОЛИМЕРИТЕ ОД RIGID ФАМИЛИЈАТА НА FORMLABS (ИЗВОР: [124]).....	77
Слика 4.2: ПРОЦЕНТУАЛНО ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА МОДУЛОТ НА ЕЛАСТИЧНОСТ КАЈ ФОТОПОЛИМЕРИТЕ СО ДОПОЛНИТЕЛНО ТЕРМИЧКО ТРЕТИРАЊЕ; А) HIGHTEMP; В) RIGID 10K; (ИЗВОР: [125])	78
Слика 4.3: ДЕЛ ОД ОТПЕЧАТЕНИТЕ ЕПРУВЕТИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	79
Слика 4.4: РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ НА ДЕЛОВИТЕ ЗА ВРЕМЕ НА ПОСТСТВРДНУВАЊЕ СО УВ-ЗРАЧЕЊЕ (А) И СО ДОПОЛНИТЕЛНО ТЕРМИЧКО ТРЕТИРАЊЕ ВО ЛАБОРАТОРИСКА ПЕЧКА (Б) (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	80
Слика 4.5: КОНТРОЛНИ МЕРКИ КАЈ ИЗРАБОТЕНИТЕ ЕПРУВЕТИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	81
Слика 4.6: УНИАКСИЈАЛНА МАШИНА ЗА ТЕСТИРАЊЕ SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X (А) СО ПОСТАВЕН ПРИМЕРОК ЗА ИСТЕГНУВАЊЕ ПОМЕЃУ РАМНИТЕ ЧЕЛУСТИ (Б) (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	82
Слика 4.7: ГРУПА ЕПРУВЕТИ ЗА ИСПИТУВАЊЕ ОД ФОТОПОЛИМЕРОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	82
Слика 4.8: МОДЕЛИ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ: А) ЕПРУВЕТА ТИП 1BA (ISO 527), Б) ТРАПЕЗОИДНА ПЛОЧА СО РАДИУСИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	85
Слика 4.9: ПРОЦЕС НА ИЗРАБОТКА НА ГРАВУРИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	87
Слика 4.10: БЛОК-ДИЈАГРАМ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНАТА ПРОЦЕДУРА ЗА ДЕФИНИРАЊЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ВО ГРАВУРИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	88
Слика 4.11: БЛОК-ДИЈАГРАМ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНАТА ПРОЦЕДУРА ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ВО ГРАВУРИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	89
Слика 4.12: КОНТРОЛА НА ТЕМПЕРАТУРАТА КАЈ СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИТЕ ГРАВУРИ;	90
Слика 4.13: ПРИМЕР ЗА МЕРЕЊА НА РАДИУС КАЈ ТРАПЕЗНИТЕ ПРИМЕРОЦИ ВО СОФТВЕРОТ IC MEASURE (ИЗВОР: [121])	93
Слика 4.14: БЛОК-ДИЈАГРАМ НА ПОСТАПКАТА ЗА ДОБИВАЊЕ НА МЕРКИТЕ НА РАДИУСИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	95

Слика 4.15: ПРИКАЗ НА МЕЃУСЕБНО НЕЗАВИСНИ ГНЕЗДА ВО ОРИГИНАЛНАТА ГРАВУРА ВО АЛАТОТ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	96
Слика 4.16: НАПРЕЧЕН ПРЕСЕК НА ВЛИВНАТА ЧАУРА ВО АЛАТОТ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ СО ВЕЌЕ ИЗРАБОТЕН ХОРИЗОНТАЛЕН ЖЛЕБ ЗА РАЗВОДНИОТ КАНАЛ (ЛЕВО) И СТАНДАРДНИ ДИМЕНЗИИ СПОРЕД КАТАЛОГ НА ПРОИЗВОДИТЕЛ (ДЕСНО) (ИЗВОР: [128]).....	97
Слика 4.17: Слика НА КОРИСТЕНИОТ АЛАТ СО ОЗНАКИ ЗА СИТЕ ОРИГИНАЛНИ КОМПОНЕНТИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	98
Слика 4.18: ШЕМАТСКИ ПРИКАЗ НА СТАНДАРДНО АЛАТНО КУЌИШТЕ СО ИЗМЕНЛИВИ ГРАВУРИ ОД СЕРИЈАТА FW НА ПРОИЗВОДИТЕЛОТ MEUSBURGER (ИЗВОР: [129]).....	99
Слика 4.19: ГАБАРИТНИ ДИМЕНЗИИ НА СЕКОЈА ОД ОРИГИНАЛНИТЕ ГРАВУРИ. НА СЛИКАТА СЕ ДАДЕНИ И ОТВОРИТЕ ЗА ВЛИВНАТА ЧАУРА И ОРИГИНАЛНИОТ ВЛИВЕН СИСТЕМ ШТО Е КОРИСТЕН ВО ИСТРАЖУВАЊЕТО (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	100
Слика 4.20: ГРУБ ПРИКАЗ НА ДОЗВОЛЕНИОТ РАБОТЕН ПРОСТОР ЗА СМЕСТУВАЊЕ НА ГРАВУРИТЕ ВО СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИТЕ ГРАВУРИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	101
Слика 4.21: НАЧИН НА ПОСТАВУВАЊЕ НА ГРАВУРИТЕ ВО АЛАТНИТЕ ПЛОЧИ - А: СКЛОПЕН ПРИКАЗ; Б: ЕКСПЛОДИРАН ПОГЛЕД [1. АЛАТНА ПЛОЧА; 2. ПОТПОРНА ПЛОЧА; 3. СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ВМЕТОК] (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	102
Слика 4.22: КОНСТРУКТИВНИ ПРЕПОРАКИ ЗА РАБНИ ВЛИВНИ ПОРТИ (ИЗВОР: [130]).....	105
Слика 4.23: ДИМЕНЗИИ НА СТАНДАРДЕН ПРИМЕРОК 1ВА ЗА ИСПИТУВАЊЕ СО ИСТЕГНУВАЊЕ СПОРЕД ISO 527 (ИЗВОР: [14]).....	107
Слика 4.24: МОДЕЛ 1 СО ВЛИВНИОТ СИСТЕМ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	108
Слика 4.25: МОДЕЛ 2 СО ВЛИВНИОТ СИСТЕМ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	109
Слика 4.26: СТЕРЕОЛИТОГРАФСКА ГРАВУРА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID10K;.....	109
Слика 4.27: СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ГРАВУРИ ОД МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP ПОСТАВЕНИ ВО АЛАТНИТЕ ПЛОЧИ; А) ПОДВИЖНА ПОЛОВИНА; В) НЕПОДВИЖНА ПОЛОВИНА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	110
Слика 4.28: СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ГРАВУРИ ПОСТАВЕНИ ВО АЛАТОТ НА МАШИНАТА ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ; А) ПОДВИЖНА ПОЛОВИНА; В) НЕПОДВИЖНА ПОЛОВИНА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	110
Слика 5.1: ГРАФИКОН НА ИНТЕРВАЛ НА ОДСИВ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	115
Слика 5.2: ГРАФИКОН НА ИНТЕРВАЛ НА ОДСИВ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	116
Слика 5.3: ОРИЕНТАЦИЈА НА ПРИМЕРОЦИ СО НАЈВИСОКА ИЗМЕРЕНА ЈАЧИНА НА ИСТЕГНУВАЊЕ <i>σ_m</i>	117
Слика 5.4: ГРАФИКОН НА ИНДИВИДУАЛНИ ВЛИЈАНИЈА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	117
Слика 5.5: ГРАФИКОН НА ИНДИВИДУАЛНИ ВЛИЈАНИЈА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	118
Слика 5.6: ГРАФИКОН НА ВЛИЈАНИЈАТА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ СО ИНТЕРАКЦИИ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	119
Слика 5.7: ГРАФИКОН НА ВЛИЈАНИЈАТА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ СО ИНТЕРАКЦИИ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	119
Слика 5.8: ГРАФИКОН НА ИНТЕРВАЛ НА ОДСИВ ЗА РЕЛАТИВНАТА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	120
Слика 5.9: СУМАРЕН Σ-Е ДИЈАГРАМ ОД „ЗЕЛЕНИТЕ“ ПРИМЕРОЦИ ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ HIGHTEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	121
Слика 5.10: СУМАРЕН Σ-Е ДИЈАГРАМ ОД ПРИМЕРОЦИ ТРЕТИРАНИ СО УВ-СВЕТЛИНА И ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ HIGHTEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	121

Слика 5.11: СУМАРЕН Σ -Е ДИЈАГРАМ ОД ПРИМЕРОЦИ ТРЕТИРАНИ СО УВ-СВЕТЛИНА И ТЕРМИЧКО ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ И ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ HIGHTEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	122
Слика 5.12: ГРАФИКОН НА ИНТЕРВАЛ НА ОДСИВ ЗА РЕЛАТИВНАТА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118])	123
Слика 5.13: ГРАФИКОН НА ИНДИВИДУАЛНИ ВЛИЈАНИЈА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ ЗА РЕЛАТИВНАТА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	123
Слика 5.14: ГРАФИКОН НА ИНДИВИДУАЛНИ ВЛИЈАНИЈА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ ЗА РЕЛАТИВНАТА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	124
Слика 5.15: ГРАФИКОН НА ВЛИЈАНИЈАТА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ СО ИНТЕРАКЦИИ ЗА РЕЛАТИВНА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118]).....	125
Слика 5.16: ГРАФИКОН НА ВЛИЈАНИЈАТА НА ФАКТОРИТЕ ВРЗ ОДСИВОТ СО ИНТЕРАКЦИИ ЗА РЕЛАТИВНА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	125
Слика 5.17: СУМАРЕН Σ -Е ДИЈАГРАМ ОД „ЗЕЛЕНИТЕ“ ПРИМЕРОЦИ ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ RIGID10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	126
Слика 5.18: СУМАРЕН Σ -Е ДИЈАГРАМ ОД ПРИМЕРОЦИ ТРЕТИРАНИ СО УВ-СВЕТЛИНА И ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ RIGID10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	127
Слика 5.19: СУМАРЕН Σ -Е ДИЈАГРАМ ОД ПРИМЕРОЦИ ТРЕТИРАНИ СО УВ-СВЕТЛИНА И ТЕРМИЧКО ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ И ИЗРАБОТЕНИ НА РАЗЛИЧНИ ОРИЕНТАЦИИ - МАТЕРИЈАЛ RIGID10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	127
Слика 5.20: ШЕМА ЗА НАЧИН НА ДЕКОДИРАЊЕ НА КАТЕГОРИЧНАТА ПРОМЕНЛИВА S ВО ТРИ НУМЕРИЧКИ ЗАМЕНСКИ ПРОМЕНЛИВИ SG, SU И SUT, КОИ МОЖАТ ДА ИМААТ ВРЕДНОСТИ САМО 0 ИЛИ 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	129
Слика 5.21: ШЕМА НА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	130
Слика 5.22: ХИСТОГРАМ НА ОСТАТОЦИ/ГРЕШКИ (RESIDUALS) НА МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: [118])	132
Слика 5.23: ДИЈАГРАМ НА НУМЕРИЧКИ НАСПРОТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ВРЕДНОСТИ ЗА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: [118])	133
Слика 5.24: ШЕМА НА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА РЕЛАТИВНА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	135
Слика 5.25: ХИСТОГРАМ НА ОСТАТОЦИ/ГРЕШКИ (RESIDUALS) НА МОДЕЛ ЗА ϵ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: [118])	137
Слика 5.26: ДИЈАГРАМ НА НУМЕРИЧКИ НАСПРОТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ВРЕДНОСТИ ЗА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА ϵ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGHTEMP (ИЗВОР: [118])	138
Слика 5.27: ШЕМА ЗА НАЧИН НА ДЕКОДИРАЊЕ НА КАТЕГОРИЧНАТА ПРОМЕНЛИВА O ВО ДВЕ НУМЕРИЧКИ ЗАМЕНСКИ ПРОМЕНЛИВИ OR И OV, КОИ МОЖАТ ДА ИМААТ ВРЕДНОСТИ САМО 0 ИЛИ 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	141
Слика 5.28: ШЕМА НА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	141
Слика 5.29: ХИСТОГРАМ НА ОСТАТОЦИ/ГРЕШКИ (RESIDUALS) НА МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID10K (ИЗВОР: [118])..	144
Слика 5.30: ДИЈАГРАМ НА НУМЕРИЧКИ НАСПРОТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ВРЕДНОСТИ ЗА РЕГРЕСИОНИОТ МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	145
Слика 5.31: КОМПАРАТИВЕН Σ -Е ДИЈАГРАМ ОД ПРИМЕРОЦИ ИЗРАБОТЕНИ СО ОРИЕНТАЦИЈА ПОД АГОЛ ОД 45° НА НАЈВИСОК СТЕПЕН НА ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ ЗА МАТЕРИЈАЛИТЕ HIGHTEMP И RIGID10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ) .	148
Слика 5.32: КРИТИЧЕН АБУЛЗИОНЕН ДЕФЕКТ КАЈ ОТВОРОТ ЗА ИСФРЛУВАЊЕ КАЈ ГРАВУРАТА ОД HIGHTEMP МАТЕРИЈАЛ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	151
Слика 5.33: ПОЈАВА НА ПУКНАТИНА КАЈ ГРАВУРАТА ОД ФОТОПОЛИМЕРОТ HIGHTEMP ЗА ВРЕМЕ НА ПРИЦВРСТУВАЊЕТО ВО АЛАТНИТЕ ПЛОЧИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	153

Слика 5.34: ПРИМЕР НА ИЗРАБОТЕНА ЕПРУВЕТА ОД ГНЕЗДО 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	155
Слика 5.35: ПРОГРЕСИВНО ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА ВЕНЕЦОТ КАЈ ИЗРАБОТЕНИТЕ МОДЕЛИ. БРОЈ НА ПРИМЕРОЦИ НА СЛИКАТА ОД ЛЕВО НА ДЕСНО: 1, 33, 50 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	156
Слика 5.36: ПРИМЕР ОД ПРИМЕРОЦИТЕ (11 ДО 16) КОИ НЕ СЕ ЗЕМЕНИ ПРЕДВИД ЗА СТАТИСТИЧКА АНАЛИЗА ПОРАДИ НЕЦЕЛОСНО ИСПОЛНУВАЊЕ НА ГРАВУРАТА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	156
Слика 5.37: ПРИМЕР НА ИЗРАБОТЕНА ТРАПЕЗНА ПЛОЧКА ОД ГНЕЗДО 2 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	157
Слика 5.38: ПРОГРЕСИВНО ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА ВЕНЕЦОТ КАЈ ИЗРАБОТЕНИТЕ ДЕЛОВИ. БРОЈ НА ПРИМЕРОЦИ НА СЛИКАТА ОД ЛЕВО НА ДЕСНО: 1, 10, 19, 26, 38, 48 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	158
Слика 5.39: АБУЛЗИОНО ОТКИНУВАЊЕ НА ПАРЧЕ МАТЕРИЈАЛ КАЈ ОТВОРОТ ЗА ИСФРЛАЊЕ ВО ГРАВУРАТА ПО 27-МИОТ ЦИКЛУС НА ВБРИЗГУВАЊЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	158
Слика 5.40: ПРОМЕНА ВО ГЕОМЕТРИЈАТА КАЈ ПРИМЕРОЦИТЕ ИЗРАБОТЕНИ ПО ОТКИНУВАЊЕ ПАРЧЕ МАТЕРИЈАЛ КАЈ ОТВОРОТ ЗА ИСФРЛАЊЕ ВО ГРАВУРАТА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	159
Слика 5.41: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ НА ДЕБЕЛИНАТА НА ЕПРУВЕТИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	161
Слика 5.42: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ НА ДЕБЕЛИНАТА НА ТРАПЕЗНИТЕ ПЛОЧКИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	161
Слика 5.43: ПОЈАВА НА ЦЕНТРАЛНО ИСПАКНУВАЊЕ И ВДЛАБНУВАЊА ПО КОНТУРАТА НА ПЛАСТИЧНИОТ ДЕЛ КАЈ РАМНИОТ СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ВМЕТОК (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	162
Слика 5.44: ПРОФИЛ НА ДЕФОРМАЦИЈА НА ГРАВУРА ПО 50 РАБОТНИ ЦИКЛУСИ КАЈ ГНЕЗДО 1; А) ГЛАВА 1; В) МЕРНО ПОДРАЧЈЕ; С) ГЛАВА 2; (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	163
Слика 5.45: ПРОФИЛ НА ДЕФОРМАЦИЈА НА ГРАВУРА ПО 50 РАБОТНИ ЦИКЛУСИ КАЈ ГНЕЗДО 2; А) ГЛАВА 1; В) МЕРНО ПОДРАЧЈЕ; С) ГЛАВА 2; (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	164
Слика 5.46: ОЗНАКИ НА КОНТРОЛИРАНИТЕ РАДИУСИ КАЈ ИСПИТУВАНИОТ МОДЕЛ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	166
Слика 5.47: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ НА ГОЛЕМИОТ РАДИУС НА ТРАПЕЗНИТЕ ПЛОЧКИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	167
Слика 5.48: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ НА МАЛ РАДИУС 1 НА ТРАПЕЗНИТЕ ПЛОЧКИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	168
Слика 5.49: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ НА МАЛ РАДИУС 2 НА ТРАПЕЗНИТЕ ПЛОЧКИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	168
Слика 5.50: ОЗНАКИ НА КОНТРОЛИРАНИТЕ ШИРОЧИНИ КАЈ МОДЕЛИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	170
Слика 5.51: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА ШИРОЧИНА КАЈ МЕРНО ПОДРАЧЈЕ НА ЕПРУВЕТИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	172
Слика 5.52: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА ШИРОЧИНА КАЈ ГЛАВА 1 НА ЕПРУВЕТИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	173
Слика 5.53: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА ШИРОЧИНА КАЈ ГЛАВА 2 НА ЕПРУВЕТИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	173
Слика 5.54: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА ШИРОЧИНА КАЈ ПРАВОАГОЛНИОТ ИСПУСТ НА ТРАПЕЗНИТЕ ПЛОЧКИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	174
Слика 5.55: ОЗНАКА ЗА КОНТРОЛИРАНАТА ДОЛЖИНА КАЈ МОДЕЛОТ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	175
Слика 5.56: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА ДОЛЖИНАТА КАЈ ЕПРУВЕТИТЕ ОД ГНЕЗДО 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	176
Слика 5.57: ШИРОЧИНА НА ФОРМИРАНИОТ ВЕНЕЦ ВО БЛИЗИНА НА МЕРНОТО ПОДРАЧЈЕ НА ЕПРУВЕТАТА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	179
Слика 5.58: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА МАКСИМАЛНА ЈАКОСТ НА ИСТЕГНУВАЊЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	181

Слика 5.59: ДИЈАГРАМ ЗА ИЗМЕРЕНИТЕ ВРЕДНОСТИ ЗА МАКСИМАЛНА РЕЛАТИВНА ДЕФОРМАЦИЈА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	182
Слика 5.60: ХИСТОГРАМ ЗА РАСПРЕДЕЛБА НА ИЗМЕРЕНАТА ЈАКОСТ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	183
Слика 5.61: ХИСТОГРАМ ЗА РАСПРЕДЕЛБА НА ИЗМЕРЕНАТА РЕЛАТИВНА ДЕФОРМАЦИЈА (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	184
Слика 8.1: ТЕХНИЧКИ ЦРТЕЖ ЗА НЕПОДВИЖНИОТ АЛАТЕН СЕГМЕНТ (ИЗВОР: [116])	213
Слика 8.1: ТЕХНИЧКИ ЦРТЕЖ ЗА ПОДВИЖНИОТ АЛАТЕН СЕГМЕНТ (ИЗВОР: [116])	214
Слика 8.1: ТЕХНИЧКИ ЦРТЕЖ ЗА МОДЕЛОТ ЗА ГРАВУРА 1 (ИЗВОР: [116])	215
Слика 8.1: ТЕХНИЧКИ ЦРТЕЖ МОДЕЛОТ ЗА ГРАВУРА 2 (ИЗВОР: [116])	216

Листа на табели

ТАБЕЛА 2.1: ОПТИМАЛНИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОЦЕСИРАЊЕ НА ABS LUSTRAN 648 [ИЗВОР: [24]]	20
ТАБЕЛА 3.1: ИЗБОР НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИ ФОТОПОЛИМЕРИ ОД DSM SOMOS (ИЗВОР: [85])	53
ТАБЕЛА 3.2: КАРАКТЕРИСТИКИ НА СТЕРЕОЛИТОГРАФСКИТЕ ФОТОПОЛИМЕРИ [ИЗВОР: [11], [12], [85], [87], [88]].....	54
ТАБЕЛА 3.3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА МАТРИЦА ЗА СЕФАКТОРЕН ДИЗАЈН 2 ² (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	64
ТАБЕЛА 3.4: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА МАТРИЦА ЗА СЕФАКТОРЕН ДИЗАЈН 3 ² (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	65
ТАБЕЛА 3.5: СТАТИСТИЧКИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОВЕРКА НА ТОЧНОСТ НА МОДЕЛ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	69
ТАБЕЛА 4.1: ВЛЕЗНИ ФАКТОРИ И НИВНИ НИВОА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	72
ТАБЕЛА 4.2: ИЗЛЕЗНИ ПАРАМЕТРИ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	73
ТАБЕЛА 4.3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА МАТРИЦА (ИЗВОР: [118])	75
ТАБЕЛА 4.4: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ОРИЕНТАЦИИ И АГЛИ НА НАКЛОН НА МОДЕЛИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	76
ТАБЕЛА 4.5: ВРЕМИЊА И ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ НА ФОТОПОЛИМЕРИТЕ КОРИСТЕНИ ВО ИСТРАЖУВАЊЕТО (ИЗВОР: [125], [126])	78
ТАБЕЛА 4.6: ИЗМЕРЕНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПРЕД ПОЧЕТОКОТ НА СЕКОЈ РАБОТЕН ЦИКЛУС ЗА ГНЕЗДО 1 (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	91
ТАБЕЛА 4.7: ПРЕСМЕТКА ЗА РАЗВОДНИТЕ КАНАЛИ ЗА ГРАВУРИТЕ ЗА СИТЕ ДЕЛОВИ ВКЛУЧЕНИ ВО ЕКСПЕРИМЕНТОТ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	104
ТАБЕЛА 5.1: НИВО НА ЗНАЧАЈНОСТ НА ФАКТОРИТЕ СПОРЕД ANOVA АНАЛИЗАТА ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	128
ТАБЕЛА 5.2: КОЕФИЦИЕНТИ НА РЕГРЕСИОНЕН МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	130
ТАБЕЛА 5.3: СТАТИСТИЧКИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОВЕРКА НА ТОЧНОСТ НА МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	131
ТАБЕЛА 5.4: НИВО НА ЗНАЧАЈНОСТ НА ФАКТОРИТЕ СПОРЕД ANOVA АНАЛИЗАТА ЗА РЕЛАТИВНАТА ДЕФОРМАЦИЈА КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	134
ТАБЕЛА 5.5: КОЕФИЦИЕНТИ НА РЕГРЕСИОНЕН МОДЕЛ ЗА ϵ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	135
ТАБЕЛА 5.6: СТАТИСТИЧКИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОВЕРКА НА ТОЧНОСТ НА МОДЕЛ ЗА ϵ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: [118])	136
ТАБЕЛА 5.7: НИВО НА ЗНАЧАЈНОСТ НА ФАКТОРИТЕ СПОРЕД ANOVA АНАЛИЗАТА ЗА ЈАЧИНАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	140
ТАБЕЛА 5.8: КОЕФИЦИЕНТИ НА РЕГРЕСИОНЕН МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118]).....	142
ТАБЕЛА 5.9: СТАТИСТИЧКИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОВЕРКА НА ТОЧНОСТ НА МОДЕЛ ЗА σ КАЈ МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: [118])	143
ТАБЕЛА 5.10: ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ КОРИСТЕНИ ВО ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	150
ТАБЕЛА 5.11: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 1 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	153
ТАБЕЛА 5.12: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 2 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ)	154
ТАБЕЛА 5.13: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 1 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	157

ТАБЕЛА 5.14: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 2 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	159
ТАБЕЛА 5.15: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДЕБЕЛИНА ЗА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	160
ТАБЕЛА 5.16: ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСНОСТИ ЗА ТОЛЕРАНТНИТЕ ОТСТАПУВАЊА НА ДЕБЕЛИНИТЕ ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	165
ТАБЕЛА 5.17: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА РАДИУСИТЕ НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 2 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	167
ТАБЕЛА 5.18: ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСНОСТИ ЗА ТОЛЕРАНТНИТЕ ОТСТАПУВАЊА НА РАДИУСИТЕ ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	169
ТАБЕЛА 5.19: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ШИРОЧИНИТЕ НА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	171
ТАБЕЛА 5.20: ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСНОСТИ ЗА ТОЛЕРАНТНИТЕ ОТСТАПУВАЊА НА ШИРОЧИНИТЕ ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	174
ТАБЕЛА 5.21: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДОЛЖИНА ЗА ПРИМЕРОЦИТЕ ОД ГНЕЗДО 1 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	175
ТАБЕЛА 5.22: ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСНОСТИ ЗА ТОЛЕРАНТНИТЕ ОТСТАПУВАЊА НА ДОЛЖИНАТА НА ЕПРУВЕТАТА ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	177
ТАБЕЛА 5.23: СУМАРНИ ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСНОСТИ ЗА КОНТРОЛИРАНИТЕ МЕРКИ ВО ОДНОС НА БРОЈОТ НА РАБОТНИ ЦИКЛУСИ (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	177
ТАБЕЛА 5.24: ДОЗВОЛЕНИ ТОЛЕРАНЦИИ ЗА КОНТРОЛИРАНИТЕ МЕРКИ (ИЗВОР: [131])	178
ТАБЕЛА 5.25: СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ОД ИСПИТУВАЊАТА НА ИСТЕГНУВАЊЕ НА СТАНДАРДНИТЕ ЕПРУВЕТИ ДОБИЕНИ ОД ГНЕЗДО 1 ОД ГРАВУРАТА ИЗРАБОТЕНА ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K (ИЗВОР: СОПСТВЕНО ИСТРАЖУВАЊЕ).....	180
ТАБЕЛА 8.1: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ RIGID 10K НА FORMLABS (ИЗВОР: [132])	202
ТАБЕЛА 8.2: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ HIGH TEMP НА FORMLABS (ИЗВОР: [133])	202
ТАБЕЛА 8.3: КАРАКТЕРИСТИКИ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ RIGID 10K НА FORMLABS (ИЗВОР: [12], [90])	203
ТАБЕЛА 8.4: КАРАКТЕРИСТИКИ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ HIGHTEMP НА FORMLABS (ИЗВОР: [11], [90])	203
ТАБЕЛА 8.5: КАРАКТЕРИСТИКИ НА МАТЕРИЈАЛОТ ABS-50 КОРИСТЕН ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ (ИЗВОР: [134])	204
ТАБЕЛА 8.6: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA 25 НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [135])	205
ТАБЕЛА 8.7: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA 55 НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [136])	205
ТАБЕЛА 8.8: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA 60 НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [137])	206
ТАБЕЛА 8.9: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA CLEARVUE НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [138])	206
ТАБЕЛА 8.10: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA CASTPRO НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [139])	207
ТАБЕЛА 8.11: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA AMETHYST НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [140])	207
ТАБЕЛА 8.12: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA SAPPHIRE НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [141]).....	208
ТАБЕЛА 8.13: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ ACCURA BLUESTONE НА 3D SYSTEMS (ИЗВОР: [142]).....	208
ТАБЕЛА 8.14: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ NANO TOOL НА DSM SOMOS (ИЗВОР: [143])	209
ТАБЕЛА 8.15: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ NANOFORM НА DSM SOMOS (ИЗВОР: [144])	209
ТАБЕЛА 8.16: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ TANGOBLOCK НА STRATASYS (ИЗВОР: [145]).....	210
ТАБЕЛА 8.17: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ VEROWHITEPLUS НА STRATASYS (ИЗВОР: [146]).....	211
ТАБЕЛА 8.18: СОСТАВ НА ФОТОПОЛИМЕРОТ DIGITAL ABS НА STRATASYS (ИЗВОР: [147]).....	212

ТАБЕЛА 8.19: КАРАКТЕРИСТИКИ ЗА МОДЕЛОТ НА МАТЕРИЈАЛОТ ШТО СЕ КОРИСТИ ВО СИМУЛАЦИИТЕ (ИЗВОР: [117])	217
ТАБЕЛА 8.20: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ОД СИМУЛАЦИИТЕ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ МОДЕЛИ (ИЗВОР: [117])	218
ТАБЕЛА 8.21: ГРАФИКОНИ ОД СИМУЛАЦИИТЕ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ЗА ПРИМЕРОК 1 (ИЗВОР: [117])	219
ТАБЕЛА 8.22: ГРАФИКОНИ ОД СИМУЛАЦИИТЕ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ЗА ПРИМЕРОК 2 (ИЗВОР: [117])	220
ТАБЕЛА 8.23: ГРАФИКОНИ ОД СИМУЛАЦИИТЕ ЗА ИНЈЕКЦИОНО ВБРИЗГУВАЊЕ ЗА ПРИМЕРОК 1 И 2 (ИЗВОР: [117]).....	221
ТАБЕЛА 8.24: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ЗА ПРИМЕРОЦИТЕ ИЗРАБОТЕНИ ОД МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP	222
ТАБЕЛА 8.25: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ЗА ПРИМЕРОЦИТЕ ИЗРАБОТЕНИ ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K.....	223
ТАБЕЛА 8.26: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДИМЕНЗИИ НА ПРИМЕРОЦИТЕ ИЗРАБОТЕНИ ОД МАТЕРИЈАЛОТ HIGH TEMP	224
ТАБЕЛА 8.27: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДИМЕНЗИИ НА ПРИМЕРОЦИТЕ ИЗРАБОТЕНИ ОД МАТЕРИЈАЛОТ RIGID 10K	225
ТАБЕЛА 8.28: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДИМЕНЗИИ НА ВБРИЗГАНИТЕ МОДЕЛИ СО ОБЛИК НА СТАНДАРДНА ЕПРУВЕТА.....	226
ТАБЕЛА 8.29: СУМАРНИ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА НА ДИМЕНЗИИ НА ВБРИЗГАНИТЕ МОДЕЛИ СО ОБЛИК НА ЗАОБЛЕН ТРАПЕЗ	231

Содржина

1. ВОВЕД	1
1.1. <i>Мотивација</i>	4
1.2. <i>Предмет на истражување</i>	5
1.3. <i>Методологија на истражување</i>	7
1.4. <i>Цели на истражувањето</i>	9
1.4.1. <i>Цел 1: Испитување на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување</i>	9
1.4.2. <i>Цел 2: Анализа на димензионалните отстапувања кај пластичните модели изработени во стереолитографски гравури</i>	10
1.4.3. <i>Цел 3: Анализа на механичките карактеристики кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури</i>	11
1.5. <i>Хипотези</i>	12
1.6. <i>Очекувани резултати и научен придонес</i>	13
2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА И ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА	14
2.1. <i>Причини за појавува на дефекти кај гравурите за инјекцијно вбризување добиени со методи на адитивно производство</i>	14
2.1.1. <i>Категоризација на потенцијалните дефекти при употреба на стереолитографски гравури за инјекцијно вбризување</i>	17
2.2. <i>Анализи на животен век на стереолитографски гравури</i>	20
2.3. <i>Влијанието на материјалот на алатот врз механичките карактеристики на изработените пластични делови</i>	22
2.3.1. <i>Промена во кристализацијата на полимерот во зависност од материјалот на алатот за инјекцијно вбризување</i>	24
2.4. <i>Резиме на досегашното истражување во областа</i>	31
3. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ	33
3.1. <i>Адитивно производство (АП)</i>	33
3.1.1. <i>Стереолитографијата како процес за адитивно производство</i>	36
3.1.2. <i>Планирање на стереолитографскиот процес</i>	43
3.1.3. <i>Основи на фотополимеризацијата</i>	47
3.1.4. <i>Комерцијално достапни стереолитографски фотополимери</i>	51
3.2. <i>Rapid tooling (RT)</i>	57

3.3. Дизајн на експеримент (DoE)	62
3.3.1. Фишеров сефакторен експериментален план со повеќе нивоа	64
3.3.2. Проверка на статистичко значење на фактори врз одзив и регресиона анализа	65
3.3.3. Декодирање на дискретна променлива во заменски нумерички променливи	70
3.4. Користен софтвер во истражувањата	71
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА	72
4.1. Испитување на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување	72
4.1.1. Материјали и метод на изработка на примероците	77
4.2. Анализа на димензионалните отстапувања кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури	83
4.2.1. Експериментален протокол	85
4.2.2. Опрема	95
4.2.3. Алат за експериментални истражувања	96
4.2.4. Дизајн и конструкција на гравурите	98
4.2.5. Материјали	106
4.2.6. Гнездо 1: стандардна епрувета за испитување со истегнување, тип 1BA (според стандардот ISO 527)	106
4.2.7. Гнездо 2: трапезоидна плоча со заоблување на горната страна и рабовите на основата 108	
4.2.8. Услови за тестирање и мерење	111
4.3. Анализа на механичките карактеристики кај пластичните модели изработени во стереолитографски гравури	111
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	112
5.1. Вовед	112
5.2. Резултати од испитувањето на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување	113
5.2.1. Јачина на истегнување	114
5.2.2. Релативна деформација	120
5.2.3. Добивање регресиони равенки за моделирање механички карактеристики кај материјалот High Temp	128
5.2.4. Добивање регресиони равенки за моделирање механички карактеристики кај материјалот Rigid 10k	139
5.2.5. Заклучни согледувања за експеримент 1	146

5.3. Резултати од анализата на димензионалните отстапувања кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури	149
5.3.1. Гравура од High Temp	151
5.3.2. Гравура од Rigid10k.....	155
5.3.3. Резултати од мерења.....	160
5.3.4. Заклучни согледувања за експеримент 2	177
5.4. Резултати од анализата на механичките карактеристики кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури	179
6. ЗАКЛУЧОК	185
6.1. Научен придонес.....	189
6.2. Препораки за понатамошни истражувања	190
7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	194
8. ПРИЛОЗИ	202
8.1. Прилог А: Технички спецификации на разгледуваните материјали	202
8.2. Прилог В: Технички цртежи за гравурите и вбризганите модели	213
8.3. Прилог С: Резултати од симулациите на инјекционо вбризгување со методот на конечни елементи	217
8.4. Прилог D: Податоци од мерења на 3Д печатените примероци	222
8.5. Прилог E: Податоци од мерења на вбризгани модели	226

Листа на кратенки

Симбол	Значење
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PP	Polypropylene
PLA	Polylactic Acid
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
RM	Rapid Manufacturing
DT	Direct Tooling
IT	Indirect Tooling
АП	Адитивно производство
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
STL	Standard Tessellation Language
УВ	Ултравиолетово
DoE	Design of Experiment
CAD	Computer Aided Design
Tg	Температура на стаклена транзиција
HDT	Heat deflection temperature Температура на извиткување под оптеретување
CI	Интервал на доверба (Confidance Interval)

1. ВОВЕД

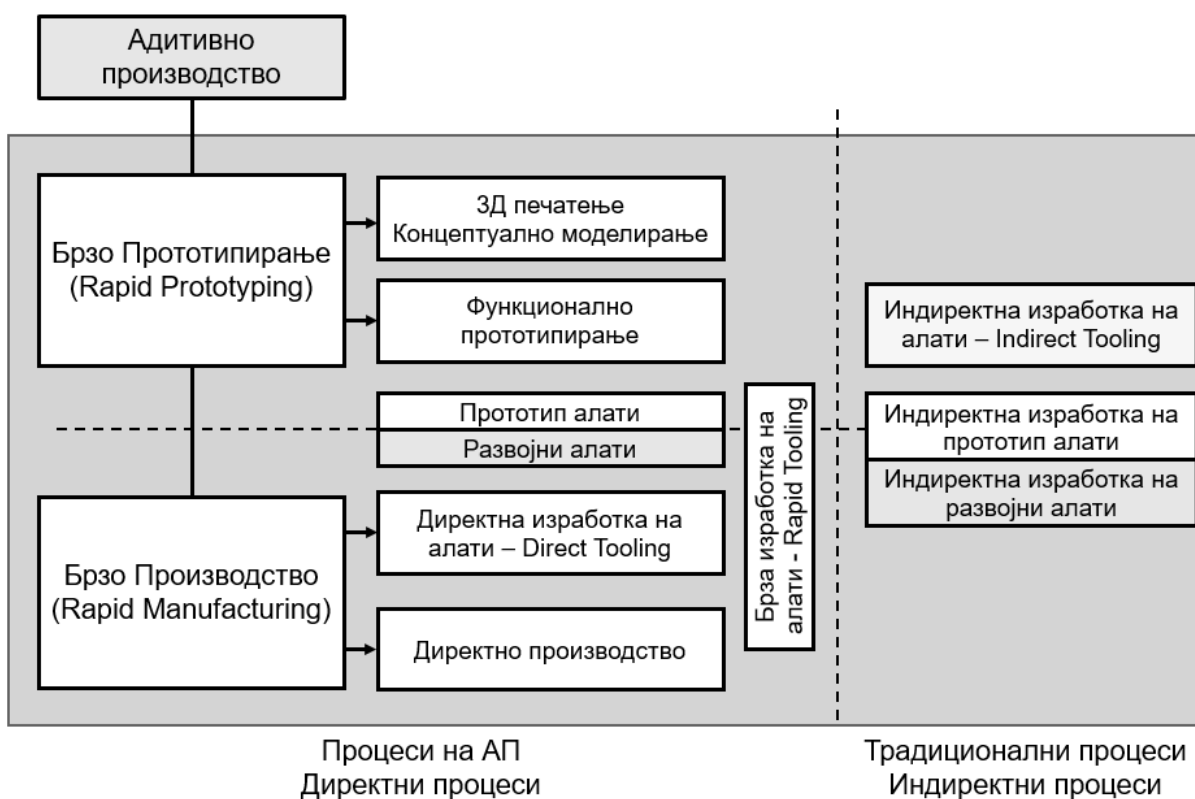
Инјекционото вбригување е еден од најшироко употребуваните процеси за преработка на полимерни материјали во современото производство. Процесот започнува со загревање и топење на термопластичен материјал, кој потоа под дејство на висок притисок се вбригува во алат со специфична гравура. Во внатрешноста на алатот материјалот се лади и се стврдува, по што се отстранува како оформен производ. Главната примена е за масовно производство на многу точни и често сложени делови за крајна употреба. Со време на работен циклус што се движи од неколку секунди до неколку минути, инјекционото вбригување е идеално за производствени апликации со голем волумен.

Алатите што ја дефинираат формата на крајниот производ најчесто се метални и се изработуваат од челични или алуминиумски легури. Конвенционалниот начин на изработка на алати е скап, одзема доста време и е поврзан со високи трошоци. Изработката може да трае со недели, бара висококвалификувани работници и чини од неколку илјади до стотици илјади долари, во зависност од сложеноста на делот кој треба да се добие. Од оваа причина, ваквите алати често се произведуваат во алатници кои се доста оддалечени од местото на кое ќе се користат и поради тоа нивната цена дополнително се зголемува - поради трошоците за нивниот транспорт. Дизајнот на алатот во раните фази често претрпува и измени кои се должат на промени во обликот на делот или измени во потсистемите на алатот за подобра изработка на парчето. Без разлика на причината, сите измени се скапи и одземаат доста време, а во некои случаи потребно е алатот да се преработи од почеток.

Во случаите на производство на пластични делови во мали серии и изработка на прототипи, трошоците за изработка на алатот се главните фактори што ја дефинираат крајната цена на чинење. Алтернатива на конвенционалниот начин на изработка на алатите за инјекционо вбригување во тие случаи се технологиите за брза изработка на алати (Rapid Tooling – RT), со кои може да се добијат исти компоненти како кај конвенционалните алати со споредлив квалитет, но за многу пократок временски период. RT алатите не се наменети целосно да ги заменат конвенционалните, ниту се наменети за употреба во случаи на големо сериско производство. Нивната примена е

фокусирана за прототипирање, валидирање на дизајн и функционалност и изработка на мали серии пластични делови кај кои е потребна најголема флексибилност во проектирањето на производниот процес.

Постојат различни пристапи за изработка на RT алати, меѓу кои еден од најдобрите е употребата на технологии за адитивно производство (Слика 1.1). Типично, овие процеси се користат за индиректна валидација на алатите со изработка на готовиот пластичен дел. Меѓутоа, со развојот на овие технологии, денес е можно да се изработат и целосни алатни гравури или сегменти од гравурата и вака добиените алати да се искористат за инјекционо вбризгување на мали серии на делови.



Слика 1.1: Структурна шема за технологиите за адитивно производство и нивната примена за брзо прототипирање (Rapid Prototyping) и брза изработка на алати (Rapid Tooling) [Извор: [1]]

Технологиите за адитивно производство кои се базирани на стереолитографија (SLA) се користат за изработка на делови од растопен фотополимер, кој се стврдува под дејство на локализирано ултравиолетово светло. Вака добиените делови може да имаат точност до 0,016 mm, што значи дека доколку со оваа технологија се изработи една

алатна гравура, таа ќе има доволно висок површински квалитет и точност на димензиите за да може да се користи како функционален дел од алатот за инјекционо вбризгување.

Со развојот на овие технологии и зголемувањето на палетата на употребливи материјали, денес за мали серии до 200 парчиња најидеално е ако со некој од овие процеси директно се изработат алатните гравури. За ова се употребува стереолитографска технологија базирана на стврднување на растопен фотополимер. Најголемите производители на индустриски машини за адитивно производство 3D Systems и Stratasys имаат патентирано технологии базирани на стереолитографски принцип (ProJet на 3D Systems и PolyJet на Stratasys). Со овие машини може да се произведе прототип на алат за валидација на функцијата на делот добиен со вбризгување, меѓутоа, поради различниот материјал на алатот, потребни се различни параметри на процесирање (температура на топење, притисок на инјектирање, време на пакување и сл.). Кај постојните студии на случај направени од Stratasys ([2, 3, 4, 5, 6, 7]) во услови на производство на мали серии се забележуваат следните предности:

- Намалување на вкупното време на циклусот за развој на алат од 50% до 90%;
- Намалување на трошоците за алатот и цената на деловите од 50% до 70% ;
- Зголемување на ефикасноста при изработката на полимерниот алат со скратување на неколку чекори од процесот за развој на конвенционален алат;
- Можност за рано валидирање на перформансите на делот и дизајнот на алатот во почетните фази на развој;
- Можност за употреба на конкретниот полимерен материјал при валидацијата на производот и можност за тестирање на повеќе различни термопластики.

Адитивните технологии базирани на стереолитографските принципи за добивање полимерни делови не само што чинат помалку, туку се и полесни за употреба, што ги прави достапни за поширока палета на производни индустрии. Од овие причини, фокусот на истражувањето за развој на RT технологиите е токму во области каде што може да се добие полимерен алат без дополнително процесирање, со што се минимизира времето за развој. Првите обиди за изработка на вакви алати за инјекционо вбризгување се направени во 90-тите години на минатиот век користејќи стереолитографија (SLA) за добивање функционален алат од комерцијални полимерни

материјали соодветни за употреба во оваа технологија ([8, 9]). Истражувањата покажале дека е можно да се креира полимерен алат кој е употреблив без дополнително постпроцесирање.

Со развојот на нови материјали во последните 15-ина години, денес е можно да се добијат полимерни модели со висока јакост и голема толеранција на температурни напрегања [10]. Овие напредоци, заедно со намалената цена на опремата за адитивно производство во однос на директната примена на RT технологиите, нудат повеќе опции кога станува збор за флексибилно производство на делови во мали количини.

1.1. Мотивација

Мотивацијата за работата на докторска теза за употребата на гравури за инјекционо вбризгување добиени со методи за адитивно производство произлезе од повеќе фактори кои ја опфаќаат сегашната состојба на индустријата и понатамошните изгледи за иднината.

Најпрво, овој истражувачки потфат произлезе од желбата да се оптимизира конвенционалниот процес за инјекционо вбризгување, кој иако е испробан и тестиран, често повлекува значителни инвестиции во време и ресурси за производство на сложени алати. Адитивното производство со SLA (стереолитографија) технологијата од материјали со висока температурна издржливост има потенцијал да надмине дел од овие ограничувања. Со истражување на применливоста на 3Д-печатени гравури може да се забрза прототипирањето и да се намали времето за производство, со што се зајакнува севкупната ефикасност на производните процеси.

Понатаму, еколошките елементи, исто така, играат клучна улога за избор на оваа тема. Глобалната побарувачка за одржливи производствени решенија е поитна од кога било, а спојот на адитивното производство и инјекционо вбризгување ветува поголемо зачувување на ресурсите. Користењето на стереолитографски гравури во инјекционо вбризгување има потенцијал да ги намали материјалниот отпад и потрошувачката на енергија и е потенцијален начин за решавање на дел од еколошките проблеми поврзани со овој производен процес.

Инволвирањето на 3Д-печатењето со инјекционото вбризгување отвора можност за внесување голем број иновации во процесот што би можеле да отворат нови погледи во производството, науката за материјали и дизајнот на производите.

1.2. Предмет на истражување

Предметот на истражување на оваа докторска дисертација е анализа на применливоста на стереолитографски гравури како функционални елементи во алатите за инјекционо вбризгување. Според тоа, истражувањата се насочени кон анализа на некои од достапните фотополимери способни да ги издржат работните температури во процесот на инјекционо вбризгување.

Понатаму, изработени се гравури за едноставни геометрии каде што на вбризганите парчиња се мереа варијациите во димензиите по секој работен циклус со цел да се воспостави некој тренд и да се утврди обемот на парчиња што успешно би можеле да се изработат со употреба на овој тип гравури.

Опсегот на ова истражување е ограничен на испитување на два фотополимерни материјали со доволно добри механички и термички карактеристики за да бидат применливи во процесот за инјекционо вбризгување. Станува збор за фотополимерите со комерцијални имиња HighTemp [11] и Rigid10k [12] на компанијата Formlabs. Во понатамошните поглавја од докторската дисертација ќе бидат користени овие комерцијални имиња за нивно поедноставно дефинирање. Деталниот состав на мешавините на фотополимерите е даден во Табела 8.1 и Табела 8.2 во Прилог А. Сите експерименти се изведени на примероци и стереолитографски гравури добиени на SLA (стереолитографија) 3Д-печатачи од истата компанија.

Во рамките на истражувањето во докторската теза се анализирани стереолитографските техники и процесните параметри што може да се контролираат. Применувајќи ја оваа методологија, може да се влијае врз механичките карактеристики на деловите добиени со оваа постапка. На овој начин се овозможува да се утврди нивното влијание врз механичките карактеристики на изработените делови на различни степени на дополнителни постпроцесирања на парчињата, што е исто така многу важно за нивна примена како материјали за изработка на гравури за инјекционо вбризгување.

Согласно препораките на производителот, во истражувањата е применето постпроцесирање со ултравиолетова светлина врз моделите што се добиени со SLA процесот. Дополнително, во лабораториски услови е спроведен процес на термичко третирање.

Употребливоста на материјалите за спроведување на истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација се темели на задржување на барањата на димензионални мерки со релативна повторливост и задоволување на механичките карактеристики потребни за да се одговори на оптоварувањата за време на инјекционото вбризување.

Со цел да се симплифицираат условите на тестирање, сите стереолитографски гравури се изработени за модели кои се изработуваат во алати за инјекционо вбризување со две плочи, без странични јадра. Ова го насочи истражувањето во правец кој овозможи да се направи споредба само на гравурите, со поедноставување на алатите за инјекционо вбризување на нивните најосновни и фундаментални компоненти. Понатаму, една од гравурите одговара на стандарден облик на епрувети според стандардот ISO 527 [13, 14] што овозможи понатамошно механичко тестирање на добиените делови и исполнување на третата цел за анализа на механичките карактеристики кај пластичните модели изработени во стереолитографски гравури.

Вакво слично истражување е направено на гравури за инјекционо вбризување добиени со стереолитографско адитивно производство и со епоксидна смола [15]. Во ова истражување е утврдено дека кај вака добиените алатни гравури е можно вбризување на полимерни материјали со ниски температури на топење како полипропилен (PP) и на различни восоци. Слично на тоа истражување, една друга студија, користејќи го процесот PolyJet на компанијата Stratasys за изработка на гравурите, добила мешани резултати користејќи полимерни материјали со ниска до средна температура на топење, како што се полиамид (PA) и полипропилен (PP) [16]. Во овој докторски труд, за време на истражувањето како полимерен материјал за вбризување во стереолитографските гравури се користи ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), кој се вбројува во полимери со средна температура на топење вискозност. Причината поради која е избран овој полимерен материјал е неговата доста честа

примена во индустријата, што значи дека добиените резултати од истражувањето ќе имаат директна практична вредност и ќе ги надградат и прошират претходните резултати од истражувањата за применливоста на стереолитографски гравури кај алатите за инјекционо вбригување.

Соодветно на главниот предмет на истражување во овој докторски труд, сите анализи во експерименталниот дел се реализирани кон анализа на крајните делови добиени во процесот на инјекционо вбригување. Направени се дополнителни анализи за трошењето на стереолитографските гравури, коментирани е и на потенцијалните подобрувања, како и економската исплатливост, но не се направени подетални анализи во тој поглед бидејќи се надвор од опсегот на истражувањето за овој докторски труд. Целосна анализа на секој влијателен фактор може да се направи во понатамошните истражувања откако ќе се утврди применливоста.

1.3. Методологија на истражување

Квантитативните научни методи за истражување се базираат на прибирање и анализа на нумерички податоци. Тие се користат за наоѓање шеми и просеци, да се прават предвидувања, да се тестираат причинско-последичните врски и да се генерализираат резултатите.

Во рамките на применетата методологија за истражување оваа докторска дисертација се базира на квантитативни и квалитативни научни методи.

Акцентот кај квантитативните методи се заснова на објективни мерења и статистичка, математичка или нумеричка анализа на собраните податоци со помош на различни пресметковни техники. Квантитативното истражување се фокусира на собирање нумерички податоци и нивно генерализирање низ различни групи за да се објасни одредена појава. Ова најчесто се прави со контрола или манипулација на независна променлива за да се измери нејзиниот ефект врз друг зависен параметар.

Истражување на литературни извори

Во првичната анализа ќе се прегледаат студиите, перспективите, теориите и различните трудови и стручна литература релевантна за истражувачките прашања. Во рамките на тој процес ќе се покажат празнините или недостатоците во претходните истражувања кои ќе се пополнат со ова истражување.

Експериментални истражувања

За испитување на хипотезите во оваа дисертација, ќе се користи методологијата за дизајн на експериментите (DoE) со примена на Фишеров сефакторен експеримент. Со истражувањата се опфатени два различни фотополимери. Истражуваните независно променливи параметри се:

- аголот на наклон,
- ориентацијата на работната подлога за време на изработка и
- степенот на постпроцесирање на парчињата.

Во тезата е разгледано влијанието на гореспоменатите параметри врз максималната јачината на истегнување (σ_m) и максималната деформација (ε_m) кај примероците, при што со регресиона анализа ќе се воспостави теоретски модел за зависноста помеѓу испитуваните параметри. Дополнително, испитано е и влијанието на независно променливите параметри врз димензиите на примероците изработени со SLA (стереолитографија) технологијата.

Во истражувањето за примена на фотополимерни гравури во алатите за инјекционо вбригување се изработени гравури за тест-примероци од секој од фотополимерите што ќе бидат искористени во процесот. На изработените тест-примероци ќе се мерат специфично избрани димензии (ширина, должина, дебелина и радиус на заоблување) за да се контролира нивната промена низ работните циклуси и на овој начин да се следи потенцијалната деградација на ваквиот тип гравури со текот на времето.

1.4. Цели на истражувањето

Целта на овој докторски труд е да се проучи применливоста на полимерни Rapid Tooling вметоци како функционални гравури во алатите за инјекционо вбригување. За еден дел изработен користејќи ги овие гравури да биде употреблив, тој мора да ги задоволува дадените физички димензии во рамките на прифатливите граници на толеранција. Тоа подразбира дека алатните сегменти добиени со стереолитографски метод на адитивно производство мора да бидат доволно стабилни, цврсти и да останат во прифатливите граници по повеќе работни циклуси.

Со цел да се испита степенот на применливост на стереолитографски алатни гравури, во рамките на оваа теза направени се три различни експерименти од кои може да се извлечат заклучоци за оваа проблематика.

1.4.1. Цел 1: Испитување на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување

За реализација на првата цел од докторската дисертација, истражувањата се однесуваа на природата на самата технологија за адитивно производство што се искористи за изработка на гравурите. Со стереолитографијата како адитивен процес можно е да се изработат модели со изотропни механички карактеристики. Тоа значи дека на молекуларно ниво, практично не би требало да има каква било разлика помеѓу правците по оската Z и XY рамнината поради природата на хемиските врски во материјалот и секој дел произведен со оваа технологија може да биде разгледуван како единствен молекул.

И покрај изразената изотропија во теоретското разгледување на процесот на стереолитографско адитивно производство, некои претходни истражувања покажале дека кај деловите изработени со оваа технологија сè уште постојат некои разлики кај механичките особини во зависност од ориентацијата на моделите. Овие разлики, иако незначителни, најчесто се предизвикани од мали отстапувања во движењата на 3Д-печатачот по должина на оските X, Y и Z.

Првиот експеримент е поставен за да се испита како ориентацијата на моделите на подлогата за градење влијае врз точноста и јачината на истегнување. Притоа се

разгледуваа и ефектите од различните постобработувачки процедури по SLA (стереолитографија) печатењето, бидејќи повеќето фотополимери е потребно да бидат подложени на постстврднување со ултравиолетова светлина по 3Д-печатење за да ги добијат максималните јакостни и термички карактеристики. Овие заклучоци се доста важни при дизајнот на гравурите што понатаму треба да се користат како функционални гравури во алатите за инјекционо вбризгување. Тие треба да можат да одговорат на сите механички и термички оптоварувања на кои ќе бидат подложени за време на процесот на инјекционо вбризгување за да може да се обезбеди подолг животен век на алатот и да може да се изработат пластични делови во поголем број и со повисок квалитет и точност.

Резултатите добиени од експерименталните истражувања се применливи за дизајн на гравури, како и за дизајн на делови добиени со адитивно производство, особено во насока на нивната крајна примена. Информациите добиени од ова истражување можат да бидат користени во индустријата од инженери и дизајнери за подобро разбирање за крајните карактеристики на изработените модели и толеранциите што треба да се земат предвид при конструкцијата на најразлични делови наменети за производство преку стереолитографските методи на 3Д-печатење.

1.4.2. Цел 2: Анализа на димензионалните отстапувања кај пластичните модели изработени во стереолитографски гравури

Вториот и главен експеримент се однесува на примарната цел на овој докторски труд што е испитување на степенот на применливост на стереолитографски гравури во услови на малосериско производство и анализа дали вака добиените гравури може да ги задоволат потребните димензионални толеранции во различен опсег на геометрии со варијабилна комплексност.

Фокусот на оваа студија се два фактори што влијаат врз стабилноста на димензиите:

- Комплексноста на алатниот сегмент, што се однесува на геометриските карактеристики на гравурата;

- Деградација на алатниот сегмент во текот на времето.

За време на истражувањето е оценета димензионалната стабилност на RT стереолитографските гравури со континуирано изложување на постојани работни циклуси сè до појава на дефект кој би оневозможил понатамошна употреба.

Исто така, следени се промените и отстапувањата во димензиите на гравурите со текот на времето. При реализација на докторските експериментални истражувања, за реализација на цел 2, спроведено е мониторирање на промените и отстапувањата на димензиите со текот на зголемувањето на бројот на работни циклуси на алатот. Мерењата се воспоставуваат во насока на поставување корелација помеѓу функционалната зависност на отстапувањата во димензиите и работните циклуси. Вака добиените податоци се добра основа за понатамошни анализи за процена на квалитетот кај пластичните делови што се изработуваат од стереолитографски алати за инјекционо вбризгување.

Дополнително, за време на експериментот се собрани информации кои би помогнале во потенцијалните идни истражувања за утврдување на применливоста на ваквиот тип алати. Следени се процесните параметри на инјекционото вбризгување за сите тестирани гравури. По појавата на лом, за секоја гравура е направена идентификација на типот на лом и е снимена неговата локација.

1.4.3. Цел 3: Анализа на механичките карактеристики кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури

Третиот експеримент во овој докторски труд е испитување на механичките карактеристики на деловите добиени во стереолитографски гравури при процесот на инјекционо вбризгување. Во раните фази на развој на нови производи, дизајнерските прототипи кои наликуваат на финалниот производ во надворешниот изглед најпрво овозможуваат ергономска верификација. Барањата од прототипите во подоцнежните фази на развој се доста повисоки. Функционалниот прототип дополнително треба да исполни низа карактеристики во однос на функционалноста и компатибилноста на материјалите. За да се користат прототипи на делови што служат за верификација,

неопходно е да се произведуваат користејќи сериски процес на производство и материјал со слични својства со проектираниот дел [17].

Конвенционалното прототипирање на вакви делови најчесто се прави со изработка на гравури од материјали како алуминиум што имаат висока топлинска спроводливост, слична на челичните алати за големосериско производство. Фотополимерните гравури добиени со Rapid Tooling методите што се користат како замена на алуминиумските гравури имаат значително пониска топлинска спроводливост. Тоа значи дека термичките услови во процесот на инјекционо вбригување се сосема различни од тие во алатите за големосериско производство. Од овие причини треба да се очекува дека морфологијата на прототипот, како и неговите механичките својства, ќе варира, што е веќе истражено и презентирано во прегледот на постојната литература во поглавје 3. Покрај сите досегашни испитувања, сè уште нема конзистентно разбирање на влијанието на различните материјали на алатите врз карактеристиките на произведените делови, нешто што е споменато во [18] од *Segal* и *Campbell* и е потврдено од контрадикторните резултати објавени од *Volpato* во [19].

Од таа причина, во овој докторски труд, покрај испитувањето за применливост на стереолитографските гравури и испитување на бројот на работни циклуси што може да ги издржат, се испита и јакоста на вбриганите делови користејќи ја пропишаната јакост на вбриганиот материјал од производителот како референтна вредност за споредба на добиените својства на материјалот.

1.5. Хипотези

Хипотеза 1: Спроведените истражувања за досегашната примена, како и сите други истражувања во оваа област, потврдуваат дека фотополимерите со повисока температурна издржливост имаат добри механички карактеристики за примена во процесот на инјекционо вбригување.

Хипотеза 2: Стереолитографските гравури изработени со SLA технологијата за адитивно производство имаат специфични барања и услови што треба да се исполнат за нивна успешна примена во процесот на инјекционо вбригување.

Хипотеза 3: Со примената на гравури за инјекционо вбригување изработени со SLA технологијата за адитивно производство може да се обезбеди задоволителна димензионална точност на изработените пластични модели.

1.6. Очекувани резултати и научен придонес

Врз основа на претходно изложените цели и работни хипотези, очекуваните резултати и нивниот научен придонес може да се дефинираат на следниот начин:

- Преку анализите за ориентацијата на примероците ќе се добијат дополнителни информации за влијанието на овие параметри врз механичките особини и димензионалната точност на деловите изработени со SLA технологијата.
- Потврда за примена на стереолитографските фотополимерни гравури преку контрола на димензиите на изработените модели и утврдување дали се исполнуваат потребните димензионални барања по повеќе работни циклуси, притоа изработувајќи димензионално прифатливи компоненти.
- Подобрена техника за брзо добивање гравури што ќе ги задржат формата и обликот со технологиите за адитивно производство ја оправдува примената во случаите на малосериско производство.
- Потврдата за применливост на стереолитографските гравури во алатите за инјекционо вбригување ќе отвори простор за понатамошни истражувања со различни фотополимерни материјали и технолошки параметри.

2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА И ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА

2.1. Причини за појавува на дефекти кај гравурите за инјекционо вбризгување добиени со методи на адитивно производство

Групата производни процеси што се класифицираат како технологии за брзи прототипи се докажани алатки за прототипирање, пред сè за валидација на дизајнот. Во оваа група спаѓаат сите процеси за адитивно производство способни за слоевито градење на делот повлекувајќи информации за формата директно од дигитален CAD модел. Производите добиени со овие методи се користат во најразлични области, меѓутоа, карактеристиките на достапните материјали, времињата за изработка на индивидуалните делови и трошоците за постпроцесирање традиционално ја ограничуваа нивната примена во процесите за директно производство.

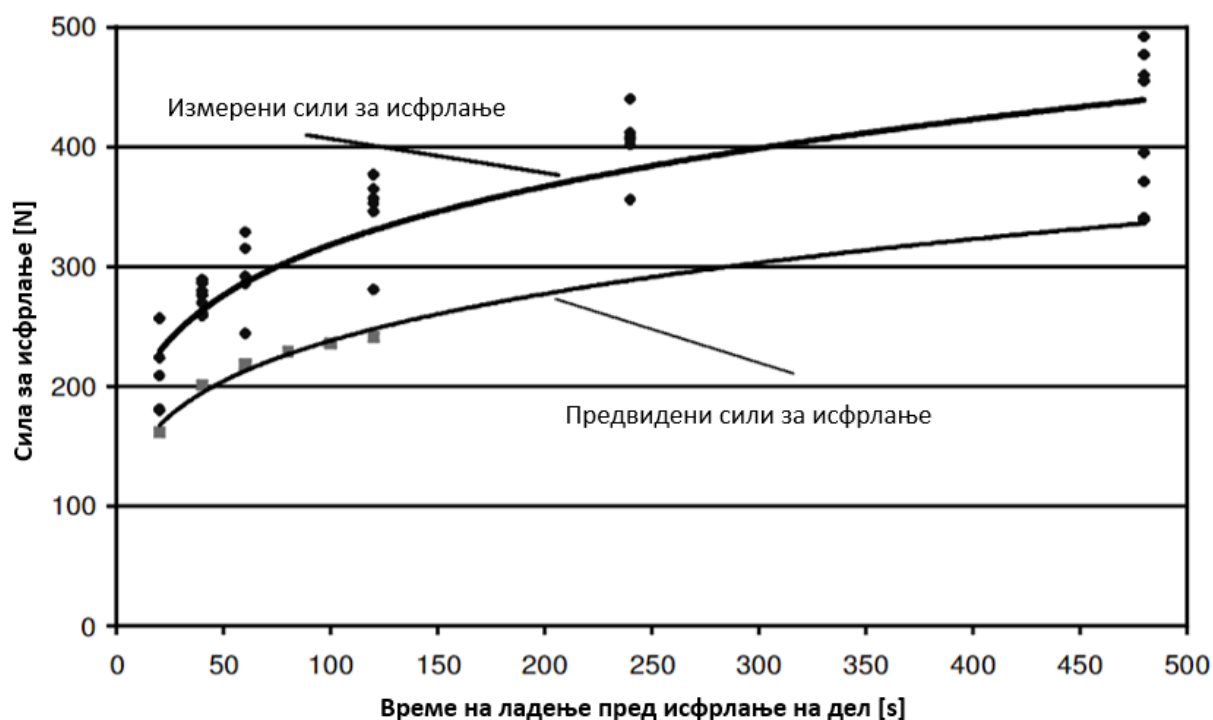
Во изминатите неколку години технологиите за адитивно производство со различен успех се користат како директни или индиректни методи за конструкција на алати за инјекционо вбризгување. Примери за оваа употреба има во истражувањата [20], [21], [22] и [23]. Способноста за директна изработка на функционалните делови од алатите за инјекционо вбризгување со технологиите за адитивно производство значително би го поедноставила производството на пластични делови со процесот на инјекционо вбризгување. Меѓутоа, овие постапки сè уште се во развој и има недостиг на генерална класификација на достапните материјали кои би можеле да се користат во овој процес.

Полимерните материјали што се користат во стереолитографските технологии на адитивно производство веќе некое време се земаат предвид за директна изработка на алати за инјекционо вбризгување, меѓутоа, ограничувањата на материјалите и процесот во однос на прецизноста, издржливоста и термичките карактеристики претставувале пречка за нивна успешна практична апликација [24]. Претходните истражувања посочуваат 3 главни предизвици при употребата на стереолитографските алати за инјекционо вбризгување:

- подложност на кршење на стереолитографската гравура при вбризгување и исфрлање на делот; ([25, 26])

- кршење поради појава на пукнатини од надминувањето на дозволената јачината на истегнување кај фотополимерот; ([27, 24])
- кршење поради непредвидени термички ефекти за време на инјекционото вбризгување; ([21, 22, 23])

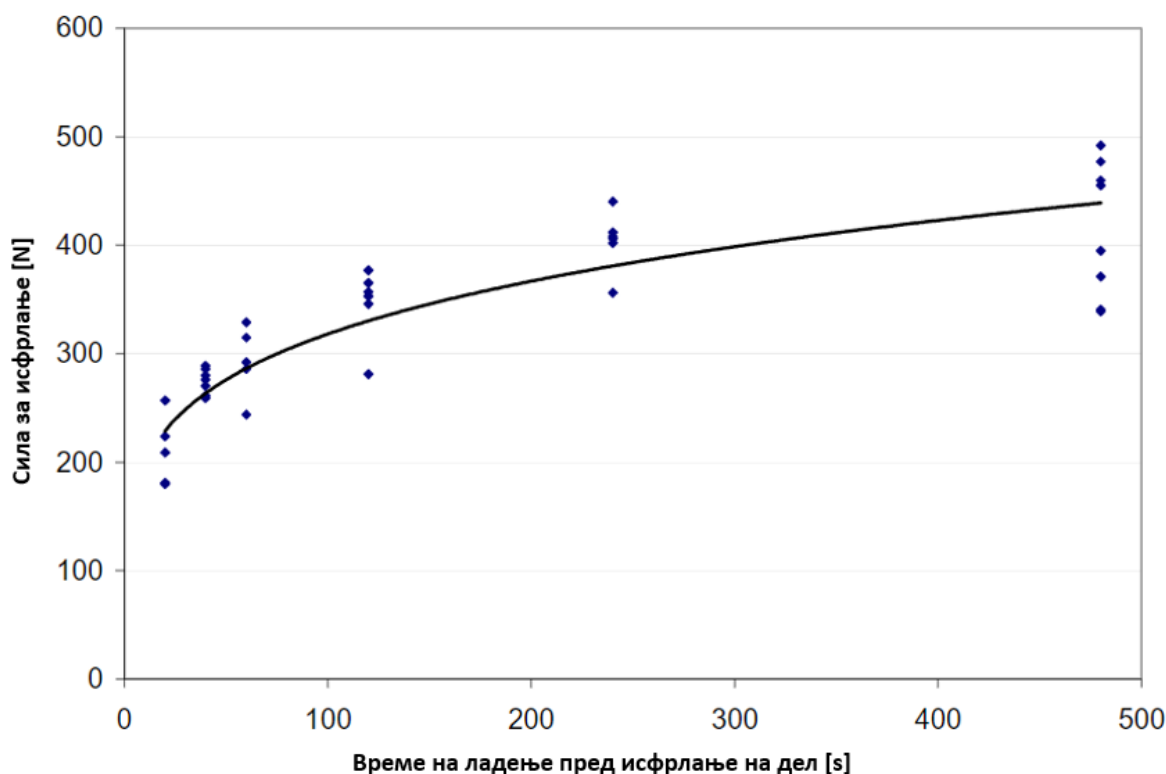
Најголем дел од претходните истражувања се фокусираат и на причините за појава на дефекти при употребата на овие алати и развивање методологии за нивно препознавање и предвидување ([28, 32]).



Слика 2.1: Разлики помеѓу предвидените и измерените вредности за сила на исфрлање кај стереолитографски гравури (Извор: [26])

Во истражувањето на *Hopkinson, N.* и *Dickens, P.* [26] е утврдено дека еден од овие проблеми е начинот на исфрлање на производот од гравурата по вбризгувањето. Лом при исфрлање настанувал кај одредени геометриски елементи кога вкупното напрегање од силата на исфрлање ја надминувало јачината на истегнување на полимерниот материјал од кој е изработен алатот. Врз база на експерименталните резултати, развиени се модели за предвидување на бројот на производи што може да се добијат од еден алат пред кршење на проблематичните елементи од геометријата. Бројот на производи што може да се добијат е претставен како функција од односот меѓу

напрегањето кое се појавува при исфрлање на парчето и јачината на истегнување на фотополимерот од кој е изработен алатот на специфичната температура на исфрлање.



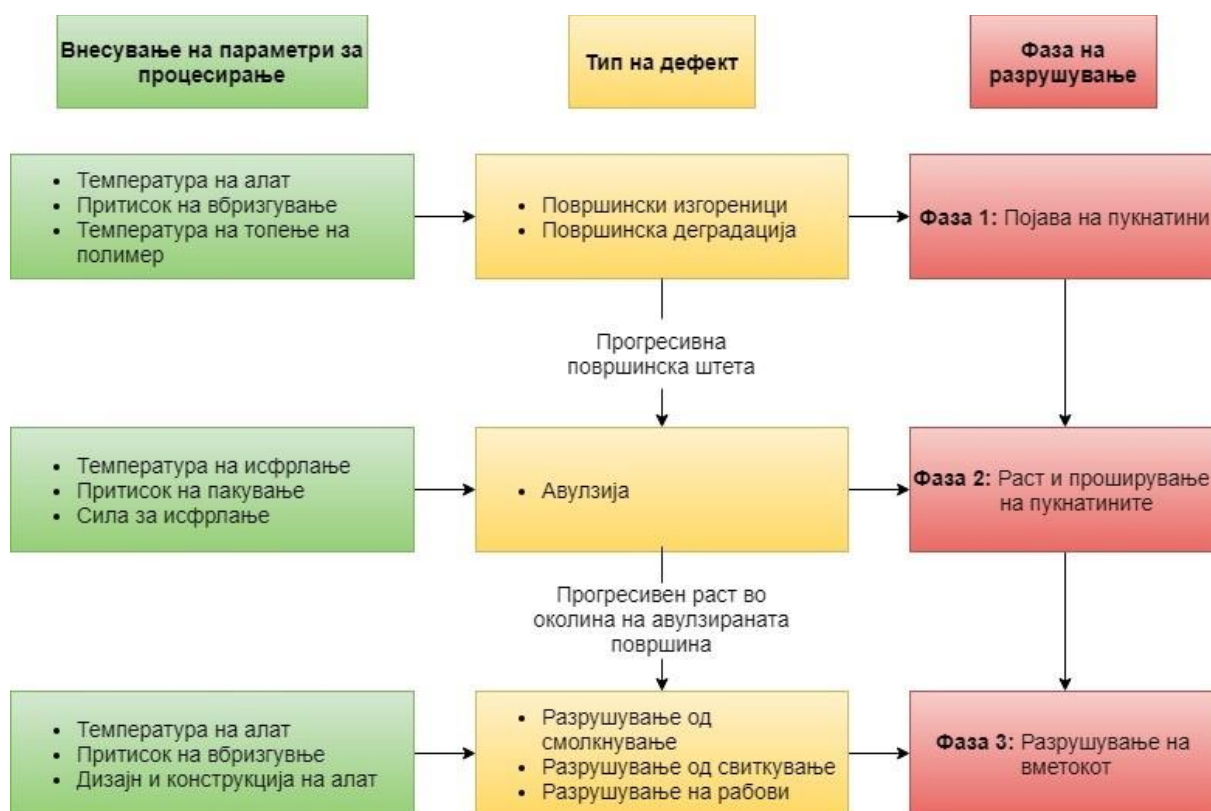
Слика 2.2: Зависност помеѓу времето на ладење и потребната сила за исфрлање дел изработен во стереолитографска гравура (Извор: [26])

Во друг истражувачки труд на *Hopkinson, N.* и *Dickens, P.* [29] се покажало дека ниската термичка спроводливост на стереолитографските фотополимери има низа предности. Најпрво се одолжува ослабувањето на механичките карактеристики на алатот предизвикани од изложеноста на зголемени температури и се овозможува површината на алатот да остане над температурата на стаклосување T_g , што го олеснува исфрлањето на парчето. Ниската термичка спроводливост го олеснува и течењето на полимерната маса до подлабоки тенки жлебови и го намалува ризикот од стврдување на полимерниот растоп. Ова е особено корисно бидејќи тенките жлебови се изработуваат доста лесно со адитивно производство, додека нивното добивање со конвенционални методи со режење кај металните алати е многу потешко. Покрај тоа, ниската термичка спроводливост овозможува вбризување со понизок притисок, што овозможува изработка на поголеми делови на помали машини за инјекционо вбризување. Ова е особено корисно во случаите кога се изработува прототип на

одреден дел бидејќи поголемите машини се ослободуваат за големосериско производство.

2.1.1. Категоризација на потенцијалните дефекти при употреба на стереолитографски гравури за инјекционо вбригување

Примената на адитивното производство за добивање алати за инјекционо вбригување е условена со запазување на геометријата како резултат на големите температури и притисокот кои се јавуваат во процесот на инјекционо вбригување. За целите на ова истражување, како димензионално стабилен алат ќе се смета алатот кој ќе обезбеди доволно тесно толерантно поле кај димензиите на моделот по одреден број работни циклуси на инјекционо вбригување. На крај, последниот услов за употребливост е отпорноста на алатните сегменти на деградација.

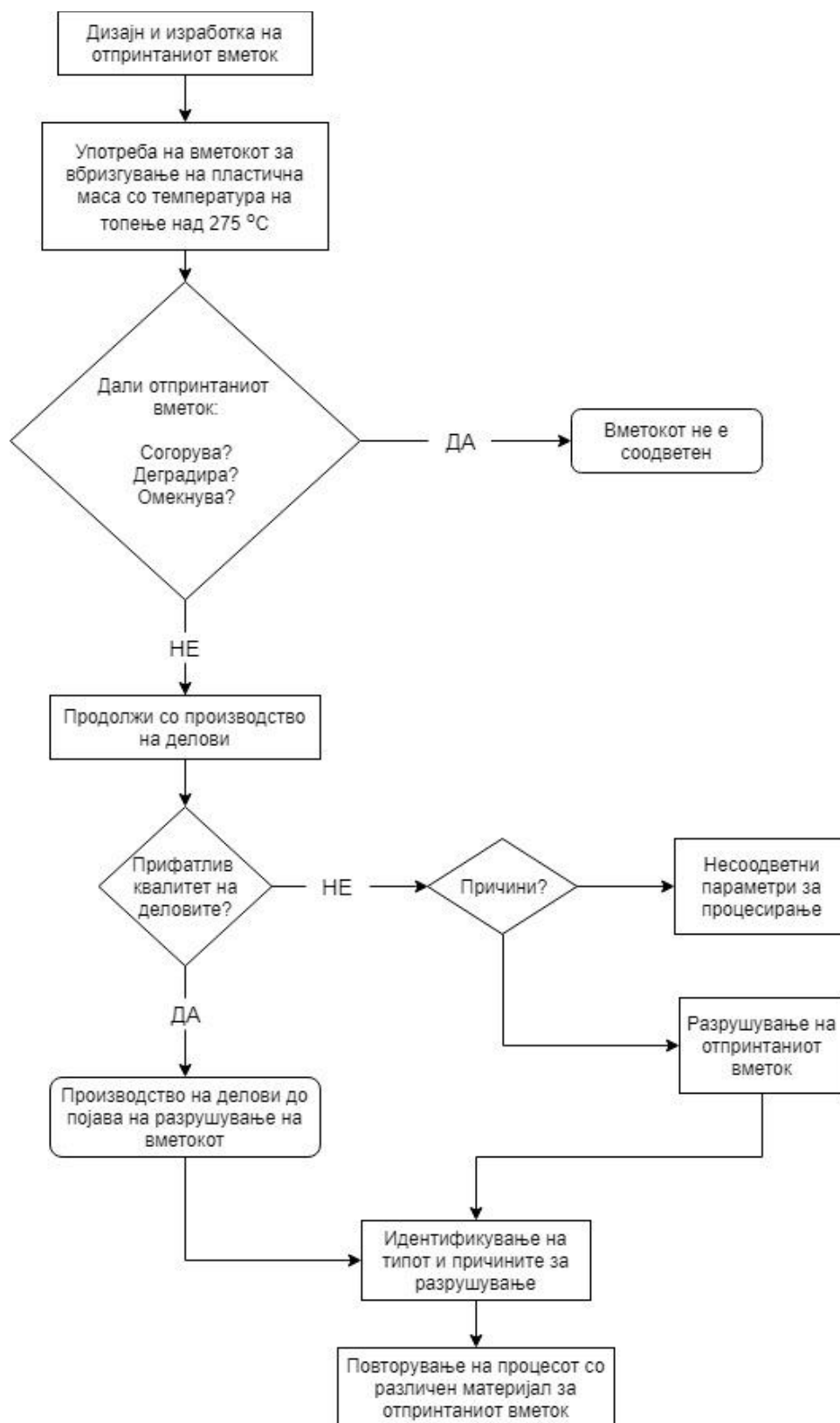


Слика 2.3: Концептуална мапа на интеракциите помеѓу причините за разрушување и крајниот облик на пукнатината [Извор: [27]]

Категоризацијата на пукнатините и појавата на неповратно оштетување на полимерните RT алати се опфатени во трудот на *Bagalkot et.al* [27]. Таму се класифицирани критичните параметри што влијаат врз животниот век на алатот и е направена категоризација на механизмите кои предизвикуваат лом. Главните облици на лом што се очекува да се јават се:

- површинска деградација
- авулзија
- лом од смолкнување
- лом од свиткување
- лом на раб

Секоја одделна студија на случај во [27] се води по следниот блок-дијаграм:



Слика 2.4: Работен тек за детектирање појава на лом кај полимерен алат за инјекционо вбризување [Извор: [27]]

2.2. Анализи на животен век на стереолитографски гравури

Врз база на досегашните студии, алатите изработени од овие материјали се способни да издржат барем 30-50 работни циклуси пред да се појави видлив дефект на гравурната плоча. Оптималната примена на овие алати е во случаи кога пластичните делови се изработуваат од полимерни материјали со помала вискозност и пониска температура на топење. Параметрите на процесирање како притисок, брзина на вбригање, работна температура кај овие алати се усвојуваат во нивните најниски препорачани вредности за полимерниот материјал кој се преработува.

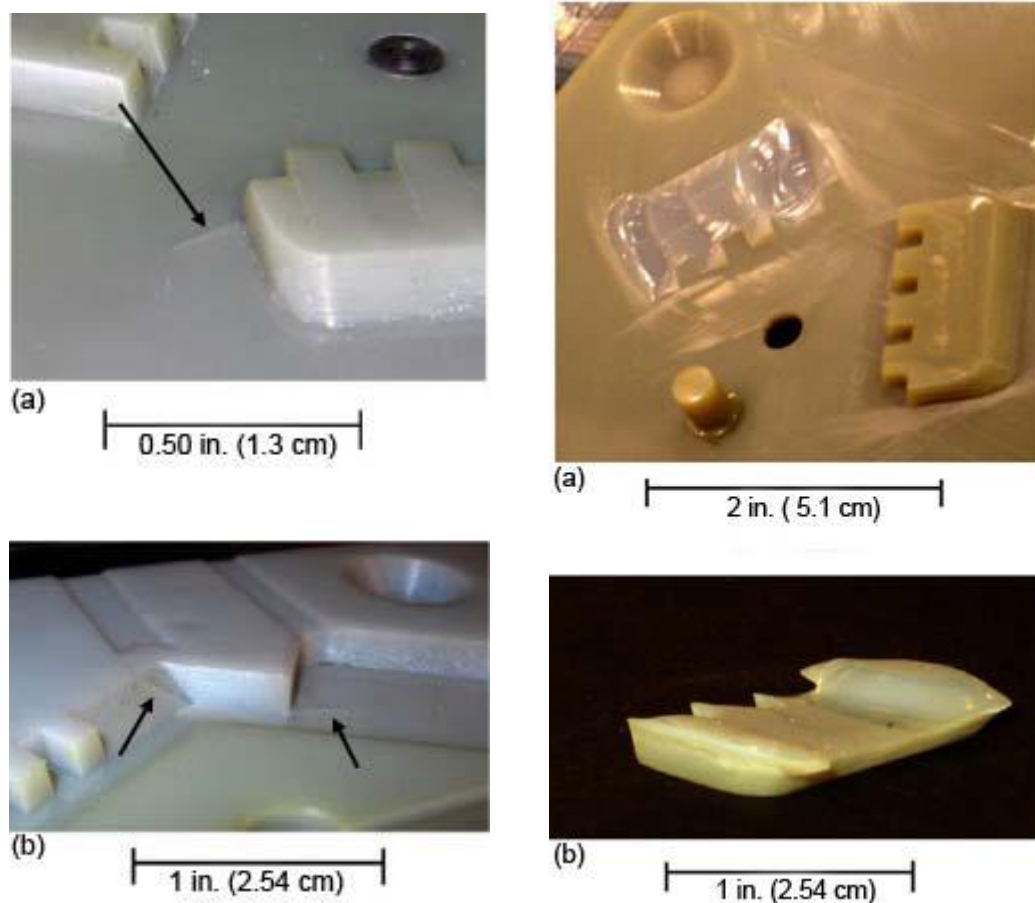
Табела 2.1: Оптимални параметри за процесирање на ABS Lustran 648 [Извор: [24]]

Температура во екструдер	241°C - 243°C
Температура во диза	Температура во екструдер – 15 °C
Сила на притегање	160 kN
Притисок на вбригување	48 MPa
Брзина на полжавесто вретено	висока
Време на полнење	2,5 – 3 s
Предзагревање	Без предзагревање

Alexander K во [24] анализира алат изработен од NanoForm 15120 кој издржал 150 работни циклуси на вбригање ABS пластика. NanoForm е дел од фамилијата на композитни фотополимери неодамна воведени од производителите DSM Somos и 3D Systems што имаат зголемени перформанси во материјалните својства и потенцијално би можеле да решат дел од предизвиците кај примената на стереолитографските алати. Материјалите користат матрица од термореактивниот полимерен материјал (обично акрилат и/или епоксид) и зајакнувачки тип на керамика, кој се користи за обезбедување крутост, цврстина и отпорност на топлина.

Цената на овој алат и времето за негово пуштање во функција се споредливи со алуминиумски алати за прототипирање на пластични делови. Сите изработени делови имале добри механички карактеристики и димензионална точност, но исто така содржеле и естетски дефекти кои може да се минимизираат со дополнителна доработка на отпечатената гравура. Како главни проблеми кај овој тип алати се издвоени ризикот од раслојување кај локациите на гравурата каде што има концентрација на напрегања и нерамномерната распределба на температурата. Крајниот заклучок од ова испитување

е дека со соодветно избрани параметри на процесирање, ваквиот тип алати се соодветни за изработка на мали и средни пластични делови во серии не поголеми од 100 парчиња.



Слика 2.5: Пукнатини кај гравурата (лево) и крут лом со одделување на сегмент од гравурата (десно) [Извор: [24]]

Експериментот во [24] бил реализиран на преса од 200 kN за инјекционо вбригување од типот Morgan Press GT100. ABS пластиката (комерцијално име: Lustran 648) се вбригала со постепено коригирање на параметрите за процесирање сè додека не се дошло до оптималните параметри дадени во Табела 2.1. Притоа, за сите параметри иницијално е усвоена најниска вредност која потоа постепено се зголемува додека е дојдено до номиналните вредности прикажани во табелата.

2.3. Влијанието на материјалот на алатот врз механичките карактеристики на изработените пластични делови

Можноста за производство на пластични делови со инјекционо вбригување користејќи директно изработени полимерни гравури е претходно претставена во други истражувања со различен опсег. Една од целите на оваа теза е да се анализираат и механичките карактеристиките на изработените делови.

Според *Pötsch u Michaeli* [30] главните функции на алатите на инјекционо вбригување може да се дефинираат како:

1. Распределба на растопената маса
2. Формирање на растопот во некоја специфична геометрија
3. Ладење на растопот
4. Исфрлање на готовиот производ.

Во истражувањето на *J.I. Segal* и *R.I. Campbell* [18] е даден генерален преглед на ефектите на RT алатите врз карактеристиките на готовиот пластичен производ, со тоа што се земаат предвид истите 4 клучни функции за обезбедување квалитетен производ. Импликацијата од употреба на полимерни гравури предизвикува некои несакани појави кои може да се поделат во неколку групи:

- Намалување на прецизноста и издржливоста на алатот
- Намалување на количината на производи што може да се произведат
- Намалување на квалитетот на производите.

Со оглед на тоа што инјекционото вбригување во современ облик на алати за инјекционо вбригување е присутно од втората половина на минатиот век, на располагање имаме богата и разновидна стручна литература која го истражува влијанието на параметрите на процесирање врз квалитетот на пластичниот производ ([31, 32, 33, 34]). Овие истражувања се фокусирани на конвенционалните алати, меѓутоа, тие резултати може во одредени ситуации на анализи да се искористат и при проектирањето технологии со полимерни гравури. Како што е споменато претходно, термичките параметри на процесирање се од особено значење бидејќи влијаат врз механичките карактеристики на производот, степенот на загревање и степенот на ладење на

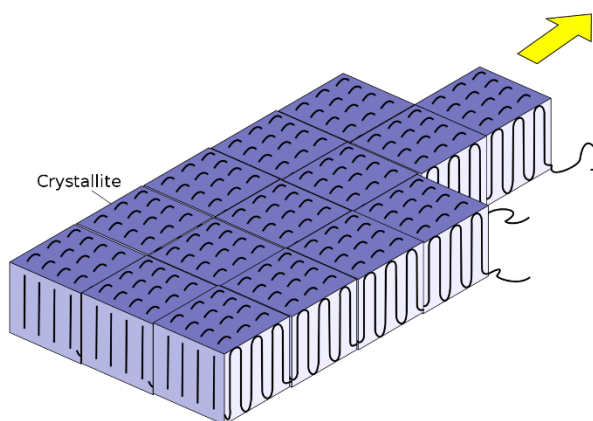
растопената маса. Ладењето на производот најмногу зависи од материјалот на алатот и во случај на употреба на полимерни гравури добиени со некој стереолитографски метод, намалената температурна спроводливост во споредба со конвенционалните метални алати има големо влијание врз особините на крајниот производ.

Покрај можноста за изработка на мали серии на делови со употреба на полимерни алатни гравури, повеќе истражувања покажале дека физичките својства на вака добиените пластични делови се разликуваат во однос на деловите добиени од конвенционални алати за инјекционо вбригување изработени од челик или алуминиум. *Segal* и *Campbell* [18] многу добро ги сумираат овие истражувања до 2001 година и нивното истражување опфаќа различни типови полимерни гравури кои се користат во технологијата за инјекционо вбригување. Таму се анализирани стереолитографски гравури, гравури добиени со лиење на фотополимери и други легури со ниски точки за топење. Дополнително, полимерните материјали кои се вбригуваат во овие гравури се исто така во широк дијапазон и се движат од конвенционален полипропилен до полиамид и поликарбонат зајакнат со стаклени влакна. Иако сите цитирани трудови покажуваат разлики во карактеристиките на деловите добиени од алати изработени со различните технологии за адитивно производство, точните ефекти кои ги предизвикуваат овие разлики сè уште не се објаснети. Понатаму, различни испитувања покажуваат дека има контрадикторни резултати во однос на испитаните механички својства, конкретно за јачината на истегнување на материјалот. Анализата јасно покажува дека, од една страна, во одредени случаи, јачината на истегнување била поголема за деловите добиени од конвенционални челични гравури наспроти деловите добиени од стереолитографски гравури. Од друга страна, одредени испитувања добиле спротивен резултат и заклучиле дека јачината на истегнување е поголема кај деловите изработени во стереолитографските гравури.

Во периодот од објавувањето на [18] до денес се направени многу дополнителни студии за употребата на полимерни гравури за инјекционо вбригување кои се фокусираат на добиените механички својства на добиените делови.

2.3.1. Промени во кристализацијата на полимерот во зависност од материјалот на алатот за инјекционо вбризгување

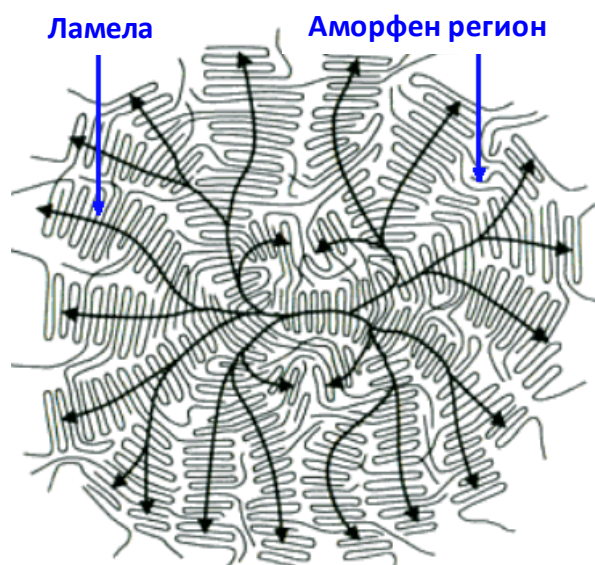
Во полимерната физика сферолити (од грчки *sphaira* = сфера и *lithos* = камен) се сферични семикристални региони во неразгранетите линеарни полимери. Нивното формирање е поврзано со кристализацијата на полимерите од растопена состојба и зависи од повеќе параметри, меѓу кои структурата на полимерните молекули и брзината на ладење.



Слика 2.6: Принцип на формирање ламели за време на кристализацијата на полимерниот материјал. Стрелката ја покажува насоката на температурниот градиент. (Извор: [35])

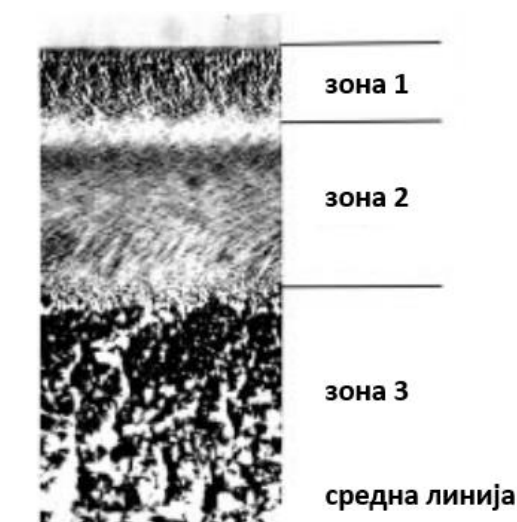
Во зависност од овие параметри, дијаметарот на сферолитите може доста да варира и се движи од неколку микрометри до неколку милиметри. Сферолитите се формирани од повеќе правилно подредени ламели, што резултира со поголема густина и тврдина, но и кршливост споредено со регионите од полимерниот материјал каде што нема вакви формации [36]. Ламелите се поврзани со аморфни региони кои обезбедуваат еластичност, жилавост и отпорност на удар.

Формацијата на сферолити влијае врз многу од карактеристиките на полимерните материјали, конкретно степенот на кристалната структура, густината, јачината на истегнување и модулот на еластичност се зголемуваат за време на кристализацијата. Ова зголемување се должи на ламеларната фракција во сферолитите, каде што молекулите се погусто спакувани наспрема аморфните региони. Посилната интермолекуларна интеракција во ламелите влијае врз зголемената тврдина, но и на зголемената кршливост [36].



Слика 2.7: Шематски модел на сферолит. Црните стрелки го означуваат правецот на молекуларно подредување (Извор: [35])

Michaeli и *Lindner* [37] заклучуваат дека доколку алатот за инјекционо вбризгување е изработен од материјал кој има добра температурна спроводливост, тогаш произведените делови имаат дебели гранични слоеви и помали сферолити, додека кај алатите од материјали со полоша температурна спроводливост граничните слоеви се тенки, а сферолитите во полимерниот материјал се поголеми. Присуството на поголеми сферолити, исто така, е поврзано и има голема корелација со зголемување на јачината на истегнување кај деловите.



Слика 2.8: Гранични слоеви кај примерок од полипропилен што ја отсликуваат разликата во големината на сферолитите кај полимерниот материјал по неговата дебелина (Извор: [37])

Harris и колегите во [23] покажале дека кај семикристалниот полимерен материјал полиамид 66 (PA66) се јавува двојно поголемо термичко собирање кога се обработува во стереолитографски алат во споредба со обликувањето во стандарден алуминиумски алат. Разликата во термичкото собирање се должела првенствено на различните услови на процесирање поврзани со различното однесување на материјалите за време на ладењето поради различната температурна спроводливост на материјалот од кој се изработени гравурите. Понатаму, сличен тест бил направен и со аморфен полимерен материјал Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) и во овој случај не биле забележани видливи разлики во термичкото собирање помеѓу двата типа различни алати, што значи дека при примена на стереолитографски гравури особено внимание во дизајнот треба да се обрне на компензацијата за термичко собирање кога станува збор за кристални и семикристални полимерни материјали.

Harris и колегите во [38] предлагаат два различни пристапи за подобра контрола на кристалното однесување кај пластичните делови добиени од стереолитографски гравури. Прво со контрола на температурата на топење и држење до долната препорачана граница за полимерниот материјал, овозможена е намалена кристализација кај полиамид 66 (PA66) што се обработува во стереолитографски гравури. Во случајот со обликување во алуминиумски гравури промените во температурата на топење немале никаков ефект врз степенот на кристализација во деловите. Причината за ова е повисоката брзина на ладење поради поголемата температурна спроводливост на алуминиумот. Поради пократкото време на ладење, температурната зона во која може да се влијае врз кристализацијата на полимерниот материјал премногу брзо се преминува за промената во температура на топење да има каков било ефект.

Вториот пристап користи агенс за нуклеирање кој обезбедува константна кристалност кај деловите без разлика на брзината на ладење. Агенсите за нуклеирање се неоргански материјали што се додаваат на полимерните материјали за зголемување на степенот на кристализација и скратување на работните циклуси при нивното процесирање со обликување во гравури или екструзија. Со нивна помош се забрзува транзицијата од растопена кон цврста состојба на полимерниот материјал. Промената

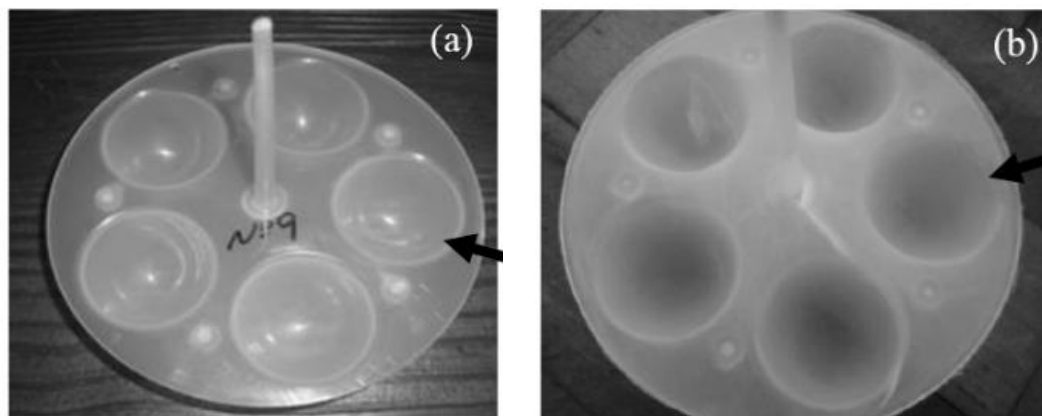
на степенот на кристализација кај полимерните материјали менува некои од нивните карактеристики, како густината, крутоста и други физички карактеристики. Со употреба на ваков агенс во [38] е добиен степен на кристализација кај готовите делови што има вредност меѓу вредноста измерена кај деловите добиени во стереолитографски гравури и деловите добиени во алуминиумски гравури во случаите каде што не е користен никаков агенс за нуклеирање.

Во [39] дополнително е покажано дека пониската температурна спроводливост кај полимерните гравури го зголемува степенот на кристализација на делови добиени од полимерот полиамид 66 (PA66) со инјекционо вбризгување, што исто така го зголемува потенцијалното термичко собирање по ладењето кај деловите добиени со технологијата на инјекционо вбризгување. Споредено со пластичните делови добиени од алати за инјекционо вбризгување од алуминиум, кај деловите изработени во стереолитографски гравури се појавила 30% поголема кристализација во структурата на полимерниот материјал. Во [40] е покажано како ниската температурна спроводливост на стереолитографските гравури може да се искористи за изработка на целосно кристализирани делови од полимерот polyether ether keton (PEEK) на многу пониски параметри за процесирање во однос на конвенционалните алати изработени од алатен челик. Со стереолитографските гравури било можно да се изработи мала серија на парчиња со загревања на алатот на температура од 23 °C и со притисок на вбризгување од 25 bar. Според *Harris* [40], за добивање на истите резултати во конвенционални челични алати, потребно е да се работи со температура на алат од 200 °C и притисоци за вбризгување до 500 bar.

Pouzada [41] прави генерален преглед на развојот и примената на хибридни алати за инјекционо вбризгување со фокус на епоксидни композити изработени со Rapid Tooling техниките за индиректна изработка и адитивно производство со ласерско синтерување. Иако постои разлика во однос на технологиите за изработка на гравурите и природата на користените материјали, генерално термичките карактеристики на полимерните алати имаат значително влијание врз својствата на добиените делови.

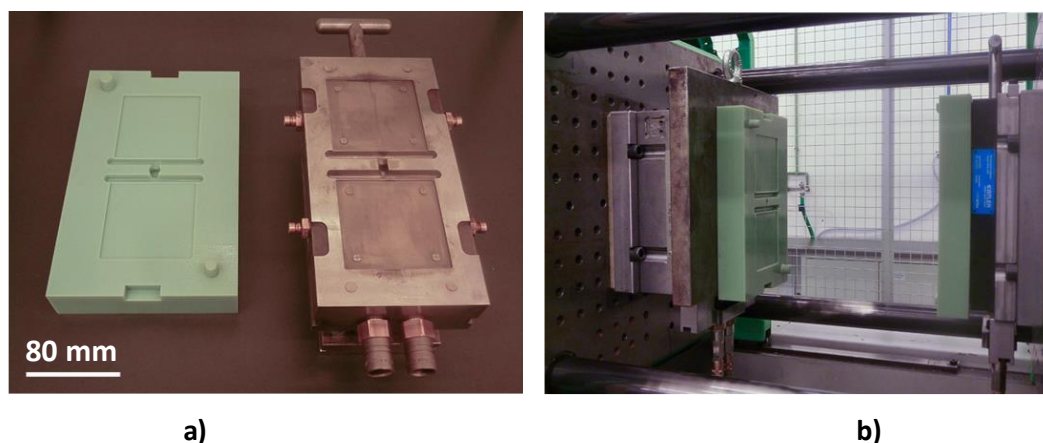
Во испитувањата на *Gonçalves Martinho* [42] е потврдено дека температурното собирање е поголемо кај семикристалните полимерни материјали. Ова однесување на

материјалите е испитано на хомополимер полипропилен (PP) изработен во полимерна гравура. Дополнително, деформацијата на меката матрица била идентификувана како влијателен фактор врз собирањето бидејќи димензионалните варијации кај полимерниот алат било измерено дека се еден степен повисоки во однос на челичните конвенционални алати.



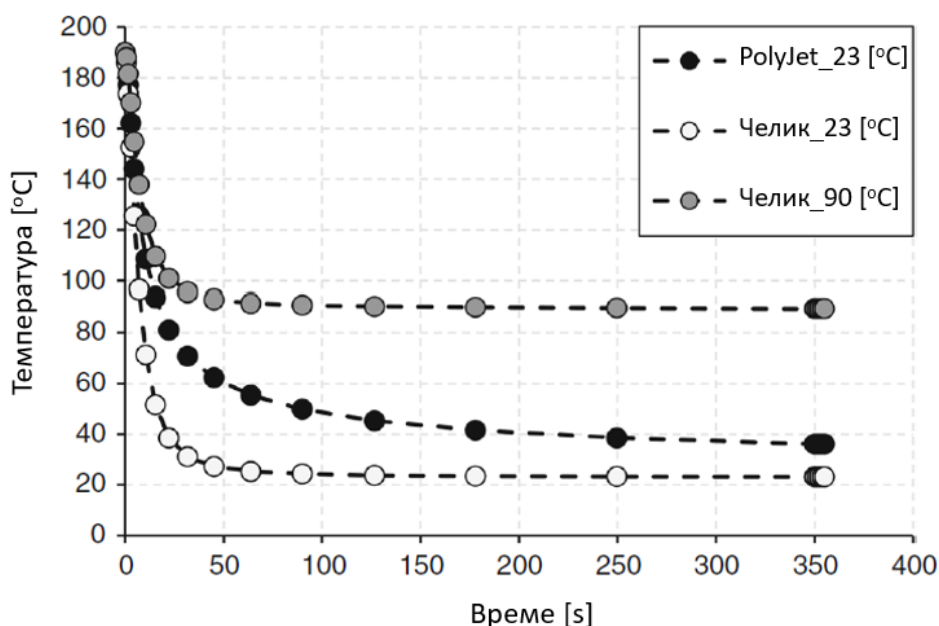
Слика 2.9: Разлика во транспарентноста кај делови од полипропилен изработени во композитен алат од епоксидна смола и алуминиум (a) и алат од AISI P20 челик (b) (Извор: [43])

Fernandes et al. [43] покажале дека механичките карактеристики на хомополимер полипропилен (PP) се полоши доколку тој дел е изработен во хибриден алат со матрица од епоксидна смола и алуминиумска матрица споредено со конвенционалните челични алати. Притоа биле испитани максимална јачина на истегнување, Јунговиот модул на еластичност и максималното издолжување до појава на лом. Степенот на кристализација, исто така, бил испитуван и дојдено е до заклучок дека е повисок кај примероците добиени со инјекционо вбризгување во хибридниот алат наспроти алатот од конвенционален челик.



Слика 2.10: Стереолитографскиот и челичниот алат (а), и стереолитографскиот алат поставен на машината (Извор: [44])

Tábi во [44] покажал дека и покрај бавното ладење предизвикано од ниската термичка спроводливост на стереолитографскиот полимерен алат, со вбризување на чиста аморфна PLA (Polylactic acid) пластика се добиваат делови без значително зголемен степен на кристализација. Полимерните гравури во овој случај биле изработени со PolyJet технологијата од епокси-акрилен фотополимер со особини многу слични на ABS пластика. Референтниот конвенционален челичен алат во овој експеримент имал температура од 23 °C и регистрираните разлики во кристализацијата на вбризганиот полимерен материјал се должат на повисоката брзина на ладење. Овие разлики во кристализацијата се минимизирале со зголемување на температурата на челичниот алат до 90 °C. Механичките својства кај деловите добиени од двата различни типа алати се разликувале и покрај постигнатата сличност во степенот на кристализација.



Слика 2.11: Температурата на изработениот пластичен дел како функција од времето на ладење во алати од три различни материјали (Извор: [44])

Спротивно на гореспоменатото истражување, *Volpato* [19] забележал намалување во степенот на кристализација, благо зголемување во Јунговиот модул на еластичност и јачината на истегнување, како и значително зголемување во жилавоста на материјалот.

Сите претходни истражувања во оваа област сугерираат дека различните термички услови за процесирање на деловите со инјекционо вбризгување се највлијателни за различните карактеристики на добиените делови. *Harris* во [38] предлага контролата врз степенот на кристализација да се изведе со регулирање на температурата на топење и со употреба на агенси за нуклеирање. Покрај сите испитувања, сè уште нема конзистентно разбирање на влијанието на различните алати врз карактеристиките на произведените делови, нешто што е споменато во [18] од *Segal* и *Campbell* и е потврдено од контрадикторните резултати објавени од *Volpato* во [19]. Од таа причина, овој докторски труд, покрај испитувањето за применливост на стереолитографските гравури и испитување на бројот на работни циклуси што може да ги издржат, ќе ја испита и јакоста на вбризганите делови користејќи ја пропишаната јакост на вбризганиот материјал од производителот како референтна вредност за споредба на добиените својства на материјалот.

2.4. Резиме на досегашното истражување во областа

Постојат повеќе различни RT процеси за добивање прототипи објаснети од *Gebhardt* [45] и *Radstok* [46]. Во претходно објавената литература (*Karapatis et al.* [47]; *Stierlen et al.* [48]) се направени и неколку општи споредби на RT технологии, но тие најмногу се концентрираат на бројот на парчиња што може да се добијат и на заштедите во време и трошоци во споредба со конвенционалните алати. До денес, главниот акцент во истражувањето за RT е на развојот на технологии погодни за поголемо производство. Во случаите каде што се прави споредба меѓу специфични RT процеси и конвенционално добиените алати, карактеристиките кои се споредуваат се пристрасни кон барањата на крајниот корисник. Досега, овие директни споредби го немаат квантифицирано ефектот на овој тип алати врз механичките карактеристики на производите.

Времето на работниот циклус е, исто така, дискутирано во достапната литература и како главни двигатели најчесто се усвојуваат комплексноста на геометријата на производот и термичката спроводливост на материјалот која влијае врз времето на ладење. Исто така, во истражувањето на *Willis* [49] се разгледува негативниот ефект на долгите работни циклуси поради намалувањето на животниот век на алатот. Бидејќи полимерните материјали кои се користат во стереолитографијата со зголемување на температурата појавуваат влошување на механичките карактеристики ([8, 50]), во овие случаи е добро да се намали работниот циклус колку што е можно повеќе.

Главниот проблем кој е потенциран во досегашните истражувања е во тоа што:

- Не може да се направи релевантна корелација меѓу објавените резултати од различните испитувања поради различните полимерни материјали кои се испитувани.
- Различните RT технологии кои се користени во добивањето на пластичните гравури за алатите.

Оттука може да се заклучи дека досегашното истражување во оваа област е доста фрагментирано и повеќето трудови се направени како резултат на потребите на производителите на машини за адитивно производство. Испитувајќи ја претходната литература која се фокусира на ефектите на алатите добиени со адитивно производство

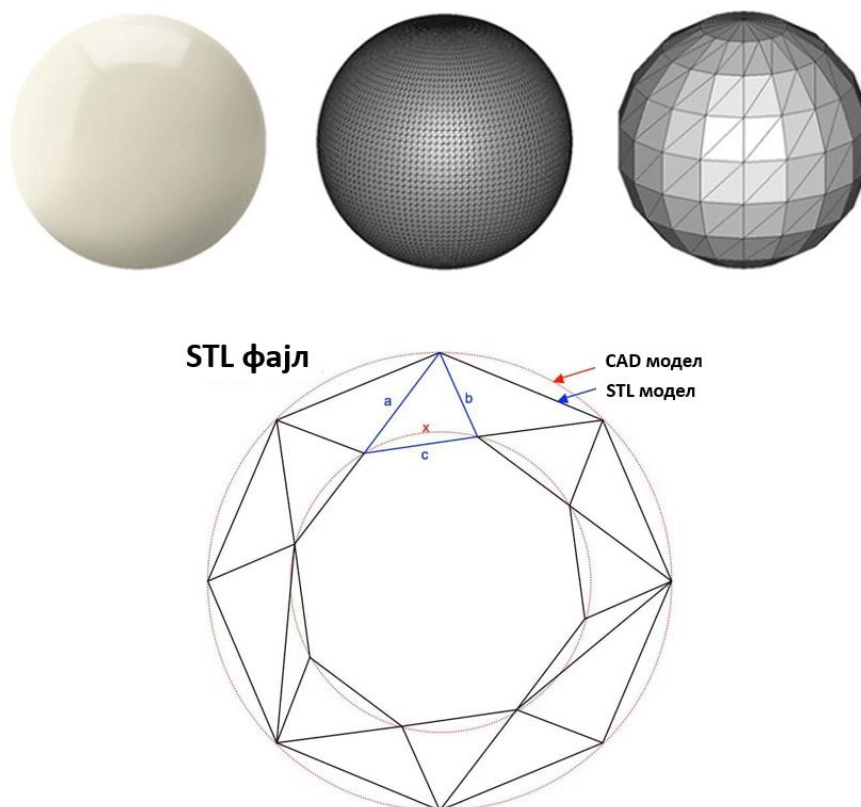
врз карактеристиките на производите, се доаѓа до заклучок дека за овој тип алати е направена многу мала релација со истражувањата за конвенционални алати кои ја опишуваат интеракцијата меѓу параметрите на процесирање и карактеристиките на полимерниот материјал (исклучоци се истражувањата на *Dawson* и *Muzzy* [51] и *Dusel*, [52]).

Од резултатите во друга достапна литература се гледа дека постои варијација во механичките карактеристики на готовите производи (на пр., јачината на истегнување) кај полимерните материјали обликувани под различни услови. Оваа појава сè уште не е целосно објаснета и кај некои автори се забележуваат контрадикторни резултати. Во истражувањето на *Dawson* и *Muzzy* [51] се покажало дека максималната јачина на истегнување е повисока кај производите изработени во конвенционални челични алати, додека во трудовите на *Dusel et al.* [52] се покажало спротивното, дека деловите добиени во полимерни гравури имаат повисока јачина на истегнување во однос на производите добиени во конвенционални челични алати. Од овие конфликтни резултати станува јасно дека идните истражувања ќе треба да се фокусираат на параметрите на процесирање и нивното влијание врз карактеристиките на производот. Потребно е да се утврди до кој степен термичките карактеристики на алатниот материјал влијаат врз механичките и димензионалните карактеристики на производите. Дополнително, може да се разгледуваат термичката спроводливост и специфичниот температурен капацитет и штом нивното влијание се квантифицира, резултатите може да се искористат за развивање предиктивен модел за најупотребуваните RT процеси кои се употребуваат од крајните корисници.

3. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ

3.1. Адитивно производство (АП)

Технологиите за адитивно производство имаат кратка историја од околу 30 години. Тие претставувале голем исчекор во светот на производството бидејќи имплементирале начин на генерирање тридимензионални објекти со додавање материјал наспроти конвенционалните технологии за производство на дел преку отстранување материјал. Оваа карактеристика била главната причина за овие процеси да се нарекуваат и процеси на адитивно производство. Сепак, главниот технолошки пробив што овозможил развој на ваквите процеси била еволуцијата на компјутерската и информатичката технологија, особено различните компјутерски потпомогнати технологии во производната област, како компјутерски потпомогнатиот дизајн (CAD), компјутерски потпомогнатото производство (CAM) и компјутерски потпомогнатото инженерство (CAE).



Слика 3.1: Анатомија на STL моделот споредено со CAD моделот од кој се добива
(Извор: [53])

Сите системи за адитивно производство имаат заеднички принцип на производство: градење 3Д-дел слој по слој. Затоа редоследот на фазите за изградба на физичкиот дел е речиси идентичен за сите процеси. Врз основа на дигитален CAD модел на делот, се генерира модел во STL формат (Слика 3.1). Овој STL модел потоа се дели на слоеви за последователно да може да се произведе физичкиот модел. Во STL форматот, 3Д-моделот е претставен со голем број триаголници кои дефинираат по еден дел од надворешната површина на објектот. Типот на процесот за адитивно производство што се користи влијае само врз фазата на делење. Во зависност од можностите на методот за адитивно производство, се одредува дебелината на секој слој, како и начинот на кој треба да се изгради физичкиот модел.

Денес постојат голем број различни технологии за адитивно производство. Иницијално, многу од овие процеси биле комерцијализирани, но само неколку од нив успеале да останат на пазарот. Тие можат да се класифицираат врз основа на типот на материјал што се користи пред изработка на делот, како што е наведено од Крут [54] и Bartolo et al [55] (Слика 2.11).



Слика 3.2: Класификација на процесите за адитивно производство (Извор: [55])

Стереолитографијата е првата развиена технологија за брзи прототипи. Во Слика 3.2 таа е класифицирана под технологиите што работат со течни материјали. Овој процес најпрво е развиен во раните 70-ти години на минатиот век од страна на јапонскиот истражувач д-р Хидео Кодама, кој го измислил современиот пристап на стереолитографијата за стврдување на фотосензитивни полимерни материјали со помош на ултравиолетова светлина.

Терминот „стереолитографија“ е воспоставен во 1986 година од Charles W. Hull, кој ја патентирал технологијата [56] и ја основал компанијата 3D Systems за комерцијализација на патентот. Изумот бил дефиниран како систем за генерирање на 3Д-објекти со последователно градење тенки слоеви од фотосензитивен материјал. За материјалот да се стврдне, потребно е да се изложи на ултравиолетова светлина, преку што се обезбедува потребната енергија за започнување на хемиската реакција за стврдување, односно за спојување на поголем број мали молекули и формирање интензивно мрежеста структура на полимерниот материјал. Во раните фази на развој на процесот изворот на ултравиолетова светлина за стврдување бил ласер кој преку галванометри се насочувал до потребните локации за стврдување. Овој принцип се користи и денес, меѓутоа, низ годините се развиени алтернативи во поглед на изворот на светлина и насочувањето на светлосниот зрак.

Главната предност на стереолитографијата во однос на другите технологии за адитивно производство е можноста за изработка на модели за релативно кратко време. Понатаму, вака добиените прототипи се со доста тесни толеранции и имаат доволно голема цврстина за да се користат за различни тестови. Дополнително, процесот може да се користи за изработка на мали серии на делови кога не е економски исплатливо да се користи процесот на инјекционо вбризување. Стереолитографијата може да се користи за изработка на гравури за лиење со која било сложеност што понатаму може да се користат за изработка на прототипи од метал.

Процесот на стереолитографија е адитивен процес и како таков, тесно е поврзан со развојот на прототипи за верификација на дизајн. Моделите развиени со стереолитографија може да се користат за естетска и за функционална верификација. Фотополимерните стереолитографски материјали развиени во последните години сè

повеќе наликуваат на полимерите што се користат за масовното производство, како по механичките својства така и по површинскиот квалитет и изглед на изработените делови.

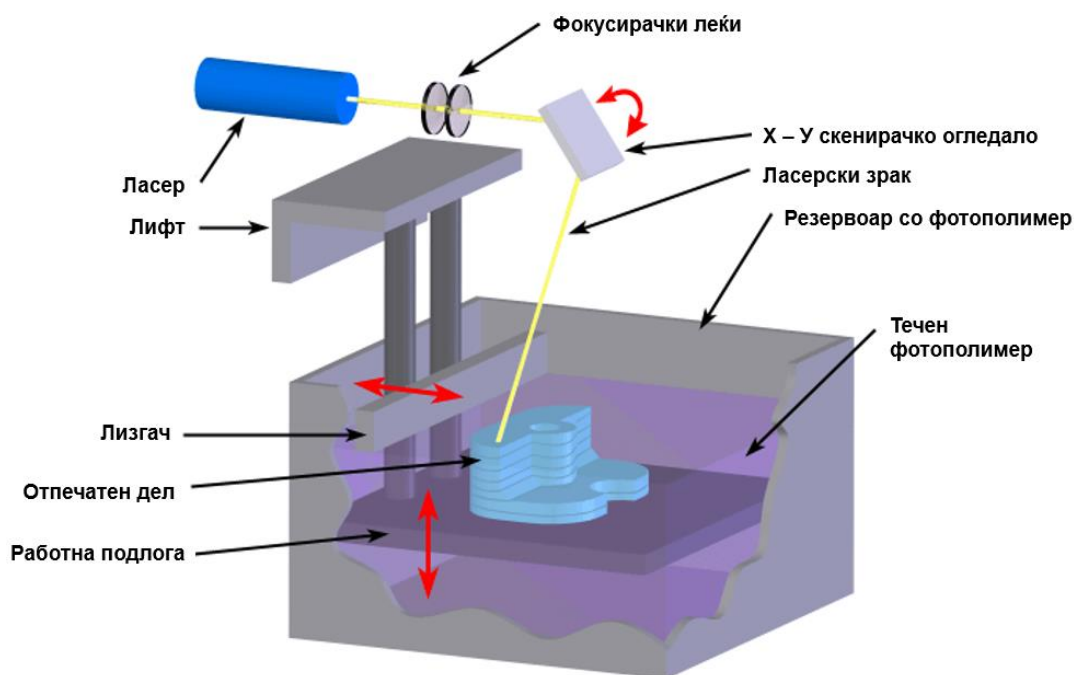


Слика 3.3: Примери за директна примена на делови изработени со SLA технологијата (Извор: [57])

На крај, прототипите на делови добиени со стереолитографија може да се користат и како главни гравури за инјекционо вбригување, термоформирање, обликување со дување и разни други процеси на лиење метали.

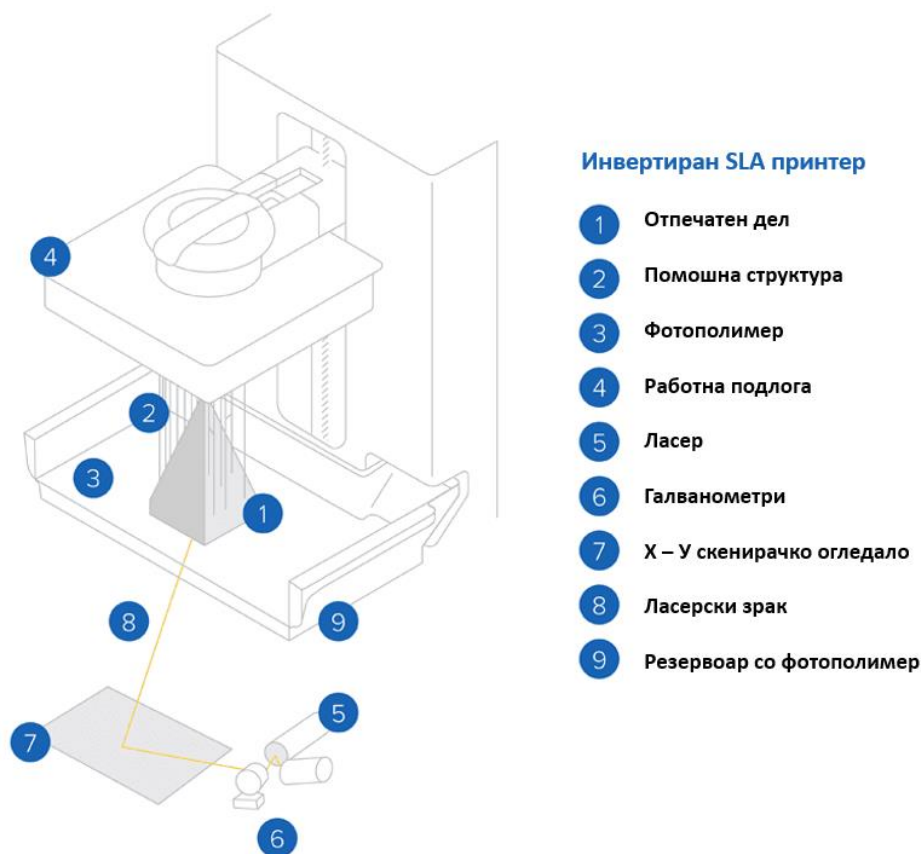
3.1.1. Стереолитографијата како процес за адитивно производство

Технологијата на стереолитографија е патентирана во 1986 година од страна на Charles W. Hull [56]. Од појавата на првиот комерцијален систем во 1988 година (SLA-1) па до денес, стереолитографијата еволуира резултирајќи со подобрена прецизност, подобар квалитет на завршната површина и побрзо производство, додека новите полимерни материјали што се применуваат во оваа технологија овозможуваат произведување на поцврсти делови.



Слика 3.4: Шематски приказ на процесот за стереолитографско адитивно производство (вертикална ориентација на подлогата) (Извор: [58])

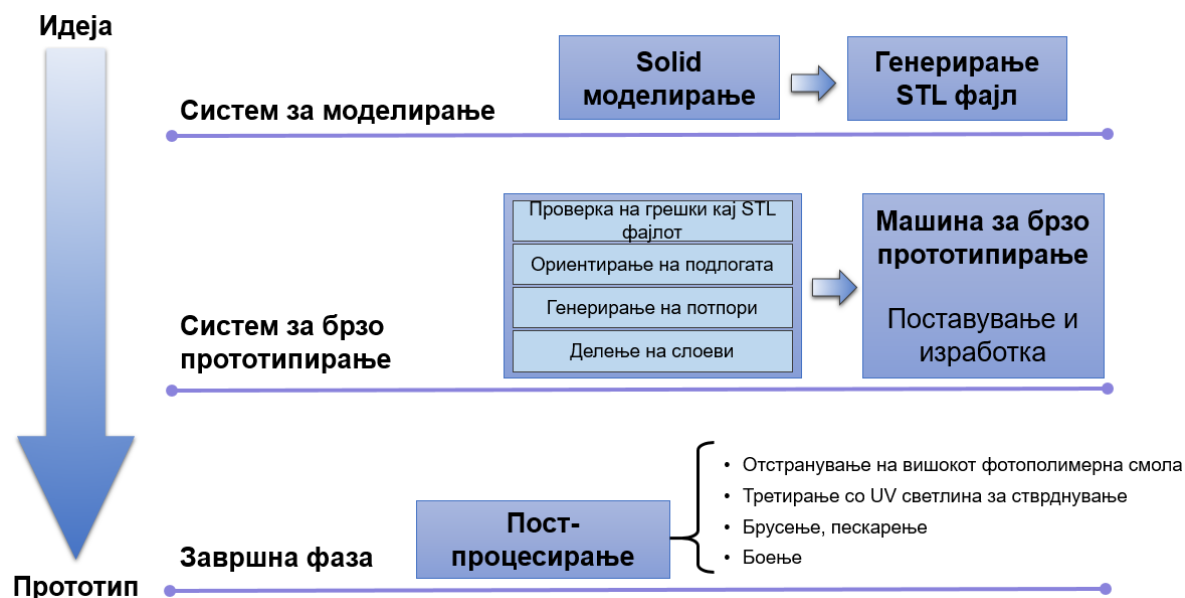
Слично на другите методи за адитивно производство, и кај стереолитографијата посакуваната форма на финалниот производ се изработува слој по слој. Појдовната суровина е материјал во форма на растопен фотосензитивен полимер кој се стврднува со процес на фотополимеризација [59], преку селективно изложување на ултравиолетово зрачење. Изворот на зрачење може да биде концентриран во облик на фокусиран ласерски зрак (He–Cd ласер во постарите системи, или Nd:YVO₄ ласер во поновите), или да биде преку проекција на специфичната форма на слојот (Слика 3.4). Перформансите и карактеристиките на процесот зависат од голем број параметри кои се меѓусебно поврзани. Ориентацијата на делот за време на изработката може да биде вертикална, како што е прикажано на Слика 3.4, или инвертирана како што е прикажано на Слика 3.5.



Слика 3.5: Шематски приказ на процесот за стереолитографско адитивно производство (инверзна ориентација на подлогата) (Извор: [60])

Процесот се состои од три главни фази (Слика 3.6), имено претпроцесирање, изработка и постпроцесирање. Во фазата на претпроцесирање обликот на производот што треба да се произведе се моделира и подготвува на компјутер користејќи соодветни CAD софтвери, при што се создава компјутерски модел на посакуваното парче. Најголемиот дел од комерцијалните системи за стереолитографија користат STL формат на компјутерскиот модел, во кој се опишува само геометријата на површината на тродимензионален објект преку триаголни рамнини. Во фазата на претпроцесирање од витално значење е донесувањето некои одлуки кои ќе ги дефинираат времетраењето за изработка и цената на производот. Тука спаѓа дефинирањето на ориентацијата на делот за време на адитивното производство со цел намалување на времето на изработка и додавање соодветни потпорни структури неопходни за квалитетно изработување на висечките структури и мостови од геометријата на делот. Во зависност од планираната употреба на завршниот дел, тој исто така може да се изгради како склоп од поединечни парчиња кои одделно се произведуваат и потоа се лепат заедно за да го формираат

обликот на делот. Следно, на моделот во STL формат се додаваат потпорните структури и целата геометрија се дели на голем број хоризонтални пресеци кои ги претставуваат слоевите при градењето на моделот. Оваа информација се зачувува најчесто во CLI форматот, што вообичаено е влезен формат во машините за стереолитографија.



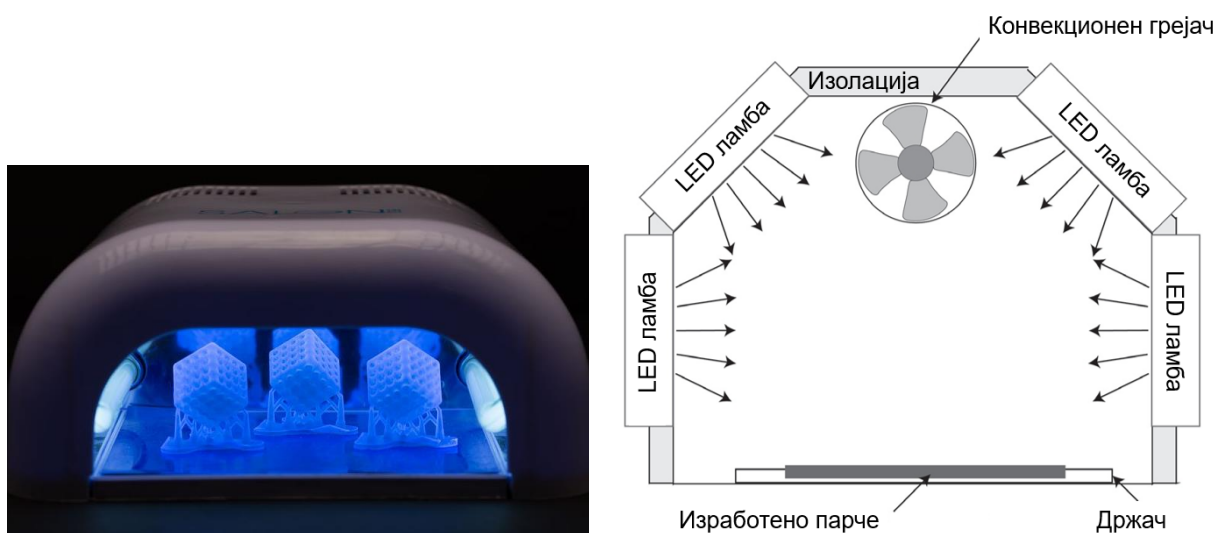
Слика 3.6: Операции за реализација на стереолитографско адитивно производство (Извор: [61])

Во фазата на изработка се врши процесот на адитивно производство на парчето и овој процес се одвива во машината за стереолитографија. Типична машина за стереолитографија се состои од следниве потсистеми:

1. Отстранлив резервоар кој содржи растопен фотосензитивен полимерен материјал.
2. Платформа врз која се гради делот, поставена на подвижна рамка чие вертикално движење е прецизно контролирано.
3. Уреди со сензори за мониторинг на нивото на полимерен материјал.
4. Лизгач за премачкување кој со хоризонтално движење нанесува нов слој на полимерен материјал со рамномерна дебелина над претходно стврднатиот слој.
5. Извор на УВ-светлина заедно со потребната оптика.

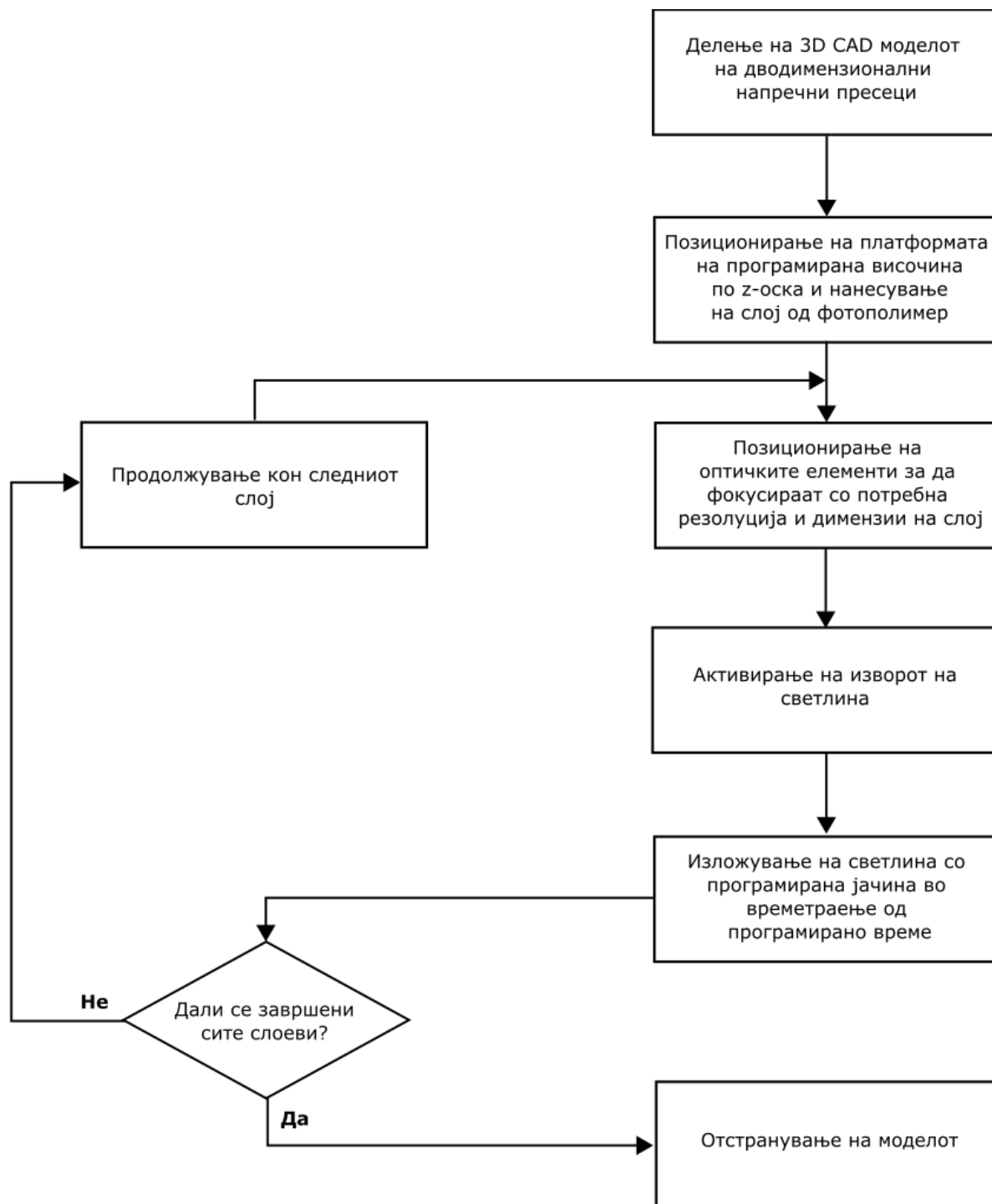
Комората каде што се изработува делот е целосно затворена поради потенцијалниот ризик од испуштање гасови за време на фотополимеризацијата на полимерот.

Изработката на делот започнува со позиционирање на платформата веднаш под површината на полимерниот материјал за да се стврдне првиот слој кој го формира напречниот пресек на делот. Во случај на конвенционална стереолитографија (SLA) каде што фокусиран ласерски зрак е извор на УВ-зрачење, тогаш зракот се движи по точно дефинирани позиции, го стврдува полимерниот материјал во тие позиции и ја дефинира геометријата на првиот слој. Во случајот на проекциската стереолитографија (DLP – Digital Light Processing), геометријата на слојот се стврдува истовремено преку проекцијата на целосната геометрија на слојот. Откако слојот ќе се зацврсти, платформата поставена на подвижната рамка се спушта за растојание еднакво на дебелината на слојот и лизгачот за премачкување одново нанесува рамномерен слој полимерниот материјал над претходно зацврстениот слој. Последователно, следните слоеви од полимерниот материјал што кореспондираат на преостанатите напречни пресеци на делот се стврдуваат еден по друг, така што целосниот облик е изграден на слоевит начин директно од CAD моделот. Процесот на изградба е прикажан на графиконот на Слика 3.8.



Слика 3.7: Уред за постпроцесирање со помош на УВ-светлина на делови добиени со стереолитографија (SLA) (а) (б) шематски приказ на уредот за постпроцесирање (Извор: [62], [63])

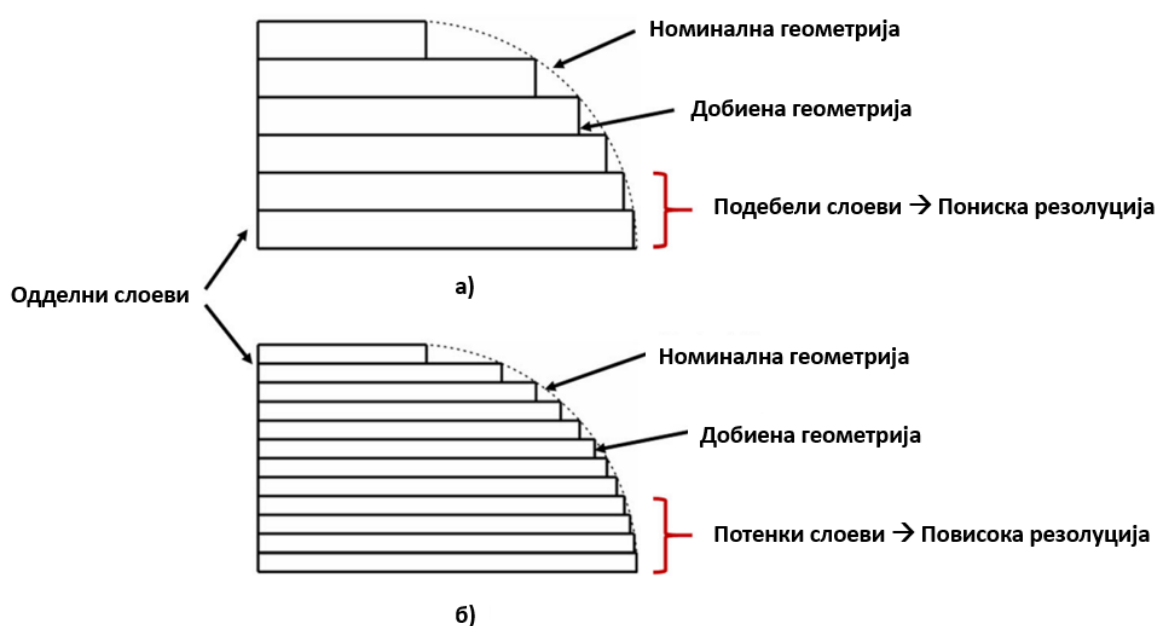
Фазата на постпроцесирање се одвива по отстранувањето на делот од работната подлога на машината. Оваа фаза започнува со чистење на делот за да се отстрани вишокот материјал прикачен на неговите површини. Најчесто следниот чекор е промивање со етил алкохол или изопропил алкохол, со што се отстранува растопениот нестврднат полимерен материјал што е налепен врз површините на готовиот дел. Во процесот на стереолитографија обично полимерот не се стврдува целосно, туку само 65 до 90 %. За да се постигне целосно стврдување на делот, неопходно е тој потоа да биде поставен во уред за постпроцесирање каде што се третира со УВ-светлина и дополнително се стврдува (Слика 3.7). Незавршената полимеризација може да доведе до појава на деформации кај готовиот дел поради релаксација, дифузија и испарување на компонентите кај материјалот со ниска молекуларна тежина, како и собирање кај делот по процесот на пост УВ-стврдување. Често на готовиот дел, зависно од неговата употреба и апликација, дополнително се предвидуваат обработки со пескарење, полирање, премачкување или боење.



Слика 3.8: Блок-дијаграм за стереолитографско адитивно производство (Извор: [56])

3.1.2. Планирање на стереолитографскиот процес

Претходно е презентирана потребата од оптимизација на ориентацијата на површините на делот кој се изработува, скенирањето на внатрешните гранични области со ласерски зрак имплементирајќи стратегија со вкрстено шрафирање (cross-hatching), генерирањето на потпорните структури и процедурата на поделба на геометријата на парчето на хоризонтални слоеви. Сите горенаведени параметри влијаат врз цената на делот и времетраењето на изработката, и поради тоа треба внимателно да се разгледаат, оптимизираат и дефинираат.

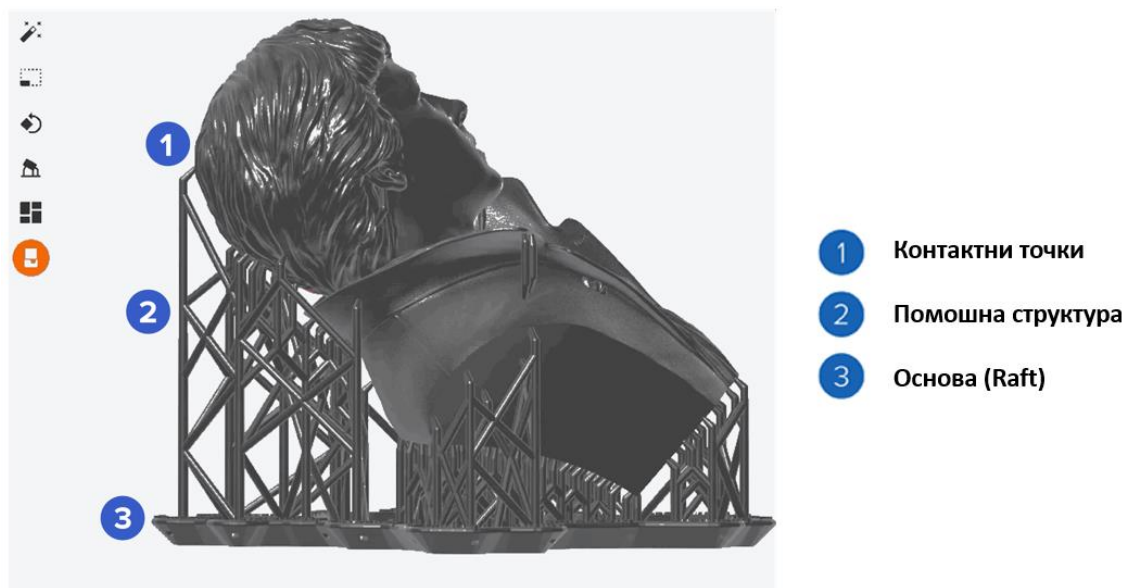


Слика 3.9: Влијание на дебелината на слојот врз точноста на закривени површини – појава на „skalест ефект“ (Извор: [64])

Оптималната ориентација на делот за време на адитивното производство влијае врз голем број променливи, како што се цената на завршниот дел, квалитетот на површината на делот и потребата од потпорни структури. Главно, цената на готовиот производ зависи од висината на делот бидејќи таа го зголемува времето за изработка, така што вообичаена практика е избор на ориентација која ја минимизира висината на делот во правец на z-оската. Друго значајно прашање е минимизирањето на т.н. „skalест ефект“ кој се појавува кај сите адитивни технологии со цел да се подобри квалитетот на површината на делот. Како последица од градењето на делот слој-по-слој, при

изработка на коси површини со одреден агол на закосување, на нивната површина може да се забележи скалест ефект кој доколку е нагласен, драстично го намалува квалитетот на произведениот дел. Еден од начините да се минимизира оваа појава е да се максимизираат областите на целосно вертикални и хоризонтални површини на моделот кои не би предизвикале скалести текстури.

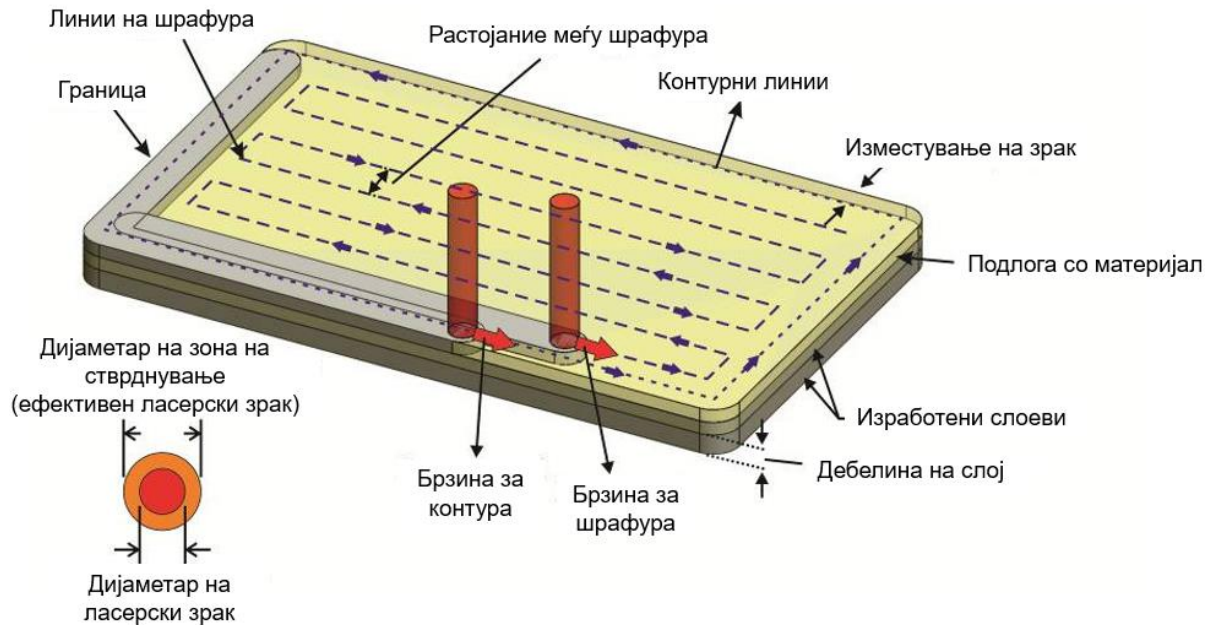
Понатаму, деловите добиени со адитивно производство немаат идеално изотропни механички својства и затоа ориентацијата на градење на конструкцијата треба да биде избрана така што најдобрите механички својства да се постигнат во најкритичната насока на делот. Конечно, ориентацијата на делот ја дефинира неопходната количина на потпорни структури. Целта при производството е да се намали бројот на потребни потпори бидејќи тие претставуваат дополнително потрошен материјал и придонесуваат за зголемување на времето на изработка и цената на делот.



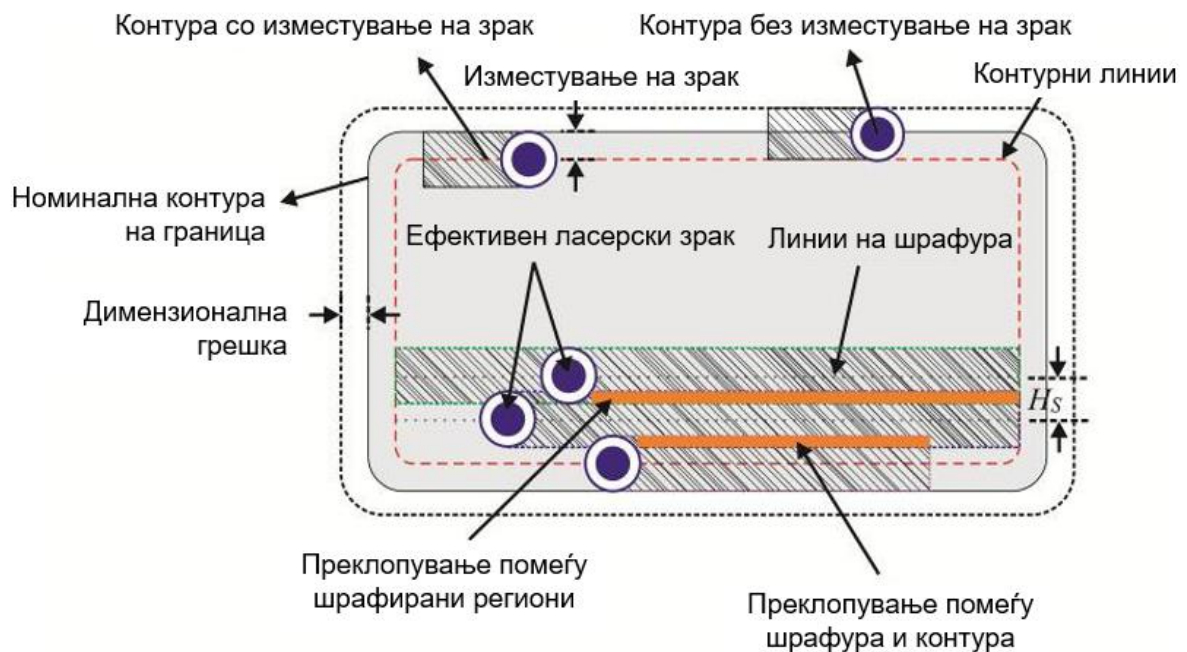
Слика 3.10: Потпорна структура кај стереолитографски модел. Означени се одделните геометриски компоненти што ги дефинираат потпорите (Извор: [65])

Потпорните структури се изработуваат под надвиснатите геометрии на делот со цел да обезбедат потпора и задржување на овие површини за нивна успешна и квалитетна изработка (Слика 3.10). Тие се неопходни за површини свртени надолу со агол на наклон помал од 45° во однос на подлогата. Тие автоматски се дизајнираат и се додаваат со помош на современите CAM софтвери за адитивно производство. Во повеќето случаи тие се дефинираат со основа (raft) под регионот што треба да го

подрржуваат. Бидејќи се соединуваат со делот, треба внимателно да се дизајнираат со цел да се олесни нивното отстранување при постпроцесирањето без оштетување на квалитетот на површината на делот.



а)

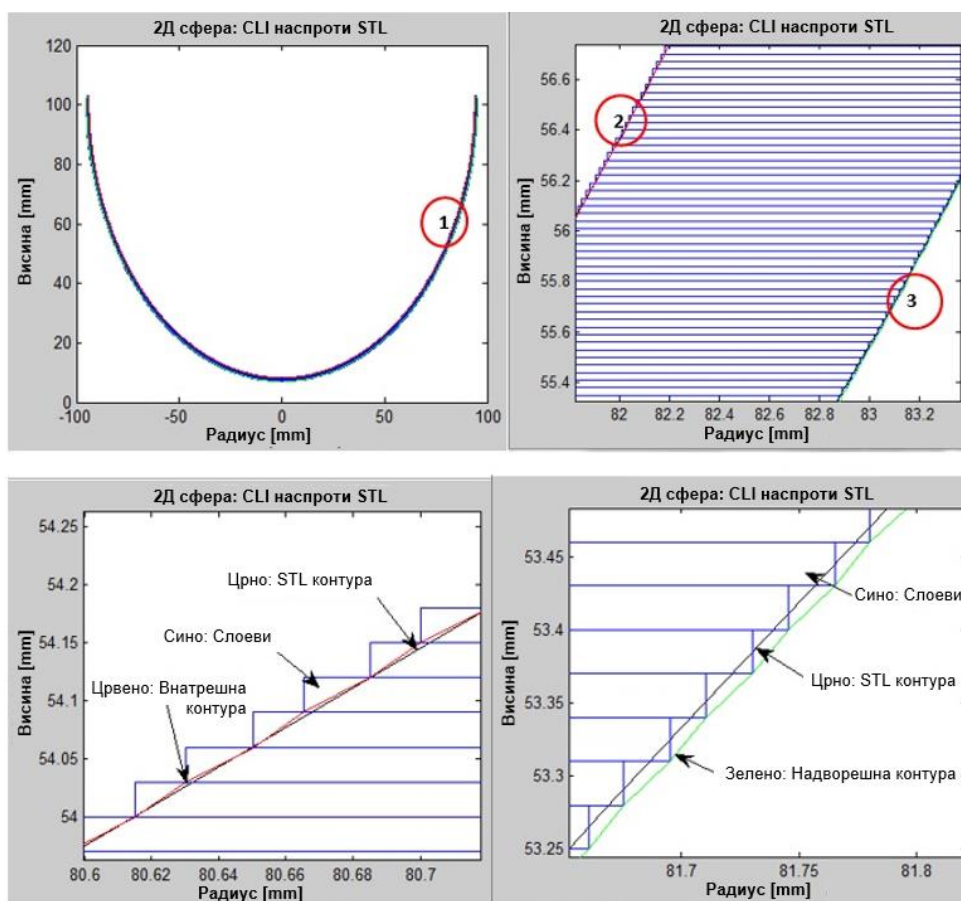


б)

Слика 3.11: Стратегија на скенирање и процесни параметри (Извор: [66])

Водењето на ласерскиот зрак и вредностите на параметрите на процесот се зачувани во документот во CLI (common layer interface) формат. Скенирањето на ласерот

е дефинирано од геометријата на делот, избраната ориентација и потребните потпорни структури. Релевантни параметри во процесот на стереолитографија се стврднувањето на полнењето, стврднувањето на шрафурата, времето за нанесување нов материјал и времето за чекање за смирување на полимерниот материјал. Стврднувањата се параметри на слојот и се дефинираат со времето на изложеност на фотополимерот на изворот на светлина, додека времето за нанесување нов материјал и времето за чекање се параметри кои влијаат врз начинот на нанесување нов слој. Параметрите на слојот го одредуваат начинот на кој секој слој се стврднува во резервоарот, додека параметрите за нанесување нов слој го одредуваат начинот на кој се нанесува нов материјал врз претходно изработениот слој. Сите параметри значително влијаат врз квалитетот на површината, точноста и времето за изработка.

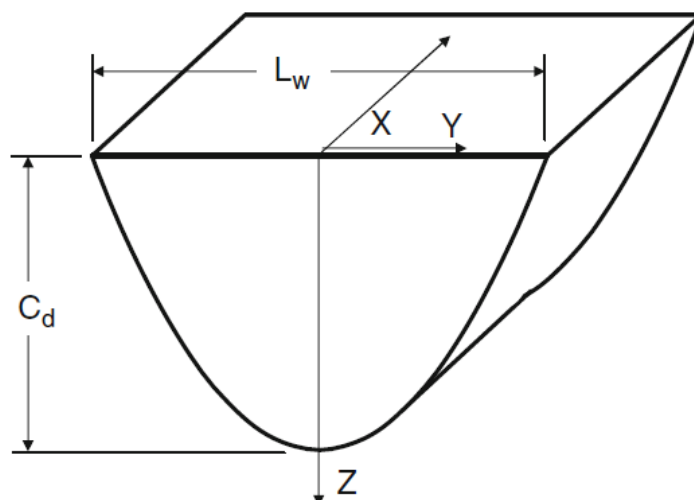


Слика 3.12: Споредба на контурата на моделот од CLI наспроти STL датотеките; а) CLI vs STL за сфера во 2D; б) Зголемен приказ на регионот 1; в) Зголемен приказ на регионот 2; д) Зголемен приказ на регионот 3; (Извор: [67])

За одредување на патеката на движење на ласерскиот зрак со цел стврднување на полимерниот материјал во дефинираната геометрија на слојот, оваа геометрија е поделена на контурна патека и внатрешна шрафура. Контурната патека е скенирање на надворешната обиколка на периметарот на слојот со спојување на голем број линеарни сегменти, додека внатрешната шрафура се користи за создавање на внатрешноста на слојот со зацврстување на многу линиски сегменти распоредени на мало растојание. Овие соседни линиски сегменти ја формираат шемата на шрафирање. При дефинирањето на внатрешната структура, најважна улога има растојанието помеѓу два соседни линиски сегменти. Кај оваа технологија на адитивно производство најчесто се избира 100% исполнување на волуменот што се изработува, при што генерално се дефинира преклопување помеѓу соседните линии во полнењето за да се избегне заробување на незацврстен полимерен материјал во внатрешноста.

3.1.3. Основи на фотополимеризацијата

Како што е претходно објаснето, основниот механизам кај процесот на стереолитографија е фотополимеризацијата на фотосензитивен полимер. Фотополимеризацијата е хемиска трансформација на нестврднат термостабилен полимерен материјал во полимер со мрежеста структура преку верижна реакција иницирана од слободни радикали или јони генерирани со изложување на светлина. За подобрување на апсорпцијата на ултравиолетовата светлина од мономерот, се додаваат фотоиницијатори, кои претставуваат органски молекули со мала молекуларна тежина. Типичен иницијатор е azoisopropone, кој е термички стабилен на широк опсег на температури и лесно се подложува на електролитна дисоцијација под УВ-светлина.



Слика 3.13: Шематски приказ на стврдната линија од фотополимерен материјал што го покажува параболичниот облик, длабочината на стврднување C_d и широчината L_w (Извор: [68])

Реакцијата на стврднување е егзотермен процес на полимеризација каде што потребната енергија за започнување на реакцијата се добива од УВ-ласерскиот зрак. Процесот зависи од карактеристиките на фотополимерот, но и од параметрите на процесот на стереолитографија, како што се моќноста на ласерот и брзината на скенирање. Фотосензитивноста на полимерниот материјал во текот на процесот се определува преку нејзината реактивност. Реактивноста е најважниот параметар на полимерниот материјал, а се карактеризира со два главни параметри: длабочината на пенетрација на полимерот (D_p) и критичната изложеност на полимерот на ласерската бранова должина (E_c). Вредноста на критичната изложеност E_c е ласерската енергија под која полимеризацијата не може да се изврши. Еден фотополимерен материјал е посоодветен за примена во стереолитографија кога покажува ниски вредности на E_c . Schaeffer [69] теоретски ја проценува длабочината на стврднување (C_d) врз основа на законот за апсорпција на Beer–Lambert:

$$C_d = D_p \cdot \ln\left(\frac{E}{E_c}\right) \quad \dots (1)$$

каде што E е изложеноста на површината на полимерниот материјал и нејзината вредност е функција од ласерската моќност и времетраењето на изложувањето [59]. Така, длабочината на стврднување може да се контролира со менување на ласерската

моќност што се применува на површината на растопениот полимерен материјал. Енергијата на изложеност може да се процени од следнава равенка:

$$E = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{P}{w_0 \cdot v_s} \quad \dots (2)$$

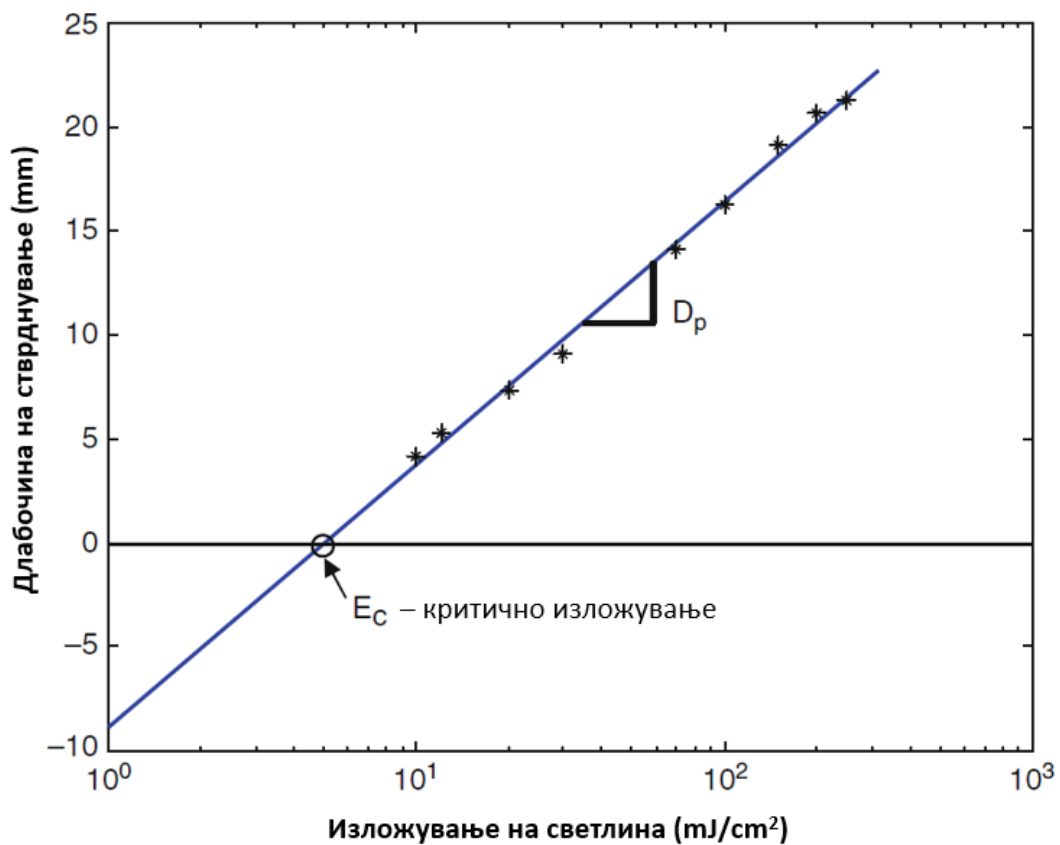
каде што P е ласерската моќност донесена на површината на полимерниот материјал, w_0 е радиусот на зракот и v_s е брзината на скенирање. Потребната моќност на ласерите за да се започне процесот на фотополимеризација е прилично мала и обично се движи помеѓу 10 mW и 1 W.

Друг важен фактор е широчината на стврднатиот материјал (L_w). Резолуцијата на процесот, димензионалната точност и брзината на стврднување на слојот зависат од широчината на полимеризираната линија што настанува при еден премин на ласерот.

Резолуцијата и димензионалната точност се дефинираат од центарот на снопот на ласерскиот зрак и потоа се додава фактор на компензација чија вредност зависи од широчината на стврдната должина. Од друга страна, квалитетот со кој ќе резултира градењето на слојот зависи и од дефинираната стратегија на вкрстено шрафирање во внатрешноста на границите на геометријата на слојот, односно зависи од растојанието помеѓу два паралелни вектори на шрафирање. За успешно стврднување на полимерниот материјал и за избегнување на недоволно стврднатиот полимер во слојот, растојанието помеѓу векторите треба да се дефинира зависно од максималната широчина на стврднатиот материјал. Широчината на полимеризираната линија (т.е. широчината на стврднатиот полимер) може да се пресмета со равенката:

$$L_w = B \cdot \sqrt{\frac{C_d}{2 \cdot D_p}} \quad \dots (3)$$

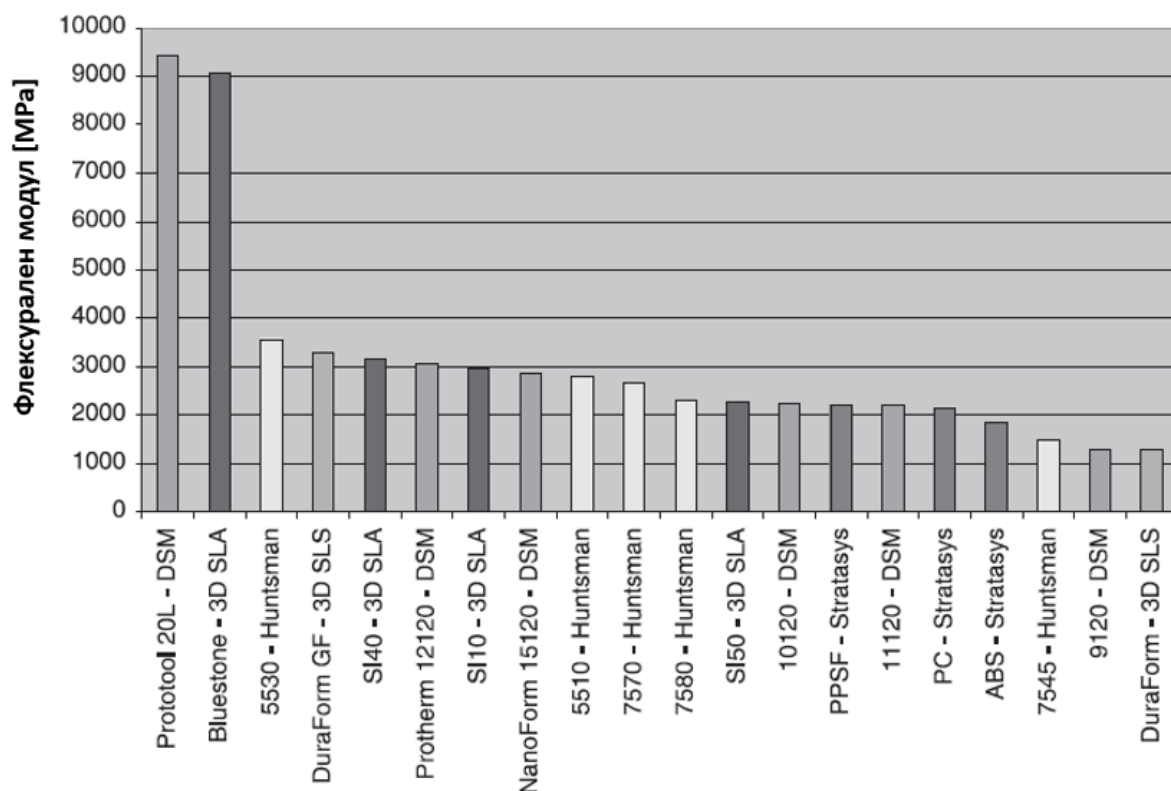
каде што B е големина на ласерскиот сноп.



Слика 3.14: Работна крива за фотополимерите што дава зависност помеѓу длабочината на стврднување S_d и изложувањето на светлина E (Извор: [68])

3.1.4. Комерцијално достапни стереолитографски фотополимери

Меѓу процесите за адитивно производство, процесот на стереолитографија се одликува со најголем број достапни материјали. Досега се развиени повеќе од 40 различни формулации на полимерни материјали применливи во процесот на стереолитографија. Најпрвите фотополимерни материјали развиени за оваа технологија се одликувале со голема јакост, но биле прилично крти и кршливи. Денес постојат голем број фотополимери кои успешно ги задоволуваат потребите на одредени сегменти од пазарот кои бараат материјали со специфични механички или материјални својства и кои се способни да имитираат материјали кои најчесто се користат во конвенционалните процеси за масовно производство, како што е процесот на инјекционо вбризгување. Постојат флексибилни материјали, специјални полимери за употреба во медицината, полимерни материјали чии својства наликуваат на механичките својства на обичната термопластика, нанокмпозитни фотополимери и фотополимери со керамички и други полнила што им ги подобруваат нивните карактеристики.



Слика 3.15: Флексурален модул на различни материјали за SLA адитивно производство (Извор: [70])

Во 2004 година Mueller [71] направил преглед на комерцијално достапни фотополимерни материјали од аспект на нивните механички својства, како што се флексурален модул, издолжување до кршење, температура на извиткување под оптеретување и отпорност на удар. Како пример, на Слика 3.15 се визуализирани флексурачните модули на различни материјали применливи за брзи прототипи. Сепак, од ова истражување до денес се развиени голем број нови полимерни материјали кои станаа комерцијално достапни. Во понатамошниот дел од ова поглавје разгледуваните полимерни материјали ќе бидат дефинирани со нивните комерцијални имиња за нивно поедноставно дефинирање. Деталниот состав на мешавините на фотополимерите е даден во табелите во Прилог А.

3D Systems [72] е еден од производителите на фотополимери што во моментот нуди две главни фамилии на материјали: Accura SLA [73] и RenShape SL [74, 75, 76, 77]. Во процесот на стереолитографија најчесто се користат материјалите Accura SLA, при што 3D Systems нудат тринаесет класи на фотополимерни материјали од оваа група. Механичките својства што се постигнуваат варираат во јакоста од меки до тврди, а според бојата можат да бидат транспарентни и обоени. Овие фотополимери, исто така, можат да имитираат разновидни инженерски полимерни материјали, како на пример, Accura 25 [78] има слични карактеристики со полипропилен, Accura 55 [79] со ABS, а Accura 60 [80] со поликарбонат. Дополнително, постојат различни класи на Accura фотополимери за примена во различни апликации, како што се Accura ClearVue [81], која се одликува со висока јасност и транспарентност, Accura Cast Pro Resin [82], која се користи за изработка на калапи за лиење, и Accura amethyst/sapphire [83, 84], кои се користат во индустријата за накит. Материјалите RenShape SL се користат кога се бара прецизна контрола на механичките својства на стврднатиот дел. Тие се способни да произведуваат издржливи, цврсти модели и прототипи со извонредна прецизност, сложена репродукција на детали и висококвалитетна завршна површина. Фотополимерите RenShape се користат за изработка на пластични делови што треба да се спојуваат, прототипи со особини слични на полипропилен и ABS, и медицински модели во избрана боја.

Табела 3.1: Избор на стереолитографски фотополимери од DSM Somos (Извор: [85])

Апликација	Сите материјали се стврдуваат со He-Cd ласер од 325 nm	
Функционални делови	слични на PE	Somos 8110, Somos 8120
Слични на термопластики по карактеристики, трајни и флексибилни	слични на PP	Somos 9110, Somos 9210, Somos 9420
	слични на ABS	WaterShed XC 11122, Somos 14120, DMX-SL 100, Somos NeXt, ProtoGen 18120/1842/18920
	применливост на високи температури	ProtoTherm 12110, ProtoGen 18120/18420*/18920, NanoTool, ProtoTherm 12120, NanoForm 15120
За изработка на позитиви		WaterShed XC 11122, WaterClear Ultra 10122, Somos 14120, ProtoGen 18120/18420/18920, NanoTool, ProtoTherm 12120, NanoForm 15120, Somos NeXt
Високопрецизни модели со голема трајност		
Транспарентни делови		WaterClear Ultra 10122, WaterShed XC 11122
Автомобилски делови, цевки за осветлување		
Мастер модели за калапи за лиење		WaterShed XC 11122*, ProtoCast AF 19122
Висока прецизност, без антимоно		
Модели за воздушни тунели		ProtoTherm 12110, WaterShed XC 11122*, NanoTool, ProtoTherm 12120, NanoForm 15120
Висока крутост и јакост		
Медицинска индустрија		ProtoTherm 12110*, WaterShed XC 11112*, NanoTool, NanoForm 15120, ProtoGen 18120/18420*/18920, ProtoTherm 12120, WaterShed XC 11122*
Висока резолуција и прецизност, димензионална стабилност		
Алати за инјекционо вбригување		NanoTool, NanoForm 15120
Брза изработка на алати (rapid tooling)		

DSM, исто така, биле активни во развојот на стереолитографски фотополимери кои се познати под трговското име DSM Somos. Одделот за развој на вакви материјали е купен од Stratasys [86] кон крајот на 2022 година. Тие можат да реплицираат голем број различни материјали и можат да се приспособат на потребите на специфична индустрија. Постојат повеќе од 15 различни вида материјали. На Табела 3.1 е претставен водич за избор на материјали на DSM Somos и слични водичи за избор се обезбедени од сите компании што нудат стереолитографски фотополимери.

Преглед на достапни фотополимери компатибилни со процесот на инјекционо вбригување

Полимерните композити од производителите DSM Somos и 3D Systems се едни од првите материјали што нудат зголемени механички карактеристики кај овие делови. Овие материјали имаат матрица од термосет, т.е. термореактивен полимер и керамички материјал како полнило за зајакнување. Матриците се најчесто од акриламидни или епоксидни полимери. Полнилото ја зголемува крутоста на материјалот, неговата јакост и температурната издржливост. Керамиките за зајакнување најчесто се силикати со наночестички кои имаат димензии од 10 до 999 nm. Некои од комерцијално достапните композитни фотополимери за оваа намена се NanoTool [87] и NanoForm [88] од DSM Somos [85] и Accura Bluestone [89] од 3D Systems. Дополнително се разгледани и материјалите High Temp [11] и Rigid10k [12] од компанијата FormLabs [90] како фотополимер за стереолитографско 3Д-печатење кој има исклучително висока температурна издржливост.

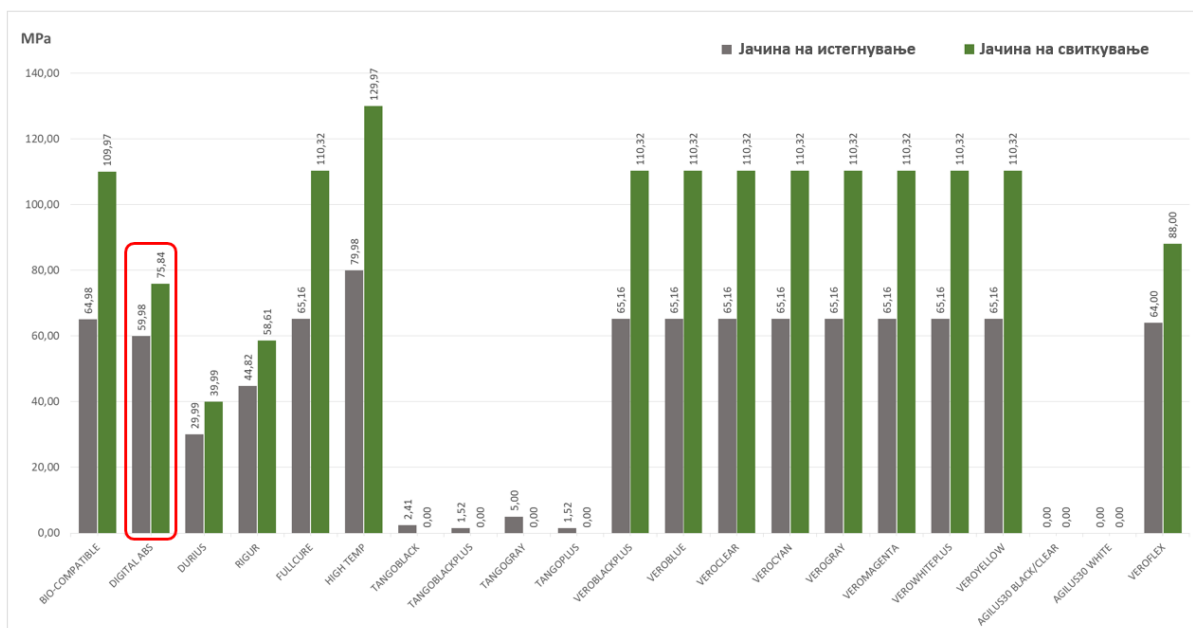
Табела 3.2: Карактеристики на стереолитографските фотополимери [Извор: [11, 12, 85, 87, 88]]

<i>Карактеристика</i>	<i>Accura Bluestone</i>	<i>ProtoTool</i>	<i>NanoForm</i>	<i>Formlabs HighTemp v2</i>	<i>Formlabs Rigid10k</i>
Јачина на истегнување	67 MPa	75 MPa	53	51 MPa	65 MPa
Модул на еластичност	9653 MPa	10350 MPa	5900 MPa	2900 MPa	10000 GPa
Јакост на свиткување	138 MPa	120 MPa	130 MPa	93,8 MPa	103 MPa
Модул на свиткување	8963 MPa	9376 MPa	4447 MPa	2620 MPa	10000 GPa
Јакост на компресија	-	152 MPa	234 MPa	-	-
Модул на компресија	-	10135 MPa	4675 MPa	-	-
Температура на стаклена транзиција T_g	71 – 83 °C	49 °C	80 °C	-	-
HDT @ 0,45 MPa	267 – 284 °C	257 – 259 °C	269 °C	238 °C	218 °C
HDT @ 1,8 MPa	-	83 – 94 °C	116 °C	101 °C	110 °C

Карактеристиките на овие материјали се дадени во Табела 3.2, каде што се гледа дека имаат слична јакост, меѓутоа, се разликуваат во однос на преодната температура на стаклосување, модулот на еластичност и по температура на извиткување под оптеретување (Heat Deflection Temperature – HDT).

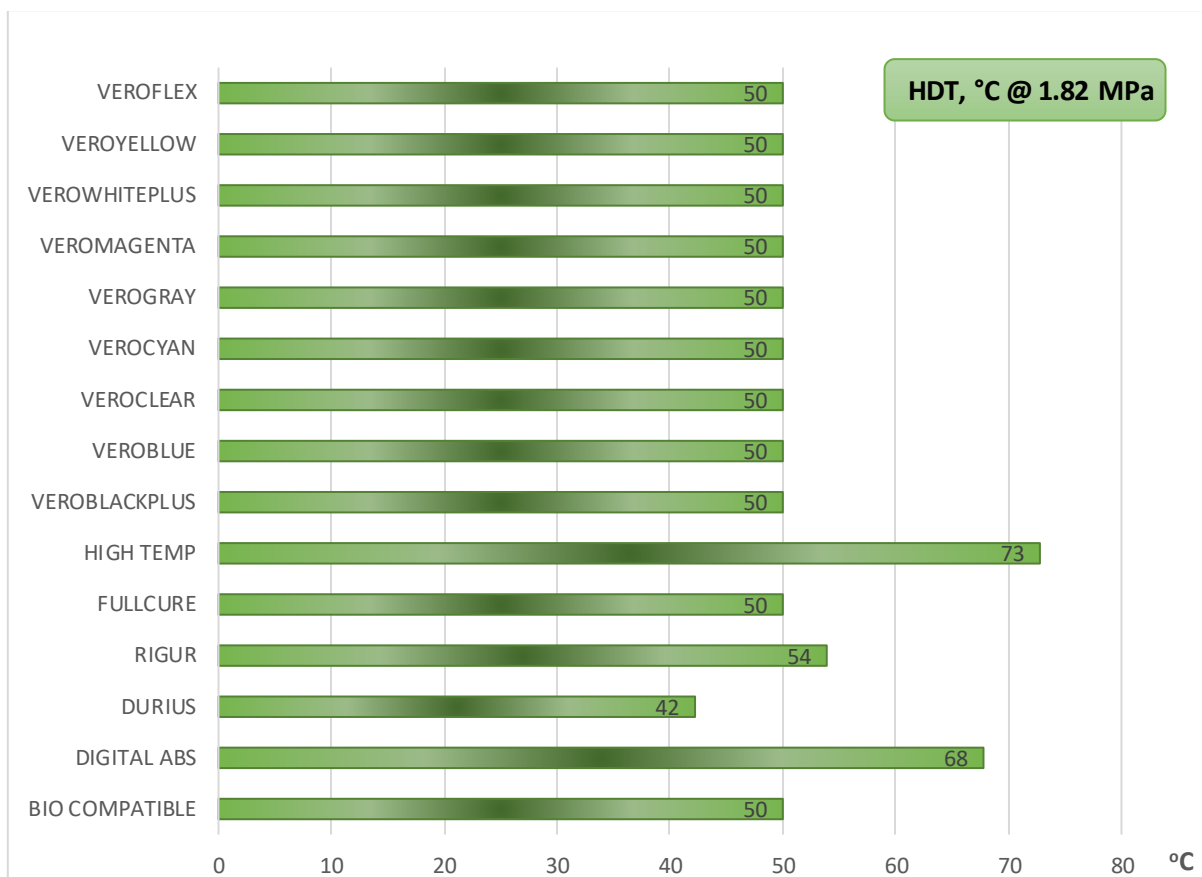
PolyJet 3Д-печатењето е процес на адитивно производство кој е развиен од страна на компанијата Objet Geometries, Ltd од Израел. Оваа технологија, исто така, се базира

на стереолитографски принцип на работа, меѓутоа, постојат некои суштински разлики во начинот на градењето на моделите.



Слика 3.16: Механички карактеристики на Polyjet материјалите на Stratasys (Извор: [91, 92, 93, 94, 95])

Во овој процес, слоеви од акриламиден фотополимер селективно се вбризгаат врз подлога и веднаш се стврдуваат со УВ-ламби прикачени за главата за печатење. Суштинската предност на овој стереолитографски процес е што може симултано да се вбризгаат повеќе различни материјали со различни механички карактеристики. На пример, со симултано вбризгање на материјалот "TangoBlack" (еластомер) [96] и материјалот "VeroWhite" (крут полимерен материјал) [97] може да се добие модел со функционално различни карактеристики. Достапните материјали за оваа технологија и нивните механички карактеристики се дадени на Слика 3.16 и Слика 3.17. Означениот материјал Digital ABS [98] е препорачаниот материјал за примена за изработка на полимерни гравури. Машините за примена на оваа технологија се развиваат од компанијата Stratasys Ltd, Minneapolis, MN, USA и се делат во две класи, Eden и Connex, во однос на нивната функционалност.

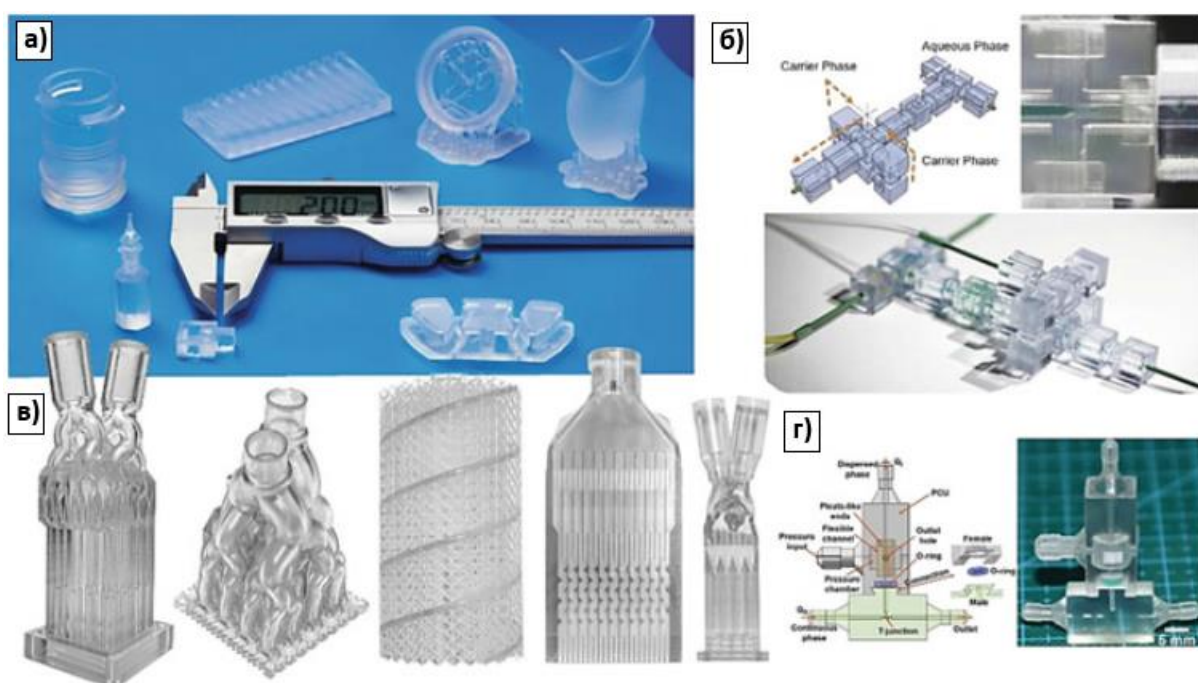


Слика 3.17: Температура на извиткување под оптеретување (HDT) за Polyjet материјалите на Stratasys (Извор: [91, 92, 93, 94, 95])

Од приложените графикони се гледа дека во однос на механичките и термичките карактеристики, High Temp (Stratasys) материјалот има најповолни карактеристики кога станува збор за изработка на гравури за инјекционо вбризгување. Меѓутоа, овој материјал е доста крт и има многу мало издолжување пред појавата на лом, па затоа во сите студии на случај организирани од компанијата Stratasys се користи материјалот Digital ABS, кој може да поднесе поголеми деформации.

3.2. Rapid tooling (RT)

Во изминатите десетина години, паралелно со напредокот на адитивното производство се зголемува и примената на овие технологии во брзиот развој на алати (RT). При развојот на нов производ, тргнувајќи од концептуалната идеја, па сè до комерцијалната примена, најчесто е потребно да се изработи прототип за тестирање и валидација. За дефинирање на функционалноста на производот во раните фази, од голема помош е доколку прототипот е изработен од истиот материјал кој е предвиден за крајниот производ. Прототипите, без разлика дали се концептуални или функционални, им помагаат на конструкторите да тестираат и алтернативни дизајни кои би ја подобриле функцијата на крајниот дел (Слика 3.18).

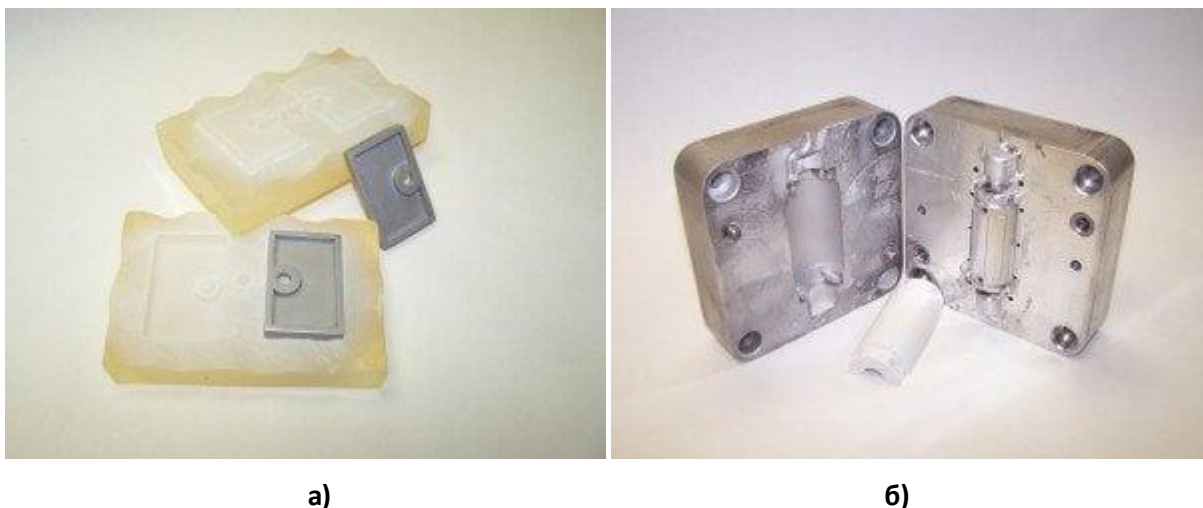


Слика 3.18: Прототипи изработени со адитивни технологии за фотополимеризација. а) Различни компоненти од производи од полимерни материјали; б) модуларен микрофлуиден систем; в) уреди за мешање и сепарација на флуиди; г) пневматски уред за нанесување капки од органска емулзија (Извор: [99, 100, 101, 102])

За да се стигне до пилот производни серии, деловите мора да бидат димензионално прецизни и многу слични на крајните делови за производство. Со цел да се добијат што е можно послични карактеристики меѓу прототипот и крајниот производ, особено е корисно прототипот да биде изработен со истиот производен процес предвиден за готовиот дел. Од сите производни технологии предвидени за

преработка на полимерни материјали, инјекционото вбризгување е најкористено и со оваа технологија се произведуваат над 80% од сите пластични производи. Според [103], во 1997 година само во Северна Америка имало над 92 000 оперативни преси. Растот во оваа индустрија е задржан низ годините и според последните проекции, пазарот за машини за инјекционо вбризгување ќе достигне вредност од 22 милијарди долари до 2030 година [104], [105]. Изработката на алатот за овој процес е еден од најскапите чекори за започнување со производство и затоа индустријата за изработка на алати за прототипирање во САД е гранка од над 300 милиони долари годишно [106].

Раните RT технологии се базирани на адаптирање на полимерни материјали, но во последните години употребата на метали при постапките за брза изработка на алати е сè почеста. Ова се должи на тоа што во последниот период се развиени повеќе системи кои работат брз база на метални прашоци (челик, титаниум, кобалт, алуминиум) како појдовен материјал за технологијата.



Слика 3.19: Различни типови алати за прототипирање. а) „меки“ алати од силиконска гума; б) конвенционален алуминиумски алат за прототипирање (Извор: [107])

RT методите имаат одредени ограничувања од аспект на достапните материјали, прецизноста, површинскиот квалитет и животниот век. Од тој аспект, тие може да се класифицираат како „меки“ и „тврди“, при што меките алати се користат за инјекционо вбризгување на полимерни материјали и може да издржат меѓу 100 и 1.000 работни циклуси. Ваквите алати може да се користат за единечно или малосериско производство сè додека не дојде до нивно кршење. Пример за вакви алати за прототипирање се алатите изработени од силиконска гума, епоксидни смоли, легури со ниска точка на

топење или песок за лиење. „Тврдите“ алати, од друга страна, се главна тема на истражување бидејќи кога е можно да се изработат со технологии за АП за релативно кратко време, може да се добијат многу комплексни геометрии што се користат како гравури во алати за сериско производство. Некои од методите за изработка на вакви алати се RapidTool, DMLS, ProMetal, 3D Keltool и Ecotool [106].

Краткото време за производство може значително да ги намали цената и времето за пласирање на пазарот. Покрај производните инженери, и дизајнерите често имаат потреба од прототип изработен од крајниот материјал што ќе се користи во финалното производство. Ова барање може да биде задолжително, во зависност од политиката на компанијата, за производните инженери да можат да бидат сигурни во дизајнот и избраниот материјал.



Слика 3.20: Делови добиени со вакуумско леење од силиконски алат добиен со индиректна изработка (Извор: [108])

Развојот на гравури со употреба на процеси на АП може да ги намали трошоците за развој и време на изработка за 50 до 70% [109]. Ваквите процеси за изработка на гравури и алати може да се класифицираат како процеси за директна изработка на алати (direct rapid tooling) кај кои потребната геометрија се добива директно преку системот за адитивно производство, и на процеси за индиректна изработка на алати (indirect rapid tooling), каде што со адитивно производство се изработува т.н. master од кој понатаму

со дополнителни процеси се добиваат гравурите. Оттука е многу јасно дека при процесите со кои е можна директна изработка на алатот можни се значителни заштеди во време. Ако го земеме инјекционото вбризгување како пример, кај алатите потребни за оваа технологија можно е да се изработат главните гравури заедно со вливниот систем, сите канали за ладење и отвори за исфрлање и вентилација. Во случајот на индиректна изработка единствено „master“ геометријата се добива со адитивно производство, додека крајната геометрија се добива со дополнителни техники (на пр., вакуумско леење со силикон [110]). Овие индиректни методи имаат ограничувања од аспект на време, прецизност и цена поради потребата од повеќе производни технологии. Оттука следува дека тие се наменети речиси исклучиво за прототипирање или изработка на алати за претпроизводство.

Од таа причина, кај овие алати постојат и некои конструктивни разлики во однос на стандардните, како поголеми агли на закосување, пониски термички и механички карактеристики и обично се применуваат за добивање поедноставни форми. Бидејќи целта на овие алати е да послужат за добивање помал број делови, подолгото време за изработка и подолгите работни циклуси предвидени за компензација на положбата термичка спроводливост се прифатливи [111].

Главниот акцент кај развојот на прототип-алати за инјекционо вбризгување лежи кај директните методи кај кои обликот и димензиите на гравурата се најблиски до крајниот производ [10]. Кај директните RT техники пристапот е директно да се искористи модел добиен со АП како алат за изработка на крајниот производ со соодветниот материјал [112]. Оттука, за да се надминат недостатоците на индиректните методи, различните технологии на АП овозможуваат различни техники за изработка на гравури за инјекционо вбризгување и леење директно од 3D CAD модели.



Слика 3.21: Хибриден вметок со конформални канали добиен со SLS (Извор: [113])

Процесот на селективно ласерско синтерување (SLS), развиен од компанијата EOS, користи компјутерски контролиран зрак за селективно синтерување на метален прах за добивање метален алат директно од CAD податоците. За оваа намена се користи специјална мешавина од метални легури, за која не е потребен дополнителен материјал за загревање или врзивно средство. Поради занемарливата неточност, оваа технологија е соодветна за примена при изработка на алати и алатни сегменти. Притоа, доколку е потребна повисока густина и јачина, можна е инфилтрација на деловите за подобрување на механичките карактеристики.

3.3. Дизајн на експеримент (DoE)

Дизајн на експеримент (Design Of Experiment - DOE) е систематски и структуриран пристап за планирање и изведба на експерименти за да се истражат и анализираат влијанијата на различни влезни фактори врз резултатите на истражувањето. Долго време редоследот на извршување на експериментите се одвивал врз основа на личното искуство и интуицијата на истражувачот. Првите обиди да се применат математички методи за оптимално планирање на експериментите биле направени од страна на англискиот математичар Р. Фишер во почетокот на XX век. Теоријата за планирање на експериментите особено брзо почнала да се развива по 1951 година, а е поврзана со работата на Г. Бокс и К. Вилсон [114]. Најчесто, експерименти се спроведуваат заради две цели:

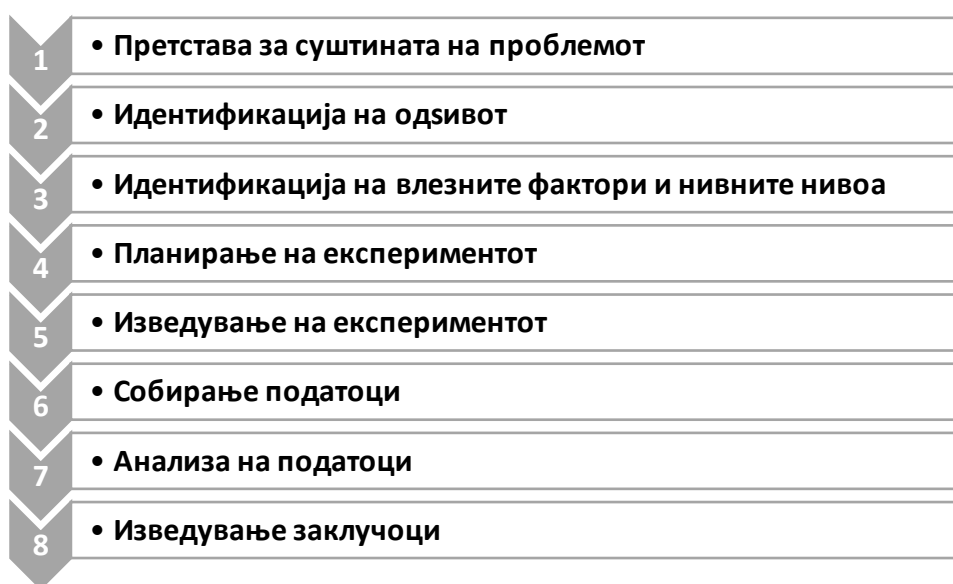
1. Изучување на механизмите и својствата на сложените процеси и
2. Оптимизирање на технолошките процеси и идентификување на најважните фактори што влијаат врз крајниот резултат.

Спроведувањето дизајн на експеримент (Слика 3.22) се одвива во следните последователни фази:

- **Идентификација на одзивот:** Одзивот е излезната променлива која ќе се анализира како резултат од експериментот. Оваа променлива треба да биде добро дефинирана и мерлива за да може да се анализира влијанието на влезните фактори врз неа.
- **Идентификација на влезните фактори и нивните нивоа:** Потребно е да се идентификуваат сите фактори што може да влијаат врз истражувачкиот процес, и да се одберат нивоата на кои тие контролирано ќе се менуваат во текот на експериментот. Влезните фактори можат да бидат нумерички или дискретни, каде што нумеричките можат да имаат која било вредност во даден интервал, а дискретните можат да имаат само одредена вредност или класа.
- **Планирање на експериментот:** Во овој чекор се одлучува за планот на експериментот. Во оваа дисертација се применува сефакторниот експериментален план на Фишер, при што се истражуваат сите можни комбинации на факторите. Овој вид дизајн овозможува анализа на влијанието на

секој од факторите врз одзивот, како и влијанието на нивните меѓусебни интеракции.

- **Изведба на експериментот:** Се изведуваат серии на експерименти со варирање на нивоата на факторите според експерименталниот план.
- **Собирање на податоци:** Се собираат релевантни податоци за резултатите од секој експеримент.
- **Анализа на податоците:** Се користат статистички методи за анализа на податоците за да се дознаат влијанијата на факторите врз резултатите и за спроведување регресиона анализа.
- **Изведување заклучоци:** Врз основа на анализата на податоците се изведуваат заклучоци и се предлагаат препораки за подобрување на процесот.



Слика 3.22: Фази на спроведување дизајн на експеримент (Извор: Сопствено истражување)

При креирање на експерименталниот план и изведба на експериментот, неопходна е рандомизација на тестовите, што вклучува случајно распределување на испитувачките услови за да се осигури независна распределба на грешките и дека потенцијалните фактори што би можеле да влијаат врз резултатите не се поврзани со конкретните услови или редоследот на експериментирање. Исто така, репликацијата, односно изведувањето повеќе експерименти при истите услови е важен дел од

експериментот и има цел статистички да го потврди резултатот и да ги одреди границите на варијабилност на резултатите.

3.3.1. Фишеров сефакторен експериментален план со повеќе нивоа

Во областа на дизајн на експеримент, Фишеровиот сефакторен експериментален план со повеќе нивоа е методологија која овозможува систематско и детално истражување на влијанието на повеќе фактори, при што секој фактор може да има повеќе нивоа. Оваа методологија се користи за да се анализира влијанието на секој од факторите и интеракциите меѓу нив, како и за да се пронајдат оптимални комбинации на нивоа на факторите.

Најчести сефакторни експерименти применувани во истражувањата се дизајните 2^k и 3^k . Кај дизајнот 2^k се истражуваат k -број на фактори, каде што секој од факторите има две нивоа. За визуализација на експерименталните проби, експерименталната матрица на дизајнот 2^2 е прикажана на Табела 3.3, каде што факторите кои се истражуваат се означени со А и Б, а нивните нивоа со 0 и 1. Секој ред во матрицата претставува уникатна комбинација на нивоата на факторите кои се истражувани во експериментот, резултирајќи со вкупен број на опити еднаков на 4, при што нема репликации.

Табела 3.3: Експериментална матрица за сефакторен дизајн 2^2 (Извор: Сопствено истражување)

Проба	Ниво на фактор А	Ниво на фактор Б
1	0	0
2	0	1
3	1	0
4	1	1

Експерименталниот дизајн 3^k означува дека k -број на фактори се изменуваат на три нивоа. За визуализација на експерименталните проби, експерименталната матрица на дизајнот 3^2 е прикажана на Табела 3.4, каде што факторите кои се истражуваат се означени со А и Б, а нивните нивоа со -1, 0 и 1. Доколку не се земат предвид репликации, тогаш вкупниот број на опити кај дизајнот 3^2 е еднаков на 9.

Табела 3.4: Експериментална матрица за сефакторен дизајн 3^2 (Извор: Сопствено истражување)

Проба	Ниво на фактор А	Ниво на фактор Б
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
6	0	1
7	1	-1
8	1	0
9	1	1

Кога во експериментот се вклучени дискретни (категорични) фактори, тогаш нивоата на кои тие фактори се изменуваат зависат од класите кои факторите можат да ги имаат. Затоа неретко при имплементација на дискретни фактори во планот на експеримент овие фактори можат да имаат различен број на нивоа согласно категориите кои им припаѓаат за да може да се испита целокупната комплексност на дискретните променливи. Кога дел од влезните фактори се менуваат на две нивоа, а дел на три нивоа, се користи сефакторен експериментален план на повеќе нивоа. Овој план се означува со $2^n \cdot 3^m$, каде што n е бројот на фактори кои имаат две нивоа, а m е бројот на фактори кои имаат три нивоа. Така, доколку $n = 2$ и $m = 2$, тогаш вкупниот број на опити без репликации ќе биде 36. Во оваа дисертација за истражувачката работа се користи Фишеровиот сефакторен експериментален план на повеќе нивоа, како што е дефинирано во следните поглавја.

3.3.2. Проверка на статистичко значење на фактори врз одзив и регресиона анализа

За да се провери влијанието кое секој од влезните фактори го има врз одзивот, односно на излезната променлива, се користат P и F вредностите од анализата на варијанса ANOVA (Analysis of Variance). ANOVA претставува техника со која се врши споредување на средните вредности од три или повеќе примероци [115]. ANOVA врши

проверка на нултата хипотеза дека две или повеќе групи се извлечени од популации со исти средни вредности. Од ANOVA тестот произлегуваат F-вредноста и P-вредноста, кои се статистички мерки што се користат за да се процени влијанието на независните фактори врз зависната излезна променлива.

F - вредноста го пресметува односот помеѓу средната варијација меѓу групите и средната варијација во групите. Ако разликата помеѓу средните варијации помеѓу групите е значително поголема од средната варијација во групите, тогаш F-вредноста е голема и покажува дека има статистички значителни разлики помеѓу групите.

P - вредноста покажува колку е висока веројатноста да се добие резултат сличен или поинаков од тој што се добива кога нултата хипотеза е точна. Доколку P-вредноста е под нивото на значајност еднакво на 0,05, тогаш тоа означува дека нултата хипотеза може да се одбие и дека факторите имаат статистички значајно влијание врз зависната променлива. Доколку P-вредноста е над нивото на значајност еднакво на 0,05, тогаш нултата хипотеза останува валидна, односно означува дека резултатите што се добиваат би можеле да се случат случајно и нема статистички значителни разлики или ефект.

Анализата на F-вредноста и P-вредноста во ANOVA овозможува одлучување дали постојат статистички значителни разлики меѓу групите или факторите и колку е големо тоа влијание. Доколку во ANOVA анализата F-вредност е висока, а P-вредност е ниска, тоа би означувало дека независните променливи имаат статистички значително влијание врз зависната променлива. Во спротивен случај, ако F-вредноста е ниска и P-вредноста е висока, тоа би означувало дека нема статистички значителни разлики меѓу групите и факторите не влијаат врз зависната променлива.

Откако ќе се анализираат и ќе се најдат факторите кои значително влијаат врз одзивот, може да се изврши регресиона анализа и да се најде регресионен модел кој во математичка форма ќе ја објасни зависноста на одзивот (зависната променлива) од вредноста на факторите (независните променливи) во испитуваниот опсег, со одредена точност. Една од основните форми на регресија е линеарната регресија, која претставува линеарна релација помеѓу зависната (Y) и една или повеќе независни (X) променливи. Овој модел може да се опише со следната равенка:

$$Y(X) = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Каде што:

- Y е зависната променлива (резултатот што се моделира);
- X е независната променлива (променливата која влијае врз Y),
- β_0 е слободниот член, што е предвидена вредност на Y кога $X = 0$,
- β_1 е коефициентот на X , што покажува колку се менува Y за единица измена во X ,
- ε е грешката, која претставува случајниот шум во податоците кој не може да се објасни со X .

Целта на регресијата е да се најдат најоптималните вредности на коефициентите β_0 и β_1 со цел да се моделира линеарна релација помеѓу X и Y која најточно ќе ја објасни зависноста помеѓу нив.

Доколку зависноста помеѓу зависната и независните променливи е од втор ред, се користи полиномен регресионен модел каде што освен линеарната врска помеѓу X и Y , се додава и квадратен член од независната променлива (X^2). Моделот може да се опише со следната равенка:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 \cdot X^2 + \varepsilon$$

каде што β_0 , β_1 и β_2 се коефициентите на моделот кои треба да бидат определени за да се најде полиномниот модел кој најточно ја опишува зависноста помеѓу X и Y .

За да се процени точноста на регресиониот модел при наоѓање на математичката зависност помеѓу влезните независни променливи и излезната зависна променлива, во оваа дисертација се користат неколку значајни статистички параметри. Во продолжение, на

Табела 3.5 е даден пример со проверка на точност на модел преку статистички параметри, како и нивното објаснување.

Табела 3.5: Статистички параметри за проверка на точност на модел (Извор: Сопствено истражување)

S	R²	R² (adj)	R² (pred)
2.54021	96.66%	96.44%	96.09%

S е вредноста на стандардната грешка на остатокот и ја мери стандардната грешка помеѓу реалните вредности на зависната променлива и предвидените вредности од регресиониот модел. Поголемата вредност на **S** покажува поголема разлика помеѓу реалните и предвидените вредности, што може да укаже на неповолен модел.

R² е коефициент на детерминација кој дава мерка колку добро регресиониот модел се приспособува на податоците, односно колкав дел од варијацијата во зависната променлива (**Y**) може да биде објаснет со регресиониот модел.

R² (adj) е коефициентот на коригирана детерминација кој, слично како и **R²**, мери колкав дел од варијацијата во зависната променлива (**Y**) може да биде објаснет од регресиониот модел, но дополнително внесува корекции за бројот на фактори (независни променливи) вклучени во моделот.

R² (pred) е коефициент на предвидување, кој се фокусира исклучиво на предвидувањето на реалните вредности на зависната променлива од регресиониот модел. **R² (pred)** не претставува мерка за објаснување на варијацијата, туку мерка за колку точно моделот ги предвидува реалните вредности.

Вредноста на **R²**, **R² (adj)** и **R² (pred)** се движи помеѓу 0% и 100%, каде што поголемата вредност на овие статистички параметри покажува подобро приспособување на моделот на податоците и поточна процена.

3.3.3. Декодирање на дискретна променлива во заменски нумерички променливи

Создавањето нумерички променливи од дискретни (категорични) променливи во регресионата анализа се врши преку користење заменски променливи (dummy variables), со цел вклучување на информацијата за категориските променливи во регресионите модели. Оваа техника е неопходна бидејќи регресионите модели работат исклучиво со нумерички променливи, а категориските вредности не можат да бидат влезни параметри во тие модели.

Процесот на декодирање дискретна променлива во заменски нумерички променливи кои можат да се вклучат во регресиониот модел отпочнува со идентификација на дискретните променливи. За приказ на алгоритмот со пример, се поставува X да е категорична променлива со K различни вредности. За секоја од вредностите (категиите) на X се создава посебна заменска променлива X_i за $i = 1$ до K . Заменските променливи го имаат следниот израз:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{ако } X \text{ има вредност } i \\ 0, & \text{ако } X \text{ нема вредност } i \end{cases}$$

каде што i се различните вредности (категиите) на X .

Потоа, овие декодирани заменски нумерички променливи X_i се интегрираат како независни променливи во регресиониот модел наместо дискретната променлива X . Доколку зависната променлива е Y , тогаш регресиониот модел го има следниот израз:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K + \varepsilon$$

каде што β_0 е слободниот член во моделот; β_i се коефициентите на заменските променливи X_i , и X_i се заменските нумерички променливи создадени од категоричната променлива X .

Со оваа математичка трансформација на декодирање, категориската информација се трансформира во форма која може да се вклучи во регресиониот модел и да се анализира влијанието на различните вредности на категориската променлива врз зависната променлива.

3.4. Користен софтвер во истражувањата

Во рамките на истражувањата во оваа докторска дисертација се користени различни софтвери за различните цели во тезата.

- CAD софтверот SolidWorks е искористен за дизајнирање на сите делови, гравури и алатни сегменти кои се изработени во експерименталните фази на дисертацијата [116].
- Модулот Solidworks Plastics е употребен за реализација на симулации со МКЕ за процесот на инјекционо вбригување во гравурите на алатите со цел да се утврдат оптималните услови на процесирање на пробните парчиња [117].
- За статистичката анализа се користени софтверите Minitab и Excel [118, 119].
- За подготовка на моделите за печатење на Form 3 системот за адитивно производство е користен софтверот PreForm [120].
- За оптичко мерење на радиусите се користи софтверот IC Measure [121].
- За реализација на сите испитувања со истегнување на изработените примероци од сите експерименти се користи софтверот TrapeziumX [122].

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА

Ова поглавје ги опишува конкретните чекори и методологија кои се користени за изработка на овој труд. Најпрво опишани и објаснети се експерименталните методи. Ова е проследено со експерименталниот протокол што се користи во истражувачките фази и за собирање податоци. На крај, се дискутира и опишува различната опрема и материјали кои се користат за изведување на експериментите.

4.1. Испитување на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување

Во овој експеримент се истражуваат промените на точноста, максималната јачината на истегнување и максималната деформација на делови изработени со стереолитографско адитивно производство. За таа цел, се постави дизајн на експеримент (DoE) со примена на Фишеровиот сефакторен план на повеќе нивоа. Експериментот е дефиниран со влезните параметри и нивоа дадени во Табела 4.1.

Факторите во експериментот, или влезните променливи параметри, кои се менуваат контролирано се: материјал, агол на наклон, ориентација и степен на постпроцесирање.

Табела 4.1: Влезни фактори и нивни нивоа за експеримент 1 (Извор: Сопствено истражување)

Бр.	Влезни променливи фактори	Број на нивоа на фактор	Нивоа на фактор
1	Материјал	2	HighTemp - Rigid 10k
2	Агол на наклон [°]	3	0 - 45 – 90
3	Ориентација	2	рамна – бочна
4	Степен на постпроцесирање	3	Green - UV - UV+T

Излезните параметри (одзиви) во овој експериментален дизајн се максималната јачината на истегнување σ , максимална деформација во момент на лом ϵ . Алатите за инјекционо вбризгување се подложени на значителни напрегања за време на работните циклуси. Од таа причина потребно е материјалот од кој се изработени алатите да има

доволна јачина на истегнување за да се спротивстави на деформација или кршење кога е подложен на овие сили.

Табела 4.2: Излезни параметри за експеримент 1 (Извор: Сопствено истражување)

Бр.	Излезни параметри (одзив)	Ознака	Мерна единица
1	Максимална јачина на истегнување	σ	МПа
2	Максимална деформација	ϵ	%

Во експериментот, факторите материјал и ориентација се менуваат на две нивоа, додека агол на наклон и степен на постпроцесирање се менуваат на три нивоа. За агол на наклон се земени аглите од 0°, 45° и 90° во однос на хоризонталната подлога за да може да се покријат сите можни позиции на деловите во однос на подлогата.

Еден сефакторен експеримент на повеќе нивоа се опишува како комбинација од одделните факторни експерименти со еднакви нивоа на факторите. Значи експериментот е комбинација од експеримент 2² и експеримент 3², односно еден двостепенски експеримент каде што два фактори се менуваат на 2 нивоа и еден тристепенски експеримент каде што 2 фактори се менуваат на 3 нивоа. Бидејќи експериментот е сефакторен, се тестира секоја комбинација на факторите. Конечниот сефакторен дизајн на повеќе нивоа се опишува како 2² x 3².

За да се контролира влијанието на влезовите во експериментот кои не може да се контролираат, а може да предизвикаат варијабилност во нормалните работни услови, направено е рандомизирање на редоследот на експериментите. Материјалот и степен на постпроцесирање не може да се рандомизира, но при вршење на експерименталните тестови се рандомизираат наклонетоста и ориентацијата. За да може да се определи случајната грешка на експериментот и да се провери адекватноста на емпирискиот модел, неопходно е повторување на експериментите, при што се добиваат повеќе вредности на одзивот за еднакви вредности на факторите.

Факторот агол на наклон е континуиран, што значи дека во изведените регресиони равенки за јакоста и деформацијата може да се добиваат вредности за сите агли на

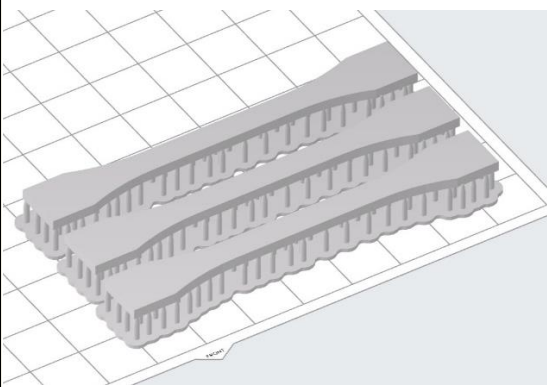
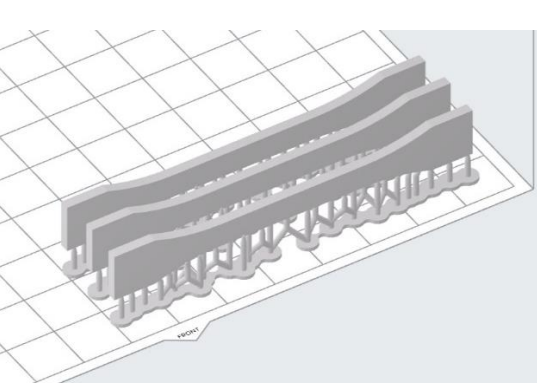
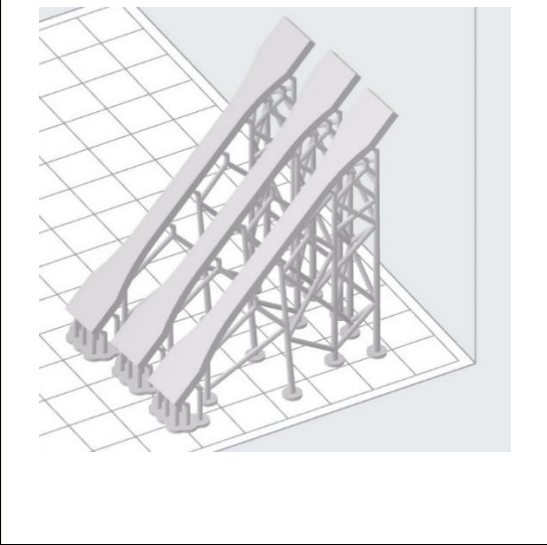
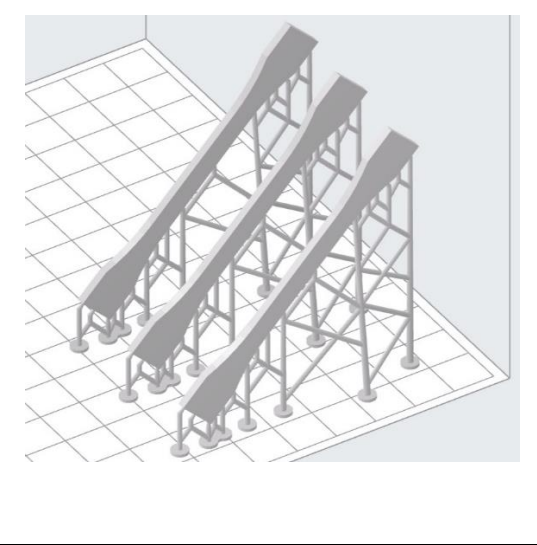
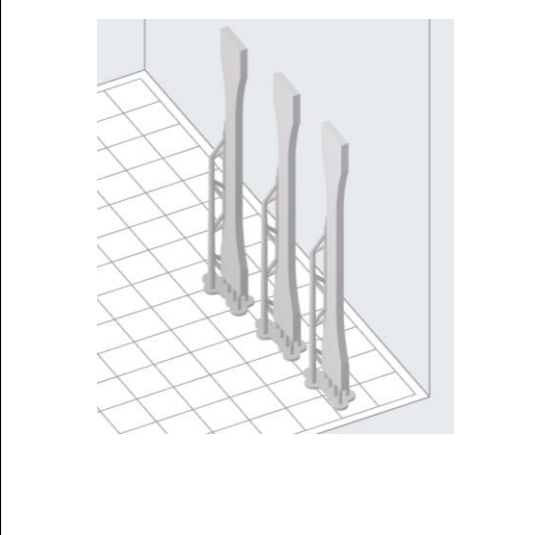
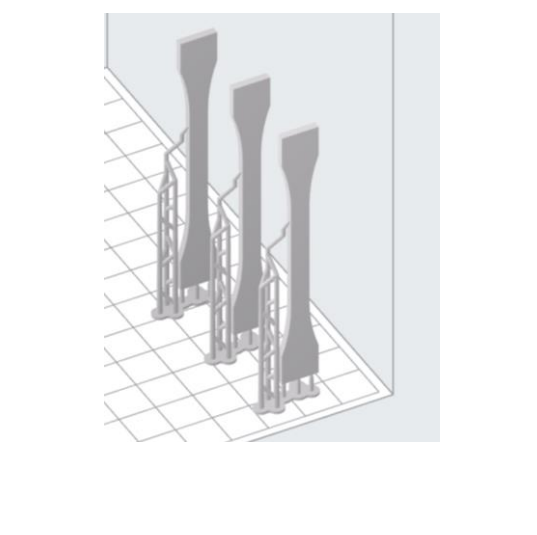
наклон во интервалот од 0° до 90° . Од друга страна, факторите материјал, ориентација и степен на постпроцесирање се дискретни, односно можат да имаат само одредена вредност која не е нумеричка бидејќи припаѓаат на специфични класи.

За да се најдат комбинациите на независните фактори и нивните нивоа, користен е статистичкиот софтвер Minitab. Сите комбинации од експериментот се прикажани во Табела 4.3, а за секоја од комбинациите се испитани по 3 примероци. Графички приказ на ориентациите и аголот на наклон за сите примероци е даден во Табела 4.4.

Табела 4.3: Експериментална матрица (Извор: [118])

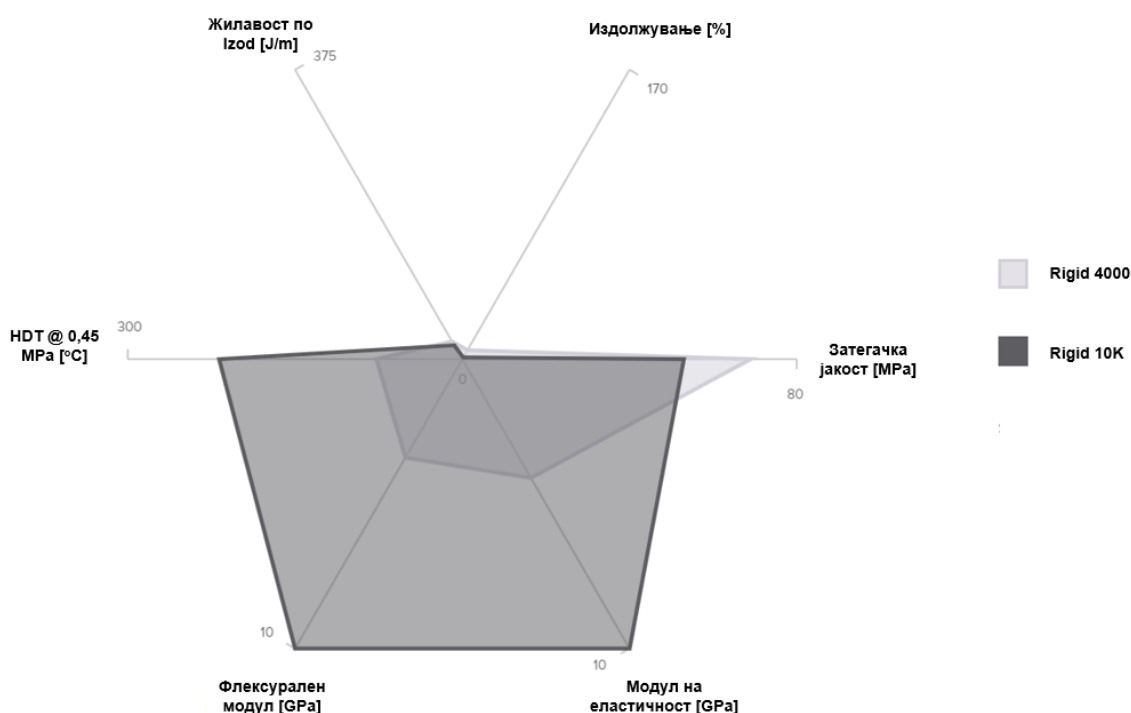
Проба	Кодирани влезни параметри				Физички влезни параметри			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Материјал	Агол на наклон (°)	Ориентација	Степен на постпроцесирање
1	0	-1	0	-1	High Temp	0	Бочна	Green
2	0	-1	0	0	High Temp	0	Бочна	UV
3	0	-1	0	1	High Temp	0	Бочна	UV+T
4	0	-1	1	-1	High Temp	0	Рамна	Green
5	0	-1	1	0	High Temp	0	Рамна	UV
6	0	-1	1	1	High Temp	0	Рамна	UV+T
7	0	0	0	-1	High Temp	45	Бочна	Green
8	0	0	0	0	High Temp	45	Бочна	UV
9	0	0	0	1	High Temp	45	Бочна	UV+T
10	0	0	1	-1	High Temp	45	Рамна	Green
11	0	0	1	0	High Temp	45	Рамна	UV
12	0	0	1	1	High Temp	45	Рамна	UV+T
13	0	1	0	-1	High Temp	90	Бочна	Green
14	0	1	0	0	High Temp	90	Бочна	UV
15	0	1	0	1	High Temp	90	Бочна	UV+T
16	0	1	1	-1	High Temp	90	Рамна	Green
17	0	1	1	0	High Temp	90	Рамна	UV
18	0	1	1	1	High Temp	90	Рамна	UV+T
19	1	-1	0	-1	Rigid 10K	0	Бочна	Green
20	1	-1	0	0	Rigid 10K	0	Бочна	UV
21	1	-1	0	1	Rigid 10K	0	Бочна	UV+T
22	1	-1	1	-1	Rigid 10K	0	Рамна	Green
23	1	-1	1	0	Rigid 10K	0	Рамна	UV
24	1	-1	1	1	Rigid 10K	0	Рамна	UV+T
25	1	0	0	-1	Rigid 10K	45	Бочна	Green
26	1	0	0	0	Rigid 10K	45	Бочна	UV
27	1	0	0	1	Rigid 10K	45	Бочна	UV+T
28	1	0	1	-1	Rigid 10K	45	Рамна	Green
29	1	0	1	0	Rigid 10K	45	Рамна	UV
30	1	0	1	1	Rigid 10K	45	Рамна	UV+T
31	1	1	0	-1	Rigid 10K	90	Бочна	Green
32	1	1	0	0	Rigid 10K	90	Бочна	UV
33	1	1	0	1	Rigid 10K	90	Бочна	UV+T
34	1	1	1	-1	Rigid 10K	90	Рамна	Green
35	1	1	1	0	Rigid 10K	90	Рамна	UV
36	1	1	1	1	Rigid 10K	90	Рамна	UV+T

Табела 4.4: Експериментални ориентации и агли на наклон на моделите (Извор: Сопствено истражување)

		Ориентација	
		Рамно	Бочно
Агол на наклон	0°		
	45°		
	90°		

4.1.1. Материјали и метод на изработка на примероците

Целта на експериментите е да се идентификува варијабилноста во механичките својства. Параметрите што се испитувани се максималната јачина на истегнување и максималното издолжување. Примероците за тестирање се изработени од фотополимерите High Temp [11] и Rigid 10k [12] на компанијата Formlabs на 3Д-печатачот Form 3 [123]. Карактеристиките на овие фотополимерни материјали се дадени во табелите во Прилог А.



Слика 4.1: Компаративен дијаграм за механичките и термичките карактеристики на фотополимерите од Rigid фамилијата на Formlabs (Извор: [124])

За да се постигнат подобри резултати, подобри механички карактеристики и да се обезбеди највисоката можна вредност за температура на извиткување под оптеретување (HDT) на материјалот, реализирани се термички третмани на истиот во лабораториски услови.

Оваа постапка е реализирана во лабораториска печка ST-05 Instrumentaria Zagreb на Природно-математичкиот факултет во Скопје (Слика 4.4 б). Времињата и температурите за сите фази на постпроцесирање по 3Д-печатењето се дадени во Табела 4.5.

Табела 4.5: Времиња и температури за постпроцесирање на фотополимерите користени во истражувањето (Извор: [125, 126])

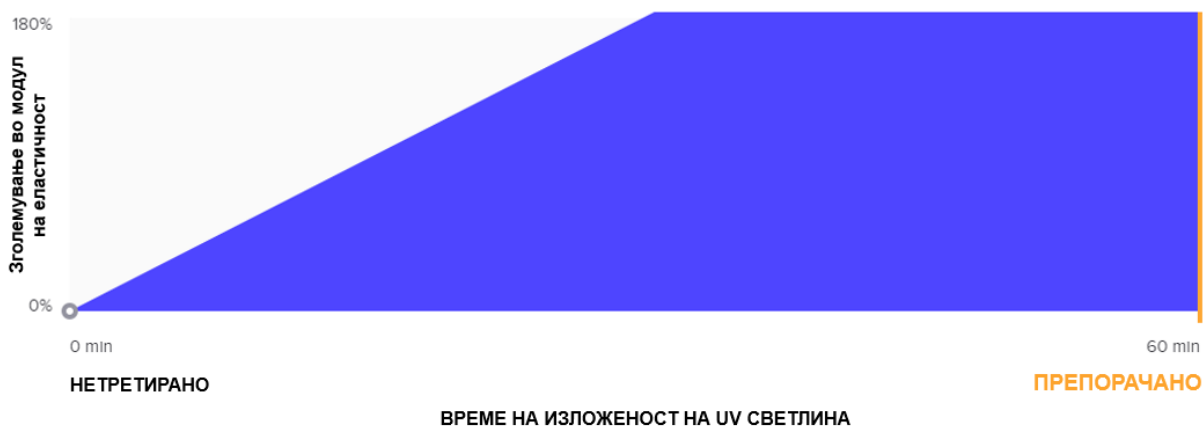
Тип на фотополимер	Фаза на постпроцесирање				
	Миенење време [min]	Постстврднување		Термичко третирање	
		време [min]	температура [°C]	време [min]	температура [°C]
High Temp	6	120	80	180	160
Rigid 10k	10 + 10	60	70	90	125

% Зголемување во модул на еластичност за стврдување на 60 °C за материјалот High Temp



а)

% Зголемување во модул на еластичност за стврдување на 70 °C за материјалот Rigid 10K

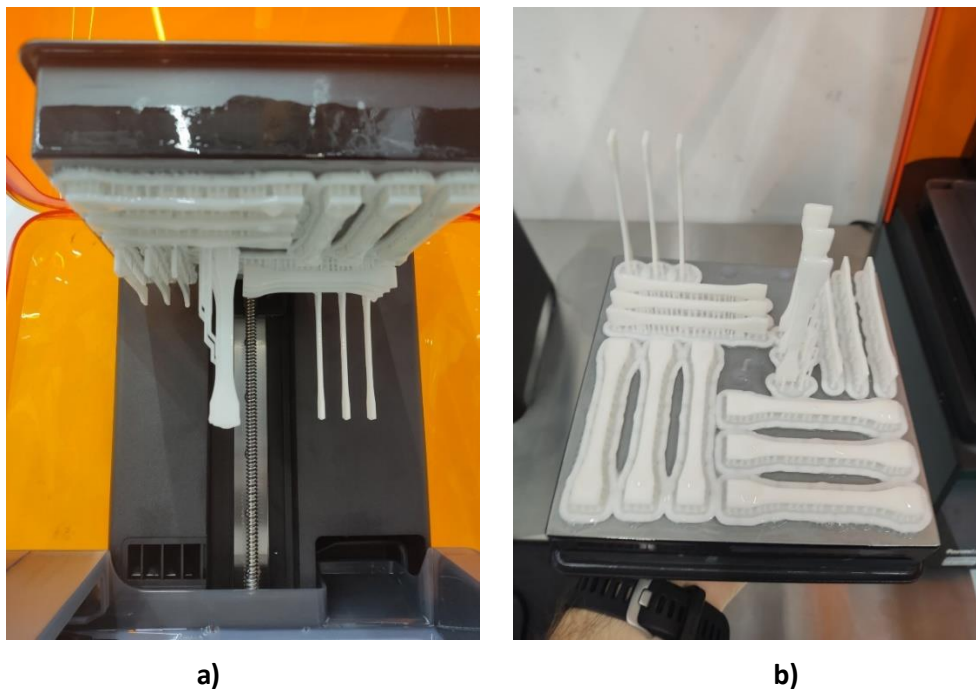


б)

Слика 4.2: Процентуално зголемување на модулот на еластичност кај фотополимерите со дополнително термичко третирање; а) HighTemp; б) Rigid 10k; (Извор: [125])

Подготовка на примероците

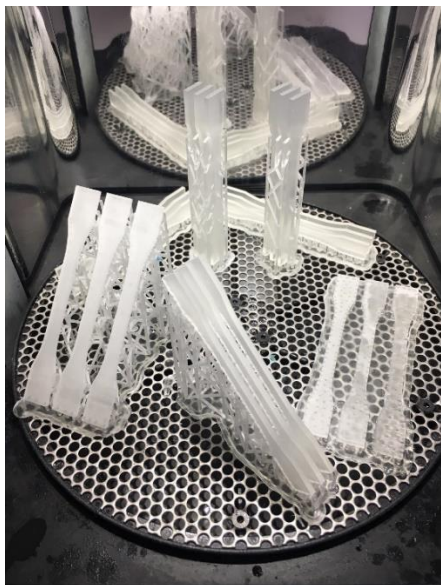
За да може да се реализира експериментот, од секој материјал се изработени по 9 примероци од типот 1BA за секоја од 6 различни ориентации дадени во Табела 4.4. Понатаму, по 3 примероци од секоја ориентација се подложени на трите различни типа постпроцесирање. Ознаките и класификацијата на секој примерок се дадени во експерименталната матрица во Табела 4.3.



Слика 4.3: Дел од отпечатените епрувети (Извор: Сопствено истражување)

По печатењето сите примероци се отстранети од подлогата на печатачот и измиени во Form Wash уредот според пропишаните препораки дадени во Табела 4.5. Примероците потоа се групирани по ориентации и подложени на еден или на повеќе од третманите за постпроцесирање според препораките дадени во Табела 4.5.

По завршувањето на сите активности за постпроцесирање, рачно се отстранети сите помошни структури и на крај се направени мерења на епруветите - на должината, дебелината, широчината на двете глави и широчината кај мерното подрачје (Слика 4.5).



а)



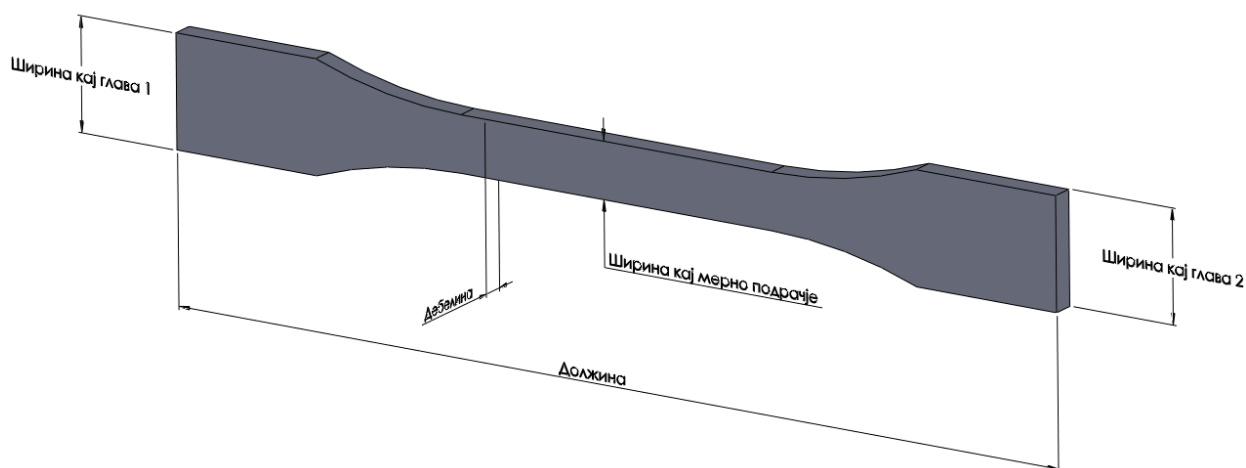
б)

Слика 4.4: Различни ориентации на деловите за време на постстврднување со УВ-зрачење (а) и со дополнително термичко третирање во лабораториска печка (б) (Извор: Сопствено истражување)

По постпроцесирањето примероците се чувани во затворен непроѕирен пластичен сад на температура од 22 до 25 °C за да се спречи прекумерна изложеност на светлина додека не се направи тестирањето. Бидејќи во [68] и [127] времето по изработка е идентификувано како фактор кој влијае врз деградацијата поради изложеноста на различни нивоа на кислород и амбиенталната светлина, во ова истражување се задржа константно време помеѓу печатењето и тестирањето за сите експерименти со максимален период на аклиматизација од 24 часа.

Постапка за испитување со истегнување

Експерименталните истражувања за испитување на механичките карактеристики на примероците се направени во рамките на акредитираната Лабораторија за испитување на механички карактеристики при Машинскиот факултет во Скопје. Тестирањето е реализирано на Shimadzu Autograph AGS-X машината со максимален работен капацитет до 10 kN. Испитувањата се изведуваат со брзина на тестирање од 1 mm/min сè до појава на пукнатина. Ниската брзина на тестирање е избрана за да се обезбедат квазистатички услови на тестирање.



Слика 4.5: Контролни мерки кај изработените епрувети (Извор: Сопствено истражување)

За секој примерок, максималната јачина на истегнување е пресметана како:

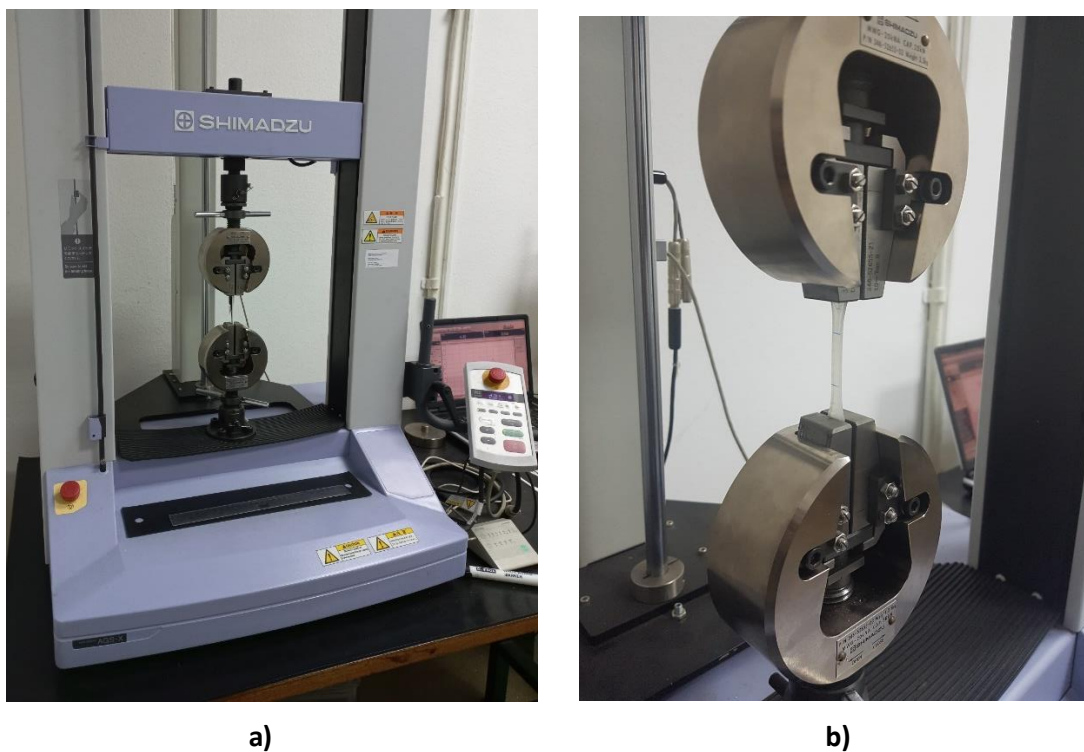
$$\sigma_m = \frac{F_M}{A_0} \quad \dots (4)$$

каде што F_M е максималната сила, а A_0 е почетниот напречен пресек ($b \times h$) од $\sim 10 \text{ mm}^2$.

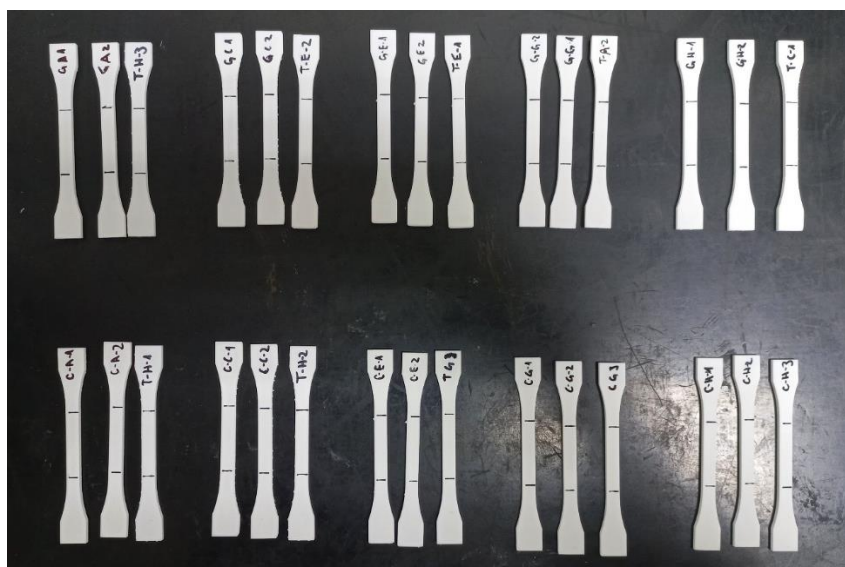
За секој примерок, релативната деформација е пресметана според изразот:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \dots (5)$$

каде што L_0 е почетното мерно подрачје од 25 mm, а L е должината што соодветствува со σ_m .



Слика 4.6: Униаксијална машина за тестирање Shimadzu Autograph AGS-X (а) со поставен примерок за истегнување помеѓу рамните челюсти (б) (Извор: Сопствено истражување)



Слика 4.7: Група епрувети за испитување од фотополимерот Rigid 10k (Извор: Сопствено истражување)

4.2. Анализа на димензионалните отстапувања кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури

Како што е дефинирано претходно, за една стереолитографска гравура да биде дефинирана како применлива, таа мора да биде способна да обезбеди обликување на производ што исполнува одредени геометриски барања и да обезбеди повторливост на процесот во дадените гранични толеранции на парчето.

Ова имплицира дека гравурата мора да биде доста стабилна и цврста. За целите на ова истражување, стабилноста на стереолитографската гравура ќе ја дефинираме кога таа ги исполнува дадените димензионални барања во повеќе циклуси, притоа изработувајќи димензионално прифатливи компоненти. Цврстината се однесува и на отпорноста на гравурата на деградација и таа ги ограничува димензионалните варијации кои се појавуваат од дел до дел.

За да се испитаат овие карактеристики кај стереолитографските гравури, избрани се модели со геометрии соодветни за оваа анализа. Притоа, секој модел содржи неколку критични геометриски карактеристики што се користеа во понатамошните анализи.

По инјекционото вбригување на полимерниот материјал во гравурите, претходно избраните геометриски карактеристики се измерени, споредени се со проектираните димензии и се евалуирани за точноста. Податоците од мерењето потоа се следени од циклус до циклус за да се одреди однесувањето на деловите што се произведуваат. Податоците од мерењето од обликуваните делови потоа се анализирани со цел да се утврдат следните параметри:

- дали деловите ги задоволуваат бараните димензии (во рамките на одредена толеранција)
- дали бараните димензии се задоволени за поголемиот дел од изработените парчиња
- брзината со која деловите димензионално се менуваат во зависност од бројот на работни циклуси на кои била подложена гравурата.

Геометриските показатели што се анализираат се дебелината, вкупната должина и вкупната ширина. Кружните димензии како геометриски показатели, исто така, се

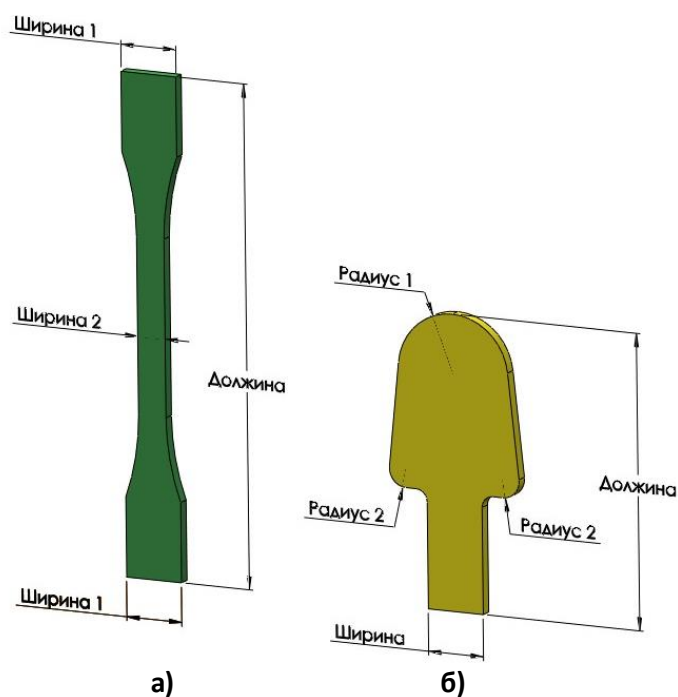
користат, но во помала мера. Главниот фокус за време на испитувањето е дебелината, што е еден од најважните конструктивни критериуми кога се развива нов пластичен дел. Таа има силно влијание врз многу клучни карактеристики на делот, како механичките карактеристики, надворешниот изглед, способноста за обликување во гравурата на алатот, цената на чинење и други. Иако вкупната должина и ширина на деловите не мора да се важни геометриски карактеристики на еден пластичен дел, тие се едноставни показатели кои овозможуваат начин за споредба на изработените парчиња без оглед на нивната целокупна сложеност. Во помала мера, кружните димензии, исто така, се испитувани и за таа цел специфично е изработена гравура со дел соодветен за овие мерења.

Опис на геометриите за анализа

Во рамките на истражувањата спроведени во овој докторски труд се анализирани два различни модели со различни геометрии за да може да се добие целосна претстава за промените на геометриите при вбригување полимерен материјал во гравура изработена со адитивно производство. Избраните форми се обликот на стандардна епрувета за испитување со истегнување, тип 1BA според стандардот ISO 527 и трапезоидна плоча со заоблување на горната страна и рабовите на основата.

Стандардната епрувета како облик е избрана за да се користи како пример за делови за инјекционо вбригување што се плочести. Геометриските параметри што се следат на овие модели се линиски димензии за вкупната должина, ширината на главите, ширината на мерното подрачје и дебелината на епруветата.

Избраната форма и облик за анализа на радиусите на заоблување е трапезоидна плоча. Покрај радиусите, на овој модел се анализира и дебелината на плочката, како и широчината на правоаголниот испуст што е додаден на трапезот за да може да се искористи веќе постојниот вливен систем во алатот за инјекционо вбригување што се користи за време на експериментите. Пример за секој од деловите, како и соодветните мерки што се следеа, е даден на Слика 4.8.



Слика 4.8: Модели за експеримент: а) епрувета тип 1BA (ISO 527), б) трапезоидна плоча со радиуси (Извор: сопствено истражување)

4.2.1. Експериментален протокол

Следниот експериментален протокол е користен за добивање на сите гравури:

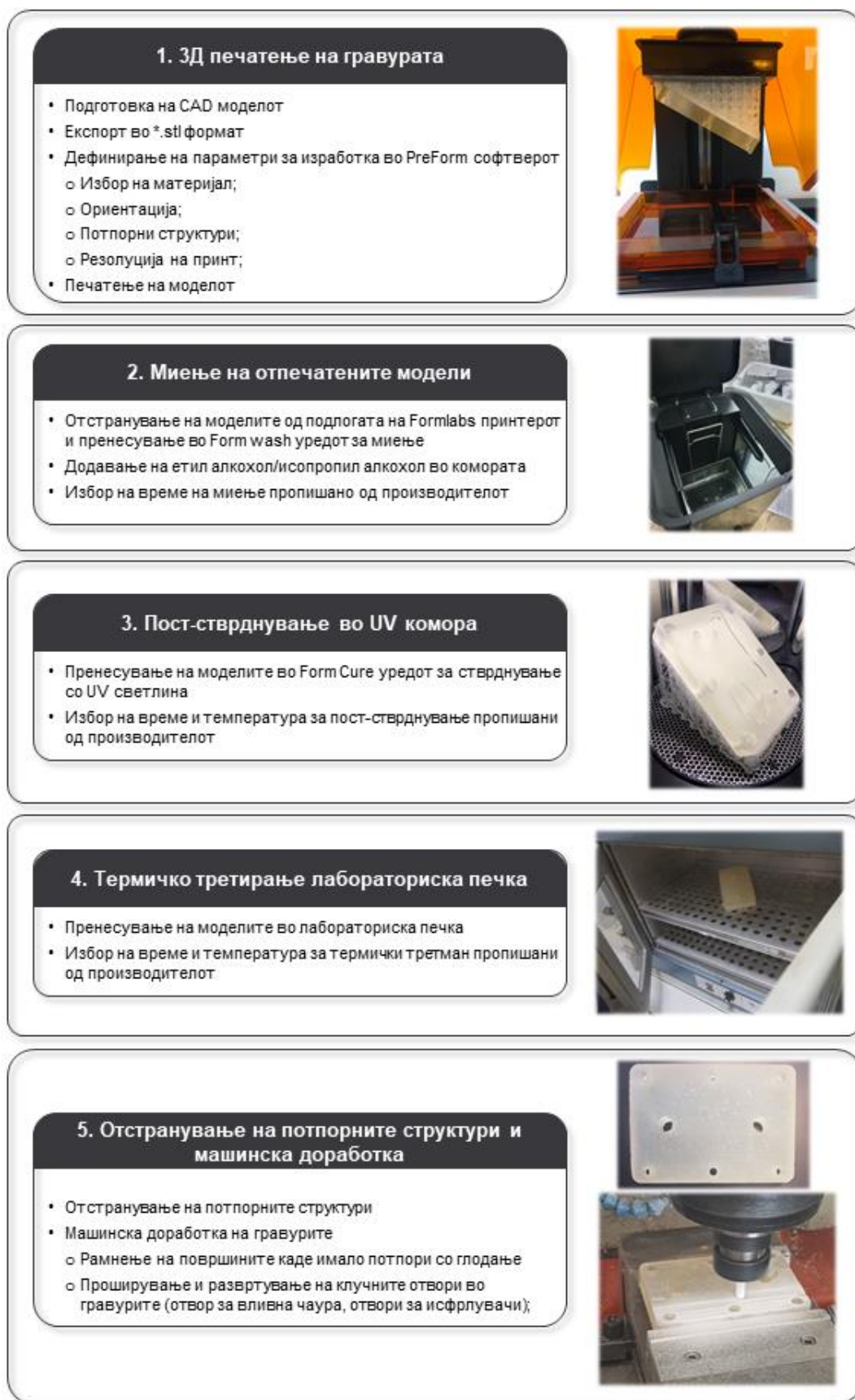
1. Дизајн на модел од пластика со позната геометрија и толеранции.
2. Дизајн на алат за инјекционо вбризгување за добивање на пластичниот дел.
3. Изработка на гравурите за алатите за инјекционо вбризгување со помош на SLA технологијата за адитивно производство.
4. Машинска доработка на гравурите за ефективно отстранување на помошниот материјал за да се подготват за инјекционо вбризгување.
5. Воспоставување параметри за инјекционо вбризгување со помош на симулација со метод на конечни елементи и креирање контролни примероци.
6. Инјекционо вбризгување парчиња во стереолитографските гравури до појава на лом на гравурата.
7. Изработените парчиња се мерат и геометриските показатели се споредуваат со потребните димензионални барања за делот.
8. Анализа на собраните податоци од мерењата.

Процедури за изработка на гравурите, дефинирање процесни параметри и реализација на експериментот

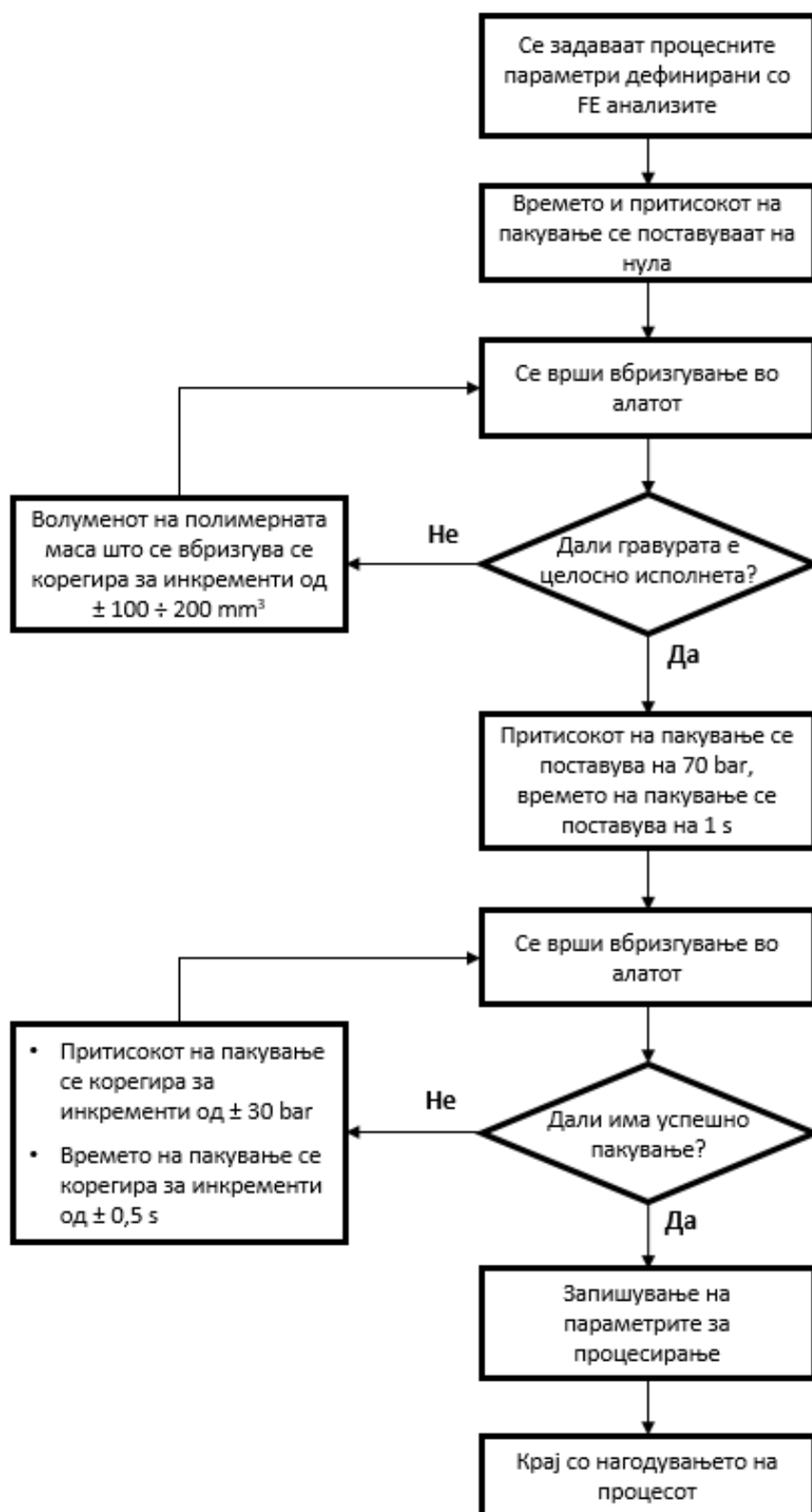
Сите гравури се изработени со Formlabs SLA 3Д-печатач и се подложени на сите фази на постпроцесирање и термичко третирање за да се добијат највисоките можни механички и топлотни карактеристики кај деловите. Понатаму, клучните толеранции кај отворите и контактните површини на гравурата со жлебот во алатните плочи се добиени со машинска дообработка на CNC машина. Целиот процес е даден на Слика 4.9.

Потоа, за секој сет гравури поставени во алатот за инјекционо вбригување се воспоставуваат условите за процесирање според процедуралните чекори дадени на дијаграмот на Слика 4.10.

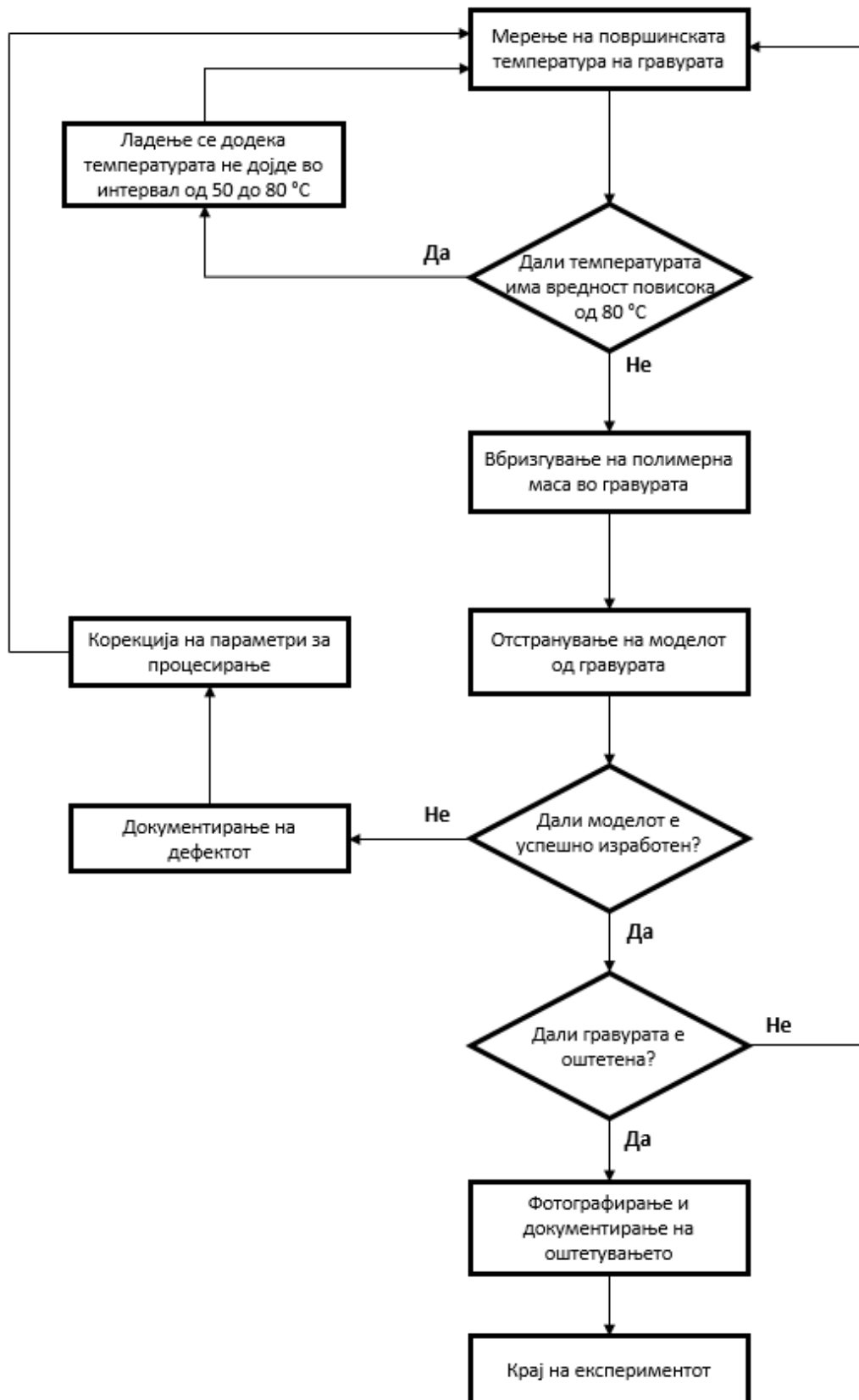
Веднаш по дефинирањето на условите на процесирање следена е експериментална процедура за изработка на моделите прикажана на дијаграмот на Слика 4.11.



Слика 4.9: Процес на изработка на гравурите (Извор: Сопствено истражување)

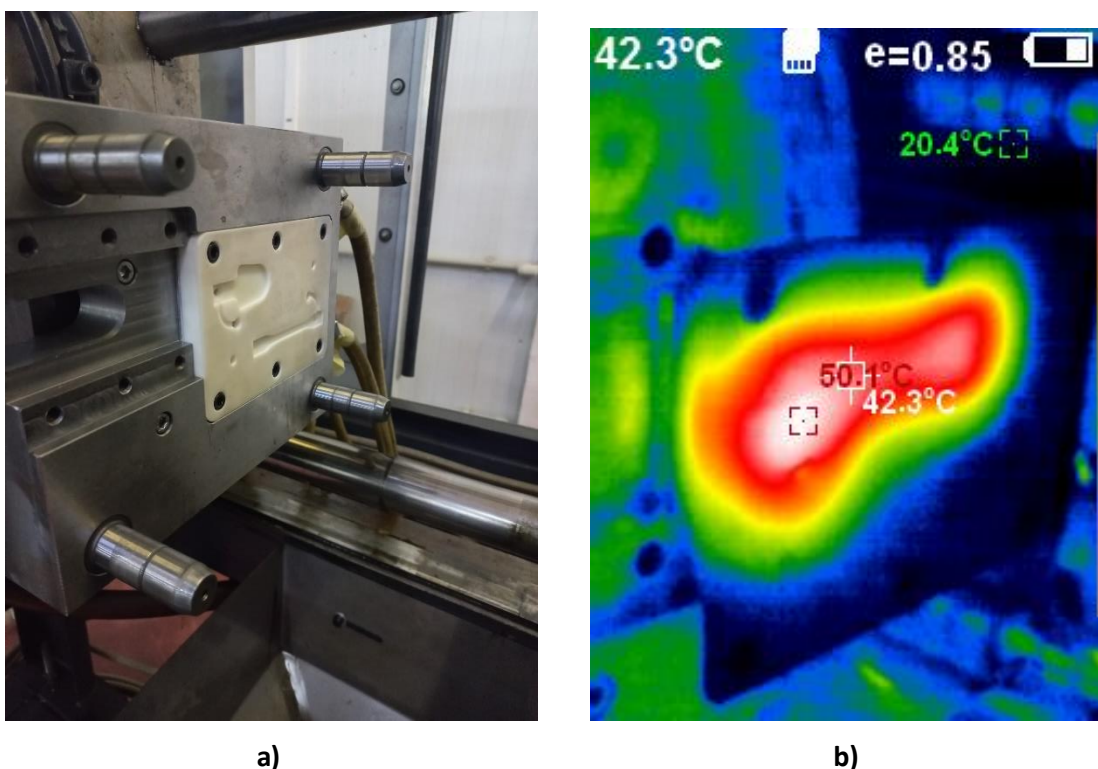


Слика 4.10: Блок-дијаграм за експерименталната процедура за дефинирање на параметрите за инјекционо вбригување во гравурите (Извор: Сопствено истражување)



Слика 4.11: Блок-дијаграм за експерименталната процедура за инјекционо вбризување во гравурите (Извор: Сопствено истражување)

Степенот на неупотребливост на гравурата се класифицира како дефект или пукнатина која спречува понатамошно вбризгување во алатот или може да ја загрози безбедноста на опремата за процесирање. Традиционалните дефекти кај пластичните делови, како преголем венец на поделбената линија или заоблување на некои од деталите, не се сметаат како проблематични сè додека нивната појава не влијае директно врз структурниот интегритет на стереолитографската гравура.



Слика 4.12: Контрола на температурата кај стереолитографските гравури; а) изглед на гравурата; б) слика од термографска камера со распределба на температура по вбризгувањето (Извор: Сопствено истражување)

Во случај на појава на три последователни вбризгувања со премал волумен на пластична маса или појава на други дефекти предизвикани од несоодветни параметри на процесирање, се прекинува со експериментот и се прави промена на процесните параметри според претходно дефинираните процедури. Овие модификации на процесот се документираат за понатамошни споредби и анализи.

Температурната распределба во алатот е прикажана на Слика 4.12. Највисоките измерени вредности се на локацијата на инјектирање во гнездото, во близина на вливната чаура. По исфрлањето на делот, на алатот се вршеа нови мерења сè додека

неговата температура не дојде во препорачаниот интервал на вредности за ABS пластика. По неколку работни циклуси се покажа дека се потребни приближно 60 секунди за да се обезбеди доволно време за ладење, за да се дозволи температурата на алатот да влезе во саканиот температурен опсег. Просечната температура на вметоците низ циклусите е 62 °C, според мерењата на термографската камера. Најниската температура на алатот е измерена за првиот циклус каде што гравурниот вметок е на собна температура од 20 °C.

Табела 4.6: Измерени температури пред почетокот на секој работен циклус за гнездо 1 (Извор: Сопствено истражување)

Број на циклус	Температура на гравура (°C)	Број на циклус	Температура на гравура (°C)
1	20	26	60,8
2	48,1	27	57,7
3	50,1	28	105,1
4	43	29	59,1
5	36	30	98,1
6	49	31	63,7
7	54,5	32	95,7
8	48,1	33	
9	98,7	34	
10	43,5	35	
11	случаите со нецелосно полнење на гравурата се исклучени од анализата	36	
12		37	
13		38	
14		39	
15		40	
16		41	
17	80,7	42	
18	71	43	
19	68,1	44	
20	62,9	45	
21	56,2	46	
22	53,3	47	
23	56,2	48	
24	68,6	49	
25	62,9	50	
Просечна температура на гравура (°C)			62
Минимална температура на гравура (°C)			20,0
Максимална температура на гравура (°C)			105,1

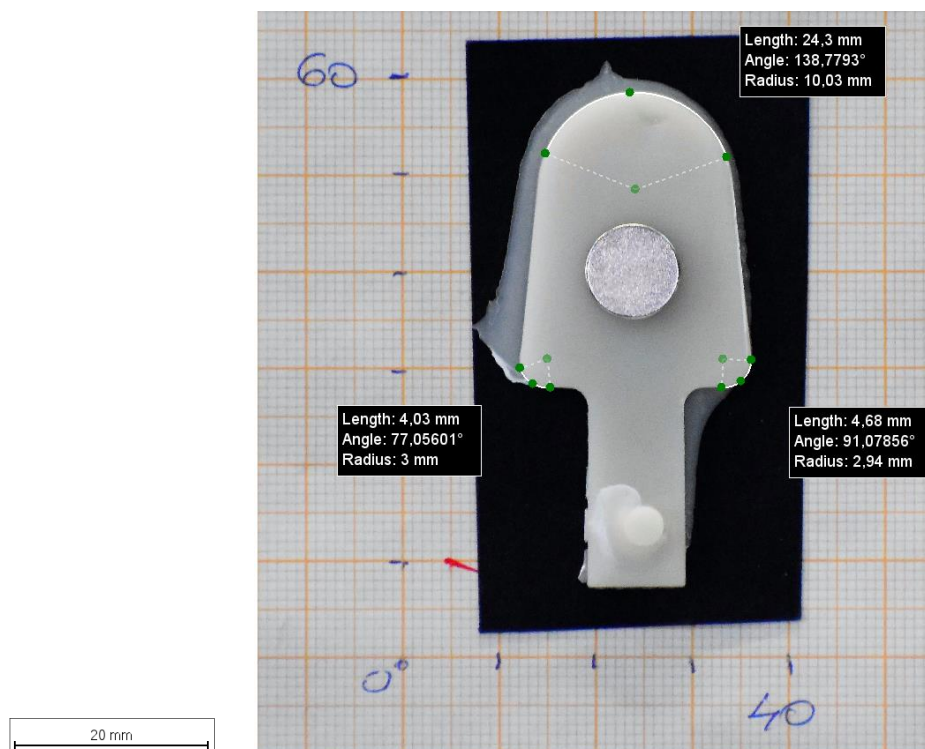
Мерење линиски мерки на примероците (широчина, должина и дебелини)

За да се добијат податоците од линиските мерења, се користи дигитален микрометар Extol со мерно подрачје од 0 до 25 mm, резолуција од 0,01 mm и микрометар Feinmesszeugfabrik-Suhl со мерно подрачје од 75 до 100 mm, резолуција од 0,01 mm.

Линиските мерења се реализирани со користење опрема за мерење од Лабораторијата за метрологија на Машинскиот факултет. Резолуцијата на користените микрометри изнесува 0,01 mm. За секоја од контролираните мерки се направени по три мерења и најдена е средна вредност за да се евидентира финалната мерка.

Мерење радиуси

За мерење на радиусите се користи софтверот IC Measure, што претставува флексибилна програма за мерење должини и површини во дигитални слики. Приспособливиот размер во програмата овозможува примена на софтверот во различни полиња. IC Measure користи мерења на векторски форми слични на оние што се користат во CAD програмите за цртање. Мерењата на обликот потоа може да се зачуваат и на нив да се работи подоцна. Софтверот работи со слики во различни резолуции и формати, а резултатите од мерењата може да се екпортираат за понатамошни статистички анализи. Преку употреба на брзи алгоритми, софтверот може да се користи и за анализа на слики со висока резолуција.



Слика 4.13: Пример за мерења на радиус кај трапезните примероци во софтверот IC Measure (Извор: [121])

Примената на софтверско решение за димензионални мерења базирани на фотографија (слика) за добивање на мерките на радиуси во дел добиен со инјекционо вбригување е оправдана поради неколку причини.

Најпрво, со овој пристап се обезбедува многу прецизен и ефикасен метод за мерење на радиусите, во споредба со традиционалните рачни методи, кои можат да одземат време и да бидат склони кон грешки. Второ, софтверите за мерење слики може да генерираат детални и сеопфатни извештаи кои може да се користат за анализа на квалитетот и конзистентноста на процесот за инјекционо вбригување. Ова може да им помогне на производителите да ги идентификуваат и да ги решат сите проблеми што може да се појават за време на производството. Дополнително, софтверите за мерење слики овозможуваат мерење на сложени геометрии, што не е секогаш можно да се реализира со традиционалните методи на мерење. Свкупно, употребата на софтвери за мерење слики за радиуси во деловите со вбригување може да ги подобри квалитетот и ефикасноста на процесот на производство.

Прецизноста со која софтверите за мерење слики може да ги мерат радиусите е доста висока, често до субмикронско ниво. Ова ниво на прецизност е овозможено со употреба на напредни алгоритми и технологија за сликање со висока резолуција. Понатаму, софтверот може да направи компензации за какви било изобличувања или ефекти на зголемување предизвикани од системот за сликање, што резултира со уште попрецизни мерења. Ова ниво на прецизност е особено важно за деловите добиени со инјекционо вбригување каде што дури и малите отстапувања во радиусите можат значително да влијаат врз функционалноста на делот. Со користење софтвер за мерење слики, производителите можат да се осигурат дека нивните делови ги исполнуваат бараните спецификации и толеранции, што резултира со конзистентен квалитет и повторливост.

За да се изврши успешно мерење, мора да е познат размерот на сликата. Идеално, сликата треба да има позната мерка за да може софтверот лесно да се калибрира за оваа големина. Од таа причина, сите фотографии се направени на милиметарска хартија. Во заднината на секој примерок е поставена темна хартија за да има поголем контраст со рабовите на пластичните делови на кои се вршат мерењата.

Постапката што е применета при контролни мерења на димензиите на деловите на основа на методологија е дадена на блок-дијаграмот на Слика 4.14.



Слика 4.14: Блок-дијаграм на постапката за добивање на мерките на радиуси (Извор: Сопствено истражување)

4.2.2. Опрема

Машината за инјекционо вбригување што се користи за реализација на експериментите е Demag Ergotech system 500-200 и се наоѓа во алатницата „Лоноски“. Пластичните пелети што се користеа во процесот на инјекционо вбригување претходно се сушени 1 час и 30 минути на температура од 80 °C користејќи го уредот за сушење ХС-G25.

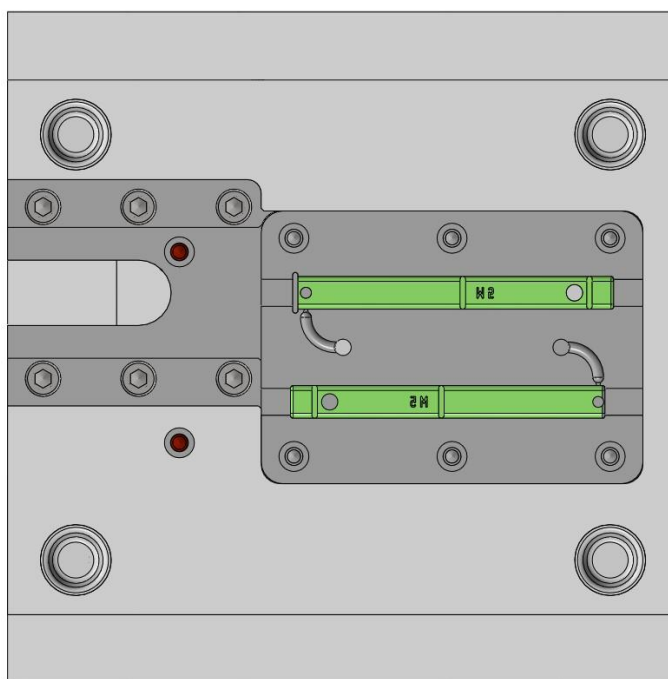
За да се добијат податоците од мерењата, се користи дигитален микрометар Extol со мерно подрачје од 0 до 25 mm, резолуција од 0,001 mm и микрометар Feinmesszeugfabrik-Suhl со мерно подрачје од 75 до 100 mm, резолуција од 0,001 mm.

4.2.3. Алат за експериментални истражувања

За реализација на овие тестови, користен е постоен алат со гравурни вметоци од алатницата „Лоноски“. Оригиналниот алат е користен за изработка на пластични помагала за сортирање апчиња од производни ленти во фармацевтската индустрија.

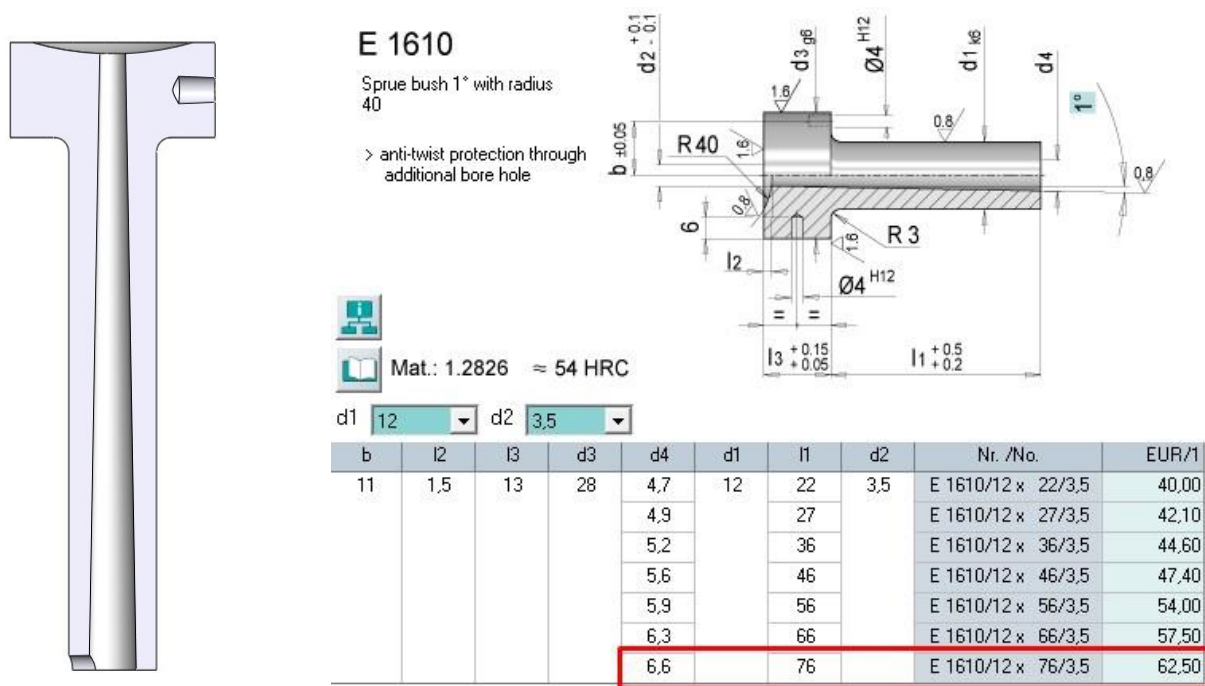
Користениот алат за експериментално истражување е применет на начин што е вградена нова гравура добиена со стереолитографска техника, без систем на ладење со новодизајниран вливен систем за да може да се реализираат истражувањата.

Поради потребата за изработка на две различни варијации на пластичното помагало, гравурата во оригиналниот алат е изработена со две меѓусебно независни гнезда. Кој дел ќе биде изработен од алатот, зависи од тоа како гравурата е ориентирана во отворот во алатната плоча (Слика 4.15).



Слика 4.15: Приказ на меѓусебно независни гнезда во оригиналната гравура во алатот за експеримент (Извор: Сопствено истражување)

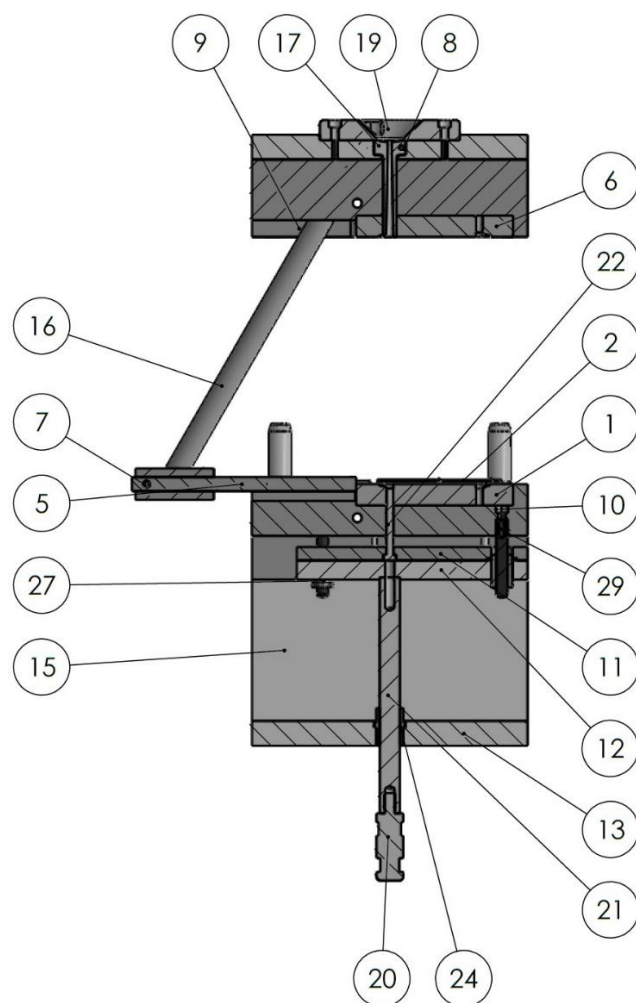
Ваквиот дизајн на алатот покажа одредени ограничувања во дизајнот на вливниот систем на гравурите. За да може да се искористи оригиналната вливна чаура на алатот (E 1610, Meusburger), разводните канали за сите гнезда се изработени со дијаметар од ϕ 4 mm.



Слика 4.16: Напречен пресек на вливната чаура во алатот за експеримент со веќе изработен хоризонтален жлеб за разводниот канал (лево) и стандардни димензии според каталог на производител (десно) (Извор: [128])

Пресметките за потребните големини на доводниот и разводниот канал во стереолитографските гравури за правилно исполнување на гнездата во сите случаи покажаа дека димензиите на вливниот систем од постојниот алат ги задоволуваат потребите за секој од примероците. Дополнително, дизајнот на стереолитографските гравури е приспособен на оригиналниот дизајн за да може да се искористи еден вметок со две гнезда.

На Слика 4.17 е даден шематски приказ на користениот алат, со ознаки за сите одделни плочи и делови. Детална техничка документација за алатот е дадена во Прилог В.



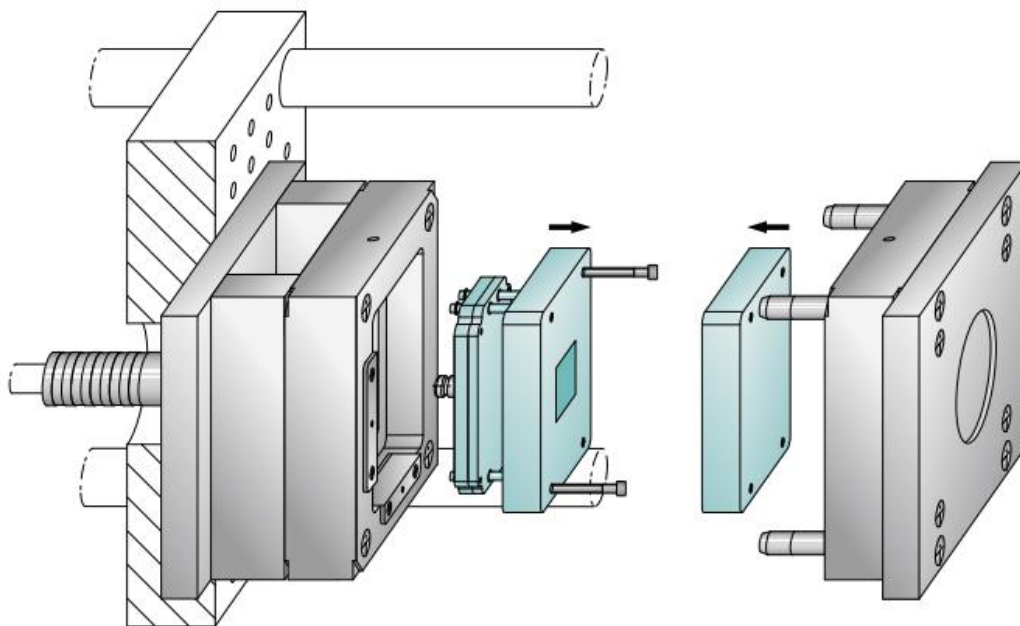
Ред. Бр.	Опис
1	Неподвижна гравура
2	Пластичен дел
3	Странично јадро
4	Лизгачи 1
5	Лизгачи 2
6	Подвижна гравура
7	Spring Plunger
8	Горна основна плоча
9	Неподвижна алатна плоча
10	Подвижна алатна плоча
11	Исфрлувачка плоча
12	Потиска исфрлувачка плоча
13	Долна основна плоча
14	Чаура за центрирање
15	Отстојник
16	Кос трн
17	Вливна чаура
18	Завртка - M8 x 25
19	Прстен за центрирање
20	Ракавец за туркачка летва
21	Туркачка летва
22	Исфрлувач
23	Исфрлувач
24	Чаура за туркач
25	Чаура за водење
26	Столб за водење
27	Линеарни водилки
28	Прстен за задржување
29	Parallel Pin

Слика 4.17: Слика на користениот алат со ознаки за сите оригинални компоненти (Извор: Сопствено истражување)

4.2.4. Дизајн и конструкција на гравурите

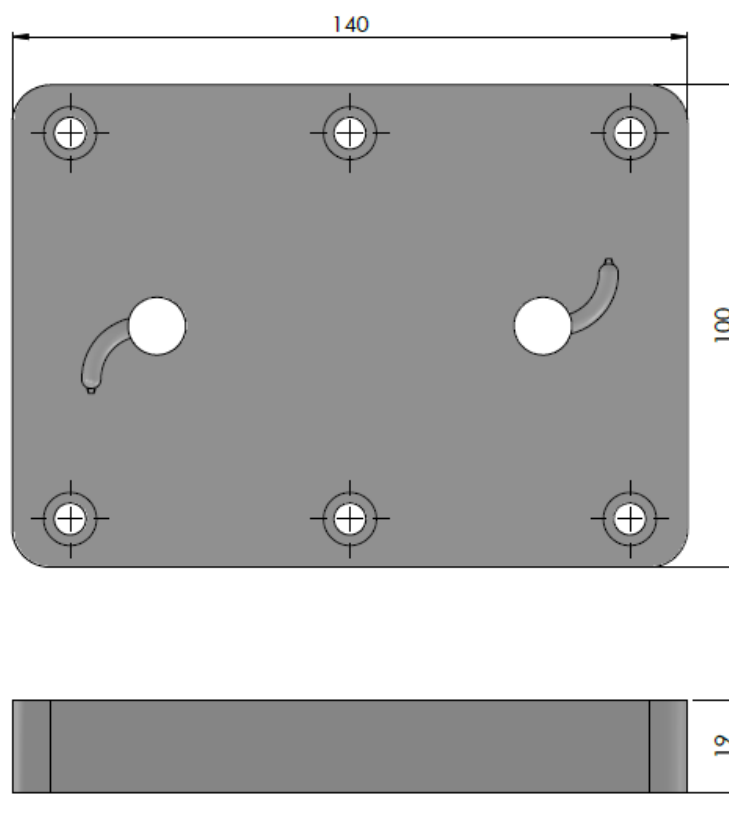
Досегашното искуство со употреба на стереолитографски гравури во технологијата на инјекционо вбризување покажало дека најоптимално е да се користи универзална метална база во која се сместуваат гравурите во кои е изработена геометријата на гравурата за вбризување. Од една страна, овој модуларен пристап овозможува употреба на овие бази за поставување најразлични гравури, а од друга, овозможува стереолитографските гравури да бидат колку што е можно помали, што заштедува на времето за нивна изработка и потребниот материјал. Вакви стандардни куќишта веќе се нудат и од самите производители. На Слика 4.18 е прикажано едно вакво куќиште од

производителот Meusburger, кое овозможува директна промена на користените гравури во алатот без негово отстранување од машината за инјекционо вбризување. Покрај гравурите, директно може да се отстрани и модуларниот систем за исфрлање, со основната и потпорната плоча, што овозможува промена на позициите на исфрлувачите за различни гравури што не би се користеле во алатот.



Слика 4.18: Шематски приказ на стандардно алатно куќиште со изменливи гравури од серијата FW на производителот Meusburger (Извор: [129])

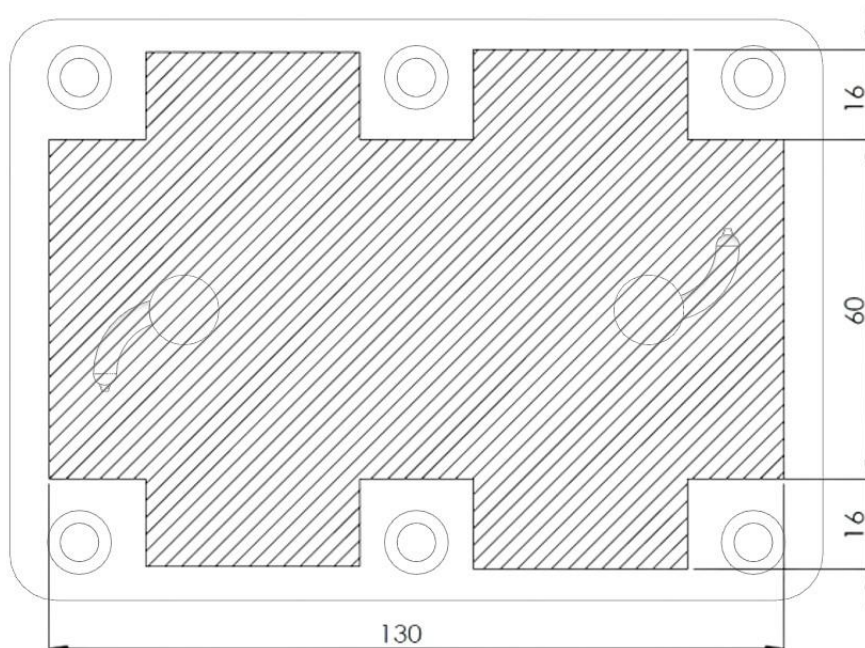
Димензиите на отворите во работните плочи каде што се поставуваат гравурите изнесуваат 140 x 100 x 19 mm и се прикажани на Слика 4.19 и Слика 4.20. Вливната чаура во алатот (E 1610, Meusburger) и распоредот на гнездата беше објаснет претходно и е даден на сликите Слика 4.15 и Слика 4.16. Разводните канали за сите гравури се изработени со дијаметар од ϕ 4 mm за да може да се искористи постојната чаура и да се намалат подготвителните трошоци за експериментот.



Слика 4.19: Габаритни димензии на секоја од оригиналните гравури. На сликата се дадени и отворите за вливната чаура и оригиналниот вливен систем што е користен во истражувањето (Извор: Сопствено истражување)

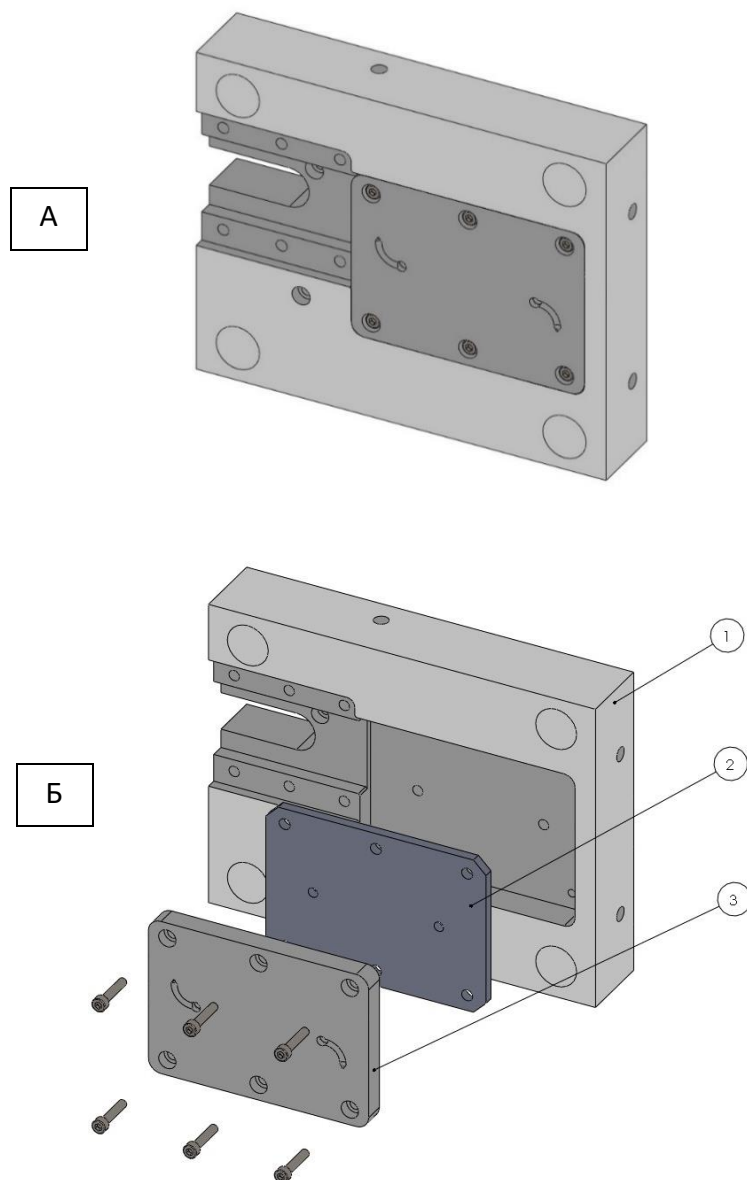
Со оглед на тоа дека габаритните димензии на отворите во алатните плочи од страна А и страна Б на алатот се идентични, при дизајнирање на гравурите се следеа одредени ограничувања. Потребно е поделбената површина на сите гравури да е на иста позиција како кај оригиналниот алат за да не се наруши функцијата на веќе употребената вливна чаура.

Поради ограничената количина на расположлив фотополимерен материјал за изработка на гравурите, примероците за тестирање се избрани да бидат со помали длабочини и гравурите се изработени со помали дебелини од длабочината на отворите. За да се пополни тој простор, се користат алуминиумски потпорни плочи што овозможија да се намалат трошоците за изработка на стереолитографските гравури.



Слика 4.20: Груб приказ на дозволениот работен простор за сместување на гравурите во стереолитографските гравури (Извор: Сопствено истражување)

Секој вметок е прицврстен во гравурата со помош на 6 завртки M5. За да нема контакт помеѓу завртките, секој од отворите е двостепенски за да може да се обезбеди правилно налегнување на контактните површини на алатот. Завртките не треба да се премногу стегнати за да не дојде до појава на пукнатини во гравурите. Земајќи ја позицијата на завртките, корисниот работен простор на секоја од гравурите е околу 102 cm^2 , што е илустрирано на Слика 4.20. Техничките цртежи за сите гравури за кои е дискутирано во овој труд се приложени во Прилог В.



Слика 4.21: Начин на поставување на гравурите во алатните плочи - А: склопен приказ; Б: експлодиран поглед [1. Алатна плоча; 2. Потпорна плоча; 3. Стереолитографски вметок] (Извор: Сопствено истражување)

Дизајн на вливен систем

За конструирање на потребниот вливен систем кај алатните гравури, се користи аналитички метод според кој димензионирањето се врши од вливната порта кон вливната чаура. Притоа се следеа наведените конструктивни чекори:

1. Најпрво се избира тип на вливна порта, што се димензионира според локацијата на вбризгување во гравурата.
2. За првиот разводен канал од портата се усвојува дијаметар: $D = 1,5 \times$ дебелината на делот на локацијата на вбризгање.
3. Потоа се прават корекции за да се земат предвид:
 - a. волуменот на пластична маса што се вбризгува
 - b. должината на разводните канали до гнездото
 - c. вискозноста на материјалот.
4. Врз база на усвоениот дијаметар се пресметуваат и разгранувањата во системот и големината на доводниот канал.
5. Според пресметаната големина на доводниот канал, се избира соодветна вливна чаура.

Корекцијата на дијаметарот на каналите за да се земе предвид волуменот што се вбризгува се прави во однос на времето потребно за полнење на гнездото. Времето на полнење зависи од волуменот на пластична маса и од вискозноста на полимерниот материјал што се користи.

Зголемувањето на дијаметарот на каналите за да се земе предвид вкупната должина на течење на полимерниот материјал се прави според вкупната должина на сите канали, без разлика на бројот на разгранувања, мерено од позицијата на вливната чаура на алатот.

Последната корекција за усвојување на дијаметарот на разводните канали се однесува на вискозноста на полимерниот материјал што се вбризгува. Колку поголема вискозност, толку е поотежнато полнењето на гравурата, особено кога станува збор за потенци геометрии. Од таа причина се следат следните препораки:

1. За нисковискозни материјали - не се прави корекција
2. За средновискозни материјали - дијаметарот се зголемува за 10 %
3. За високовискозни материјали - дијаметарот се зголемува за 20 %

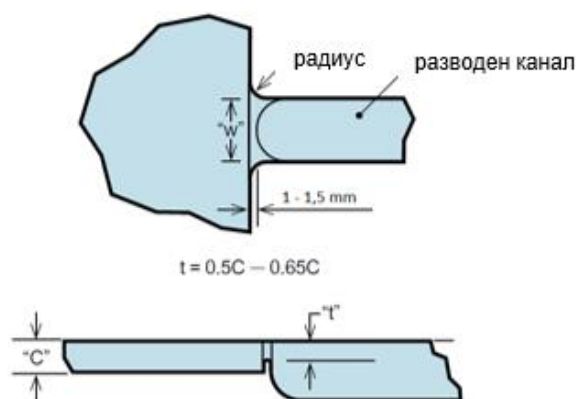
На крај се пресметуваат сите дополнителни разгранувања, вклучувајќи го и доводниот канал во вливната чаура.

Табела 4.7: Пресметка за разводните канали за гравурите за сите делови вклучени во експериментот (Извор: Сопствено истражување)

Димензионирање на разводен канал	Модел 1 	Модел 2 
Дебелина на локација на полнење [mm]	2	2
Дијаметар = дебелина x 1,5 [mm]	3	3
Време на полнење [s]	1	1
% зголемување за време на полнење (од 0 до 95)	0	0
Должина на разводен канал [mm]	22,94	22,94
% зголемување за должина на канали (од 0 до 30)	0	0
Вискозност (ниска, средна, висока)	ABS пластика (средна)	ABS пластика (средна)
% зголемување за вискозност (од 0 до 20)	10	10
Вкупно зголемување на дијаметар [%]	10	10
Коригиран дијаметар на канал [mm]	3,3	3,3
Дијаметар на вливна чаура [mm]	4,2	4,2
Дебелина на рабна вливна порта [mm]	1,1	1,1

Во овој случај пресметката за вливниот систем е само контролна пресметка за да се утврди дали вливната чаура со изработениот жлеб за разводните канали од употребуваниот алат е соодветна за изработка на деловите. Долниот дијаметар (d_4 ,

Слика 4.16) на конусниот канал во вливната чаура на алатот е 6,4 mm, додека вливните канали и соодветниот жлеб во чаурата се со дијаметар 4 mm. Како што може да се види од Табела 4.7, овие големини се поголеми од пресметаните. Препораките од досегашните истражувања за примената на стереолитографски полимерни гравури укажуваат на зголемување на сите сегменти од вливниот систем, што значи дека поголемите димензии во постојниот алат одат во прилог на експерименталните гравури.



Слика 4.22: Конструктивни препораки за рабни вливни порти (Извор: [130])

За сите примероци е избрана рабна вливна порта чии конструктивни препораки се дадени на Слика 4.22. Димензиите на вливната порта се избрани кон горните препорачани вредности за да се обезбеди полесно течење на материјалот во алатното гнездо.

Верификација на процесните параметри со помош на нумерички анализи

Со цел да се воспостави контролна рамка за сите процесни параметри за експерименталните примероци, направени се неколку симулации на полнењето на гнездата. Сите карактеристики за моделот на материјалот што се користи во симулациите се дадени во Табела 8.20 во Прилог С.

Од аспект на самиот процес, следните параметри беа од повисоко значење:

- Време на полнење
- Максимален притисок на вбригување
- Максимална сила на притегање
- Температура на крај на вбригување

- Време на ладење

Резултатите од овие анализи се прикажани на Табела 8.21 до Табела 8.23 во Прилог С за експерименталните делови од сите фази на истражувањето.

4.2.5. Материјали

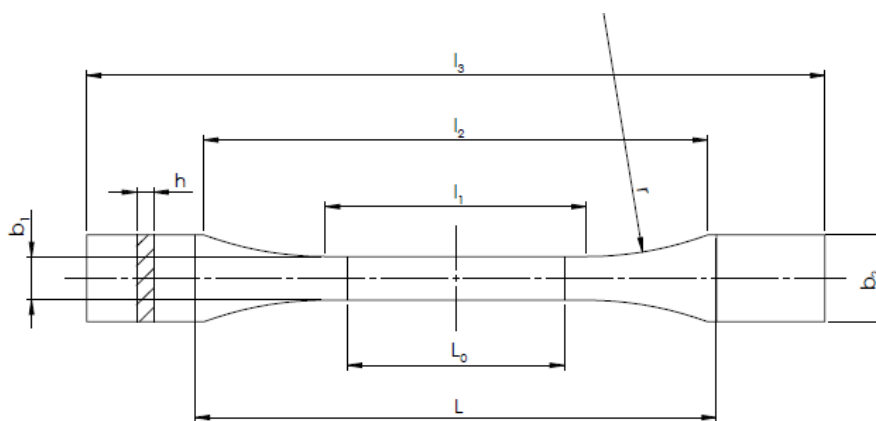
Во следното поглавје се разгледуваат карактеристиките на различните материјали што се користат за експериментите во ова истражување. Ова го вклучува полимерниот материјал што се вбригува, како и техничките информации за материјалите за изработка на стереолитографските гравури. Поконкретни информации за овие материјали може да се најдат во Прилог А.

Полимер што се вбригува

Полимерниот материјал користен во експериментите е ABS 50 од производителот Ghaed Basir Petrochemical. Полимерните гранули се сушат до процент на влажност од $0,02\% \pm 0,02$ пред да се почне со инјекционото вбригување. Дополнителни информации за материјалот може да се најдат од техничките спецификации на производителот дадени во Прилог А. Овој конкретен материјал е избран поради неговата честа примена во индустријата и неговата комерцијална употреба.

4.2.6. Гнездо 1: стандардна епрувета за испитување со истегнување, тип 1BA (според стандардот ISO 527)

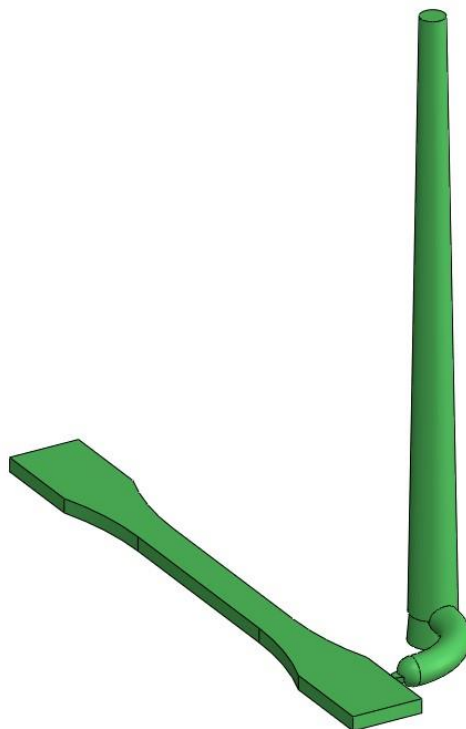
Првиот експериментален модел е избран за да се постигнат две цели во тестот. Прво, овој облик е неопходен за да се направат испитувањата за влијанието на стереолитографската гравура врз механичките карактеристики на делот добиен со инјекционно вбригување. Од оваа причина, е неопходно еден од моделите да биде стандарден примерок за испитување со истегнување. Поради ограничениот работен простор во стереолитографските гравури во кој може да се сместат гнездата (Слика 4.20), избран е примерокот од тип 1BA според ISO 527. Според стандардот, овој примерок е дозволено да се користи кога од кои било други ограничувања не може да се користат стандардните примероци од тип 1A или 1B. Димензиите на овие стандардни епрувети се пропорционално намалени во однос на примероците од тип 1B за фактор од 1:2.



Тип на примерок [mm]		1BA
l_3	вкупна должина	≥ 75
l_1	должина на рамниот тесен дел	$30 \pm 0,5$
r	радиус	≥ 30
l_2	растојание помеѓу глави на епрувета	58 ± 2
b_2	широчина на главите	$10 \pm 0,5$
b_1	широчина кај мерно подрачје	$5 \pm 0,5$
h	дебелина	≥ 2
L_0	мерно подрачје	$25 \pm 0,5$
L	почетно растојание меѓу челусти	$l_2 \cdot 2$

Слика 4.23: Димензии на стандарден примерок 1BA за испитување со истегнување според ISO 527 (Извор: [14])

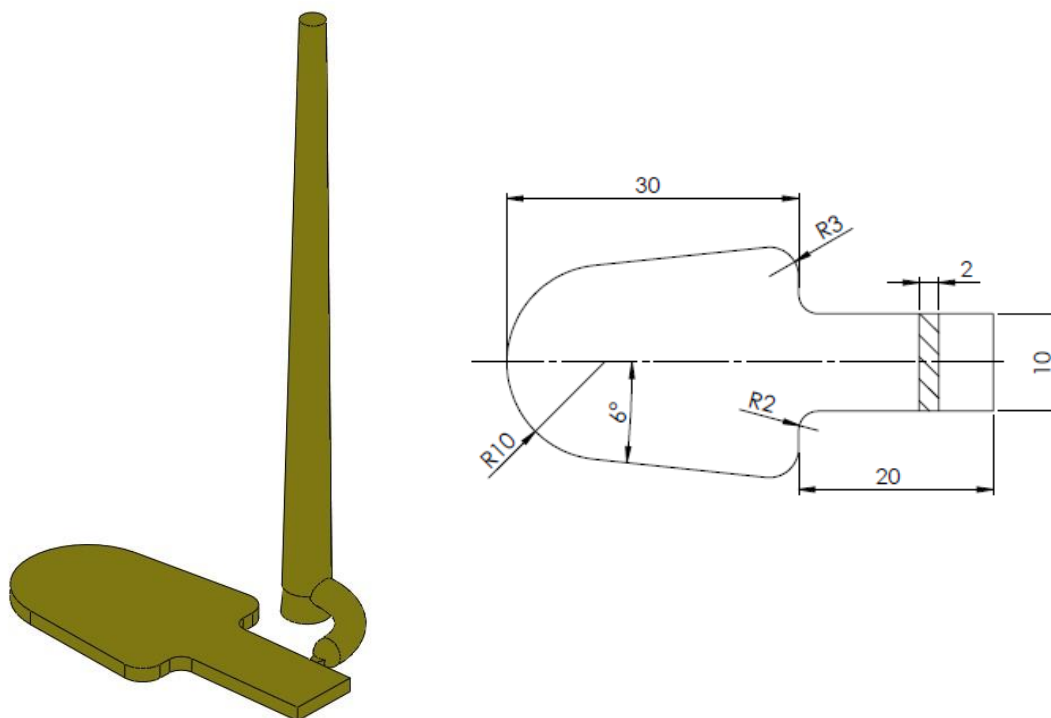
Втората цел што се постигнува со избор на ова парче е да се испитаат геометриските параметри на правоаголни, плочести делови. Геометриските параметри што се следат на овие делови се линиски димензии за вкупната должина, ширината на главите, ширината на мерното подрачје и дебелината на епруветата. Изгледот на овој дел заедно со неговиот вливен систем е даден на Слика 4.24. Технички цртеж на делот, во кој се вклучени локациите за инспекција, е даден во Прилог В.



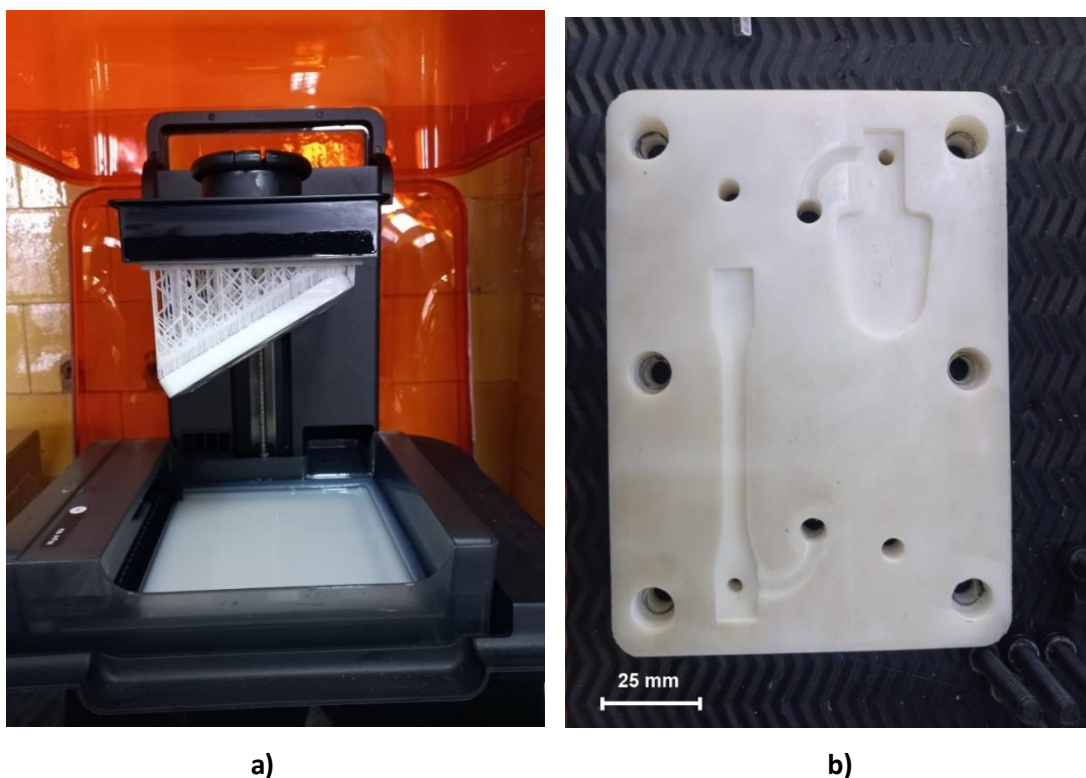
Слика 4.24: Модел 1 со вливниот систем (Извор: Сопствено истражување)

4.2.7. Гнездо 2: трапезоидна плоча со заоблување на горната страна и рабовите на основата

Трапезоидната плоча со радиуси е дизајнирана за следење на отстапувањата во агол и во радиусите на заоблување. Оригиналната конструкција на алатното куќиште и ограничувањето со постојната вливна чаура предизвикаа одредени тешкотии при дефинирањето на позицијата на гнездото во работниот простор. За да се надминат овие ограничувања, иницијалниот трапезен дизајн на моделот е модифициран со додавање дополнителен правоаголен испуст на основата на трапезот за да се овозможи полнење на гнездото во стереолитографската гравура без притоа да мора да се менува ориентацијата на вливната чаура. Покрај радиусите на заоблување и аголот на закосување на краците, се следеа и дебелината на плочката, како и широчината на правоаголниот испуст што е додаден на трапезот. Изгледот на овој дел заедно со неговиот вливен систем е даден на Слика 4.25. Технички цртеж на делот, во кој се вклучени локациите за инспекција, е даден во Прилог В.



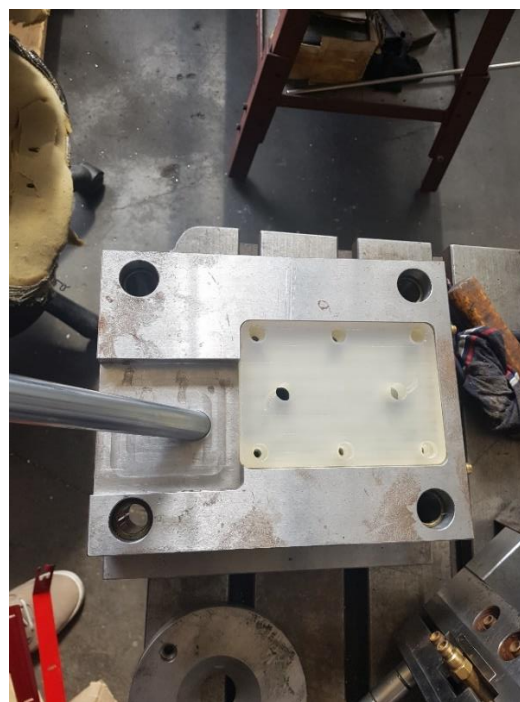
Слика 4.25: Модел 2 со вливниот систем (Извор: Сопствено истражување)



Слика 4.26: Стереолитографска гравура од материјалот Rigid10k; а) по изработката; б) по симнувањето на помошните структури и постпроцесирањето (Извор: Сопствено истражување)



a)

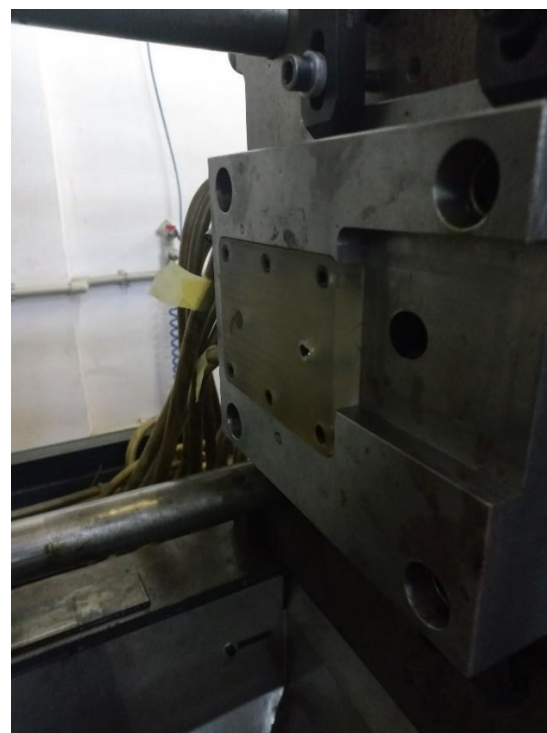


b)

Слика 4.27: Стереолитографски гравури од материјалот High Temp поставени во алатните плочи; а) подвижна половина; б) неподвижна половина (Извор: Сопствено истражување)



a)



b)

Слика 4.28: Стереолитографски гравури поставени во алатот на машината за инјекционо вбригување; а) подвижна половина; б) неподвижна половина (Извор: Сопствено истражување)

4.2.8. Услови за тестирање и мерење

Според стандардите за инјекционо вбригување [131], толеранции од $\pm 5\%$ се прифатливи за дебелина на делови од 0,5 mm ($\pm 0,025$ mm) и $\pm 1\%$ за делови со дебелина од 1,25 mm ($\pm 0,015$ mm). Должините и дијаметрите имаат стандардни толеранции од $\pm 0,5\%$ за должини под 25 mm ($\pm 0,15$) и $\pm 0,25\%$ до 130 mm ($\pm 0,3$ mm).

За да се поедностават мерењата и да се испита најлошото сценарио, на димензиите помали од 50 mm им е доделена толеранција од $\pm 0,1$ mm. На мерењата над 50 mm, им е доделена гранична толеранција од $\pm 0,2$ mm.

4.3. Анализа на механичките карактеристики кај пластичните модели изработени во стереолитографски гравури

Импликацијата од употреба на 3Д-печатени полимерни гравури во процесот на инјекционо вбригување предизвикува некои несакани последици, меѓу кои е и појава на разлики во механичките карактеристики кај произведените пластични модели. Во рамките на овој докторски труд, покрај анализата на димензионалната прецизност на деловите изработени во стереолитографски гравури, една од целите е да се испита и јакоста на вбриганите делови користејќи ја пропишаната јакост на вбриганиот материјал од производителот како референтна вредност за оцена на добиените својства на материјалот.

За сите парчиња изработени во стереолитографските гравури во кои се реализира претходниот експеримент, направен е тест на истегнување според стандардот ISO 527 [13], [14]. На Слика 4.23 се дадени димензиите на користениот 1ВА примерок. За време на тестирањето е следена истата постапка за испитување со истегнување опишана во поглавјето 4.1.1.

За секој примерок се пресметани максималната јачина на истегнување σ_m и релативната максимална деформација ε според изразите дадени во 4.1.1. Секоја вредност и σ - ε дијаграмите од тестовите се евидентирани и зачувани и резултатите од овој тест се дадени во поглавјето 5.3.4.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1. Вовед

Согласно поставените хипотези за реализација на истражувањата во оваа докторска дисертација, направени се експериментални истражувања кои се темелат на Фишеровиот сефакторен модел имајќи ги предвид влезните променливи параметри и нивните нивоа. Користејќи мултирегресиона варијабилна метода, креирани се математички модели за зависноста на јачината на истегнување и максималната деформација од влезните параметри, земајќи ги предвид равенките од глава 3.

Целта на овие истражувања е да се дизајнира експеримент, да се отпечатат примероците на 3Д-печатач и да се моделира и испита влијанието на избраните влезни параметри врз механичките својства и димензиите на примероците за два фотополимерни материјали (HighTemp и Rigid10k).

Понатаму, целта на вториот експеримент е да се евалуира применливоста на стереолитографски гравури во процесот за инјекционо вбризгување со следење на промената на димензиите на деловите што се вбризгуваат во гравури изработени од разгледуваните материјали низ повеќе работни циклуси.

На крај, последните анализи се насочени кон испитување на механичките карактеристики кај пластичните модели изработени во стереолитографските гравури.

5.2. Резултати од испитувањето на влијанието на ориентацијата на моделот на подлогата за градење врз точноста и јачината на истегнување

Во Табела 8.24 и Табела 8.25 се дадени резултатите добиени од првиот експеримент за материјалите HighTemp и Rigid10k што се однесуваат на зависноста на механичките карактеристики во однос на ориентацијата на изработка и постпроцесирањето. Во табелата се дадени вредностите за максималната јачина на истегнување σ_m [MPa] и максималната релативна деформација ε_m [%]. Примероците се групирани по степенот на постпроцесирање („зелени“, УВ постстврднување и УВ + термички третман) и според ориентациите на изработка дадени во Табела 4.4. Под терминот „зелени“ се мисли на примероци директно земени од стереолитографскиот 3Д-печатач без никакво дополнително постпроцесирање.

Во секој од графиконите на интервали во наредните поглавја се користи интервал на доверба (*C.I.* или *Confidance Interval*) од 95 % за средната вредност, што е одличен индикатор за довербата во резултатите од тестот. Тој ни го покажува опсегот во кој со 95 % сигурност можеме да кажеме дека вистинската средна вредност на карактеристиката од материјалот се наоѓа. Тоа значи дека вистинската вредност на карактеристиката од материјалот има шанса од 19:1 да се најде во тој интервал [(19/20) x 100 = 95 %]. Го пресметуваме според релацијата:

$$95\%C.I = \bar{x} \pm t_{0,05} \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$$

каде што:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ — средна вредност}$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \text{ — стандардна девијација}$$

5.2.1. Јачина на истегнување

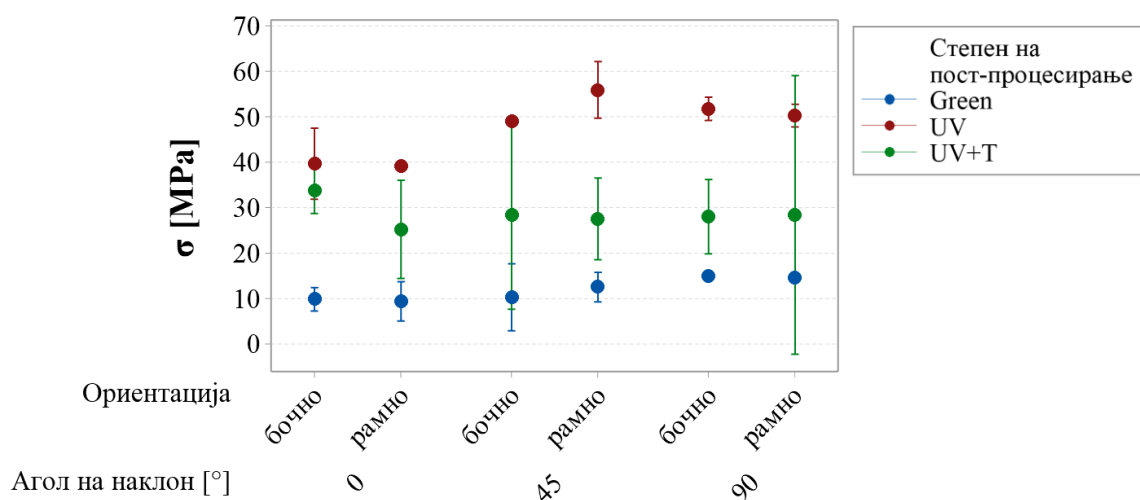
Како што може да се забележи од резултатите во Табела 8.24 и Табела 8.25 од Прилог D, јачината на истегнување кај двата материјали покажува ист тренд кога се разгледува степенот на постпроцесирање. Кај двата разгледувани фотополимерни материјали јачината на истегнување се зголемува кога материјалот е изложен на постпроцесирање со УВ-постстврднување. Кога материјалите потоа дополнително термички се третираат за да може да ја добијат максималната отпорност на температура, во двата случаи се забележува пад на измерената максимална јакост. Од двата испитувани материјали, јакоста на материјалот HighTemp е особено осетлива на степенот на постпроцесирање на испитуваните примероци. Оваа појава може да се објасни на неколку начини:

- a) Континуираната изложеност на УВ-светлина овозможува раст на полимерните синџири, зголемувајќи ја просечната молекуларна тежина на материјалот. Поголемата молекуларна тежина често се поврзува со подобрени механички својства и издржливост.
- b) Полимерната мрежа може да има региони со помала густина и помалку вкрстени врски. Реакциите на вкрстено поврзување доведуваат до меѓусебно подобро поврзана полимерна мрежа. Оваа зголемена густина придонесува за подобрување на јачината на материјалот, цврстината и стабилноста на димензиите.
- c) Изложеноста на дополнителна УВ-светлина ја олеснува понатамошната полимеризација на преостанати мономери. Со намалувањето на присуството на нереагирани мономери се придонесува кон подобрена стабилност на материјалот.

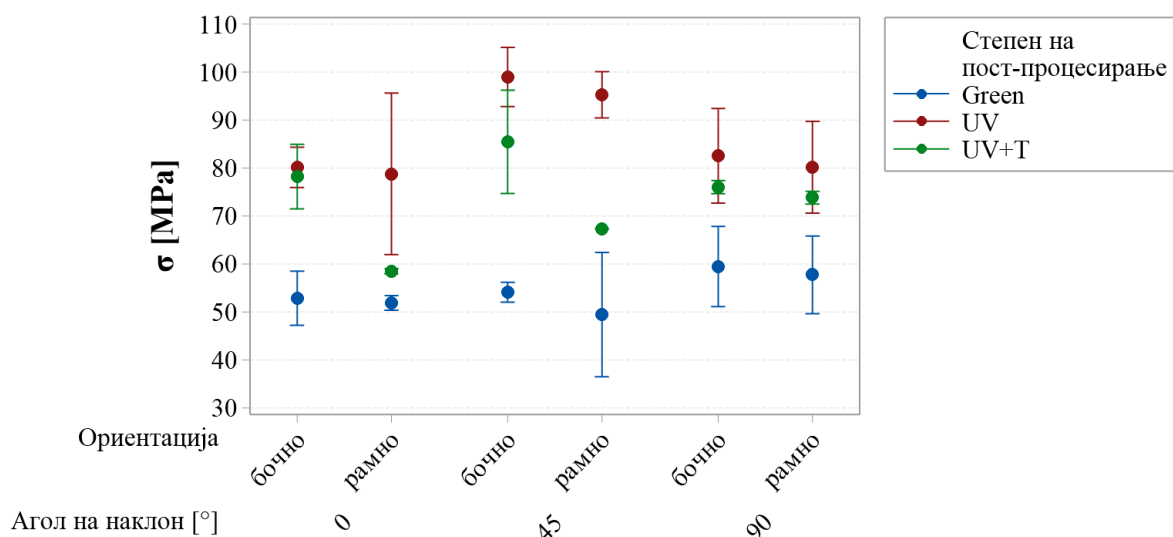
Доколку се разгледа просечната вредност за максималната јакост кај примероците независно од нивната ориентацијата, кај фотополимерот HighTemp при постпроцесирање со УВ-постстврднување се забележува зголемување на јакоста од 303,8 %, од 11,15 МПа на 45,02 МПа. Откако овој материјал термички ќе се третира, измерената јакост се намалува за 37,87 %, од 45,02 МПа на 27,97 МПа.

Кај фотополимерот Rigid10k разликите во јакоста помеѓу различните степени на постпроцесирање го следат истиот тренд, меѓутоа, не се толку големи како кај HighTemp материјалот. Кај примероците изработени од Rigid10k при постпроцесирање со UV-постстврднување се забележува зголемување на јакоста од 59,28 %, од 53,17 МПа на 84,69 МПа, во однос на „зелената“ состојба. По термичкиот третман, измерената јакост кај овој материјал се намалува за 27,29 %, од 84,69 МПа на 61,58 МПа.

Разликите помеѓу јакоста кај двата материјали измерени според примероците изработени со различни ориентации, на различни степени на постпроцесирање и под различен агол на наклон графички се прикажани на Слика 5.1 и Слика 5.2.



Слика 5.1: Графикон на интервал на одсив за јачината на истегнување кај материјалот High Temp (Извор: [118])



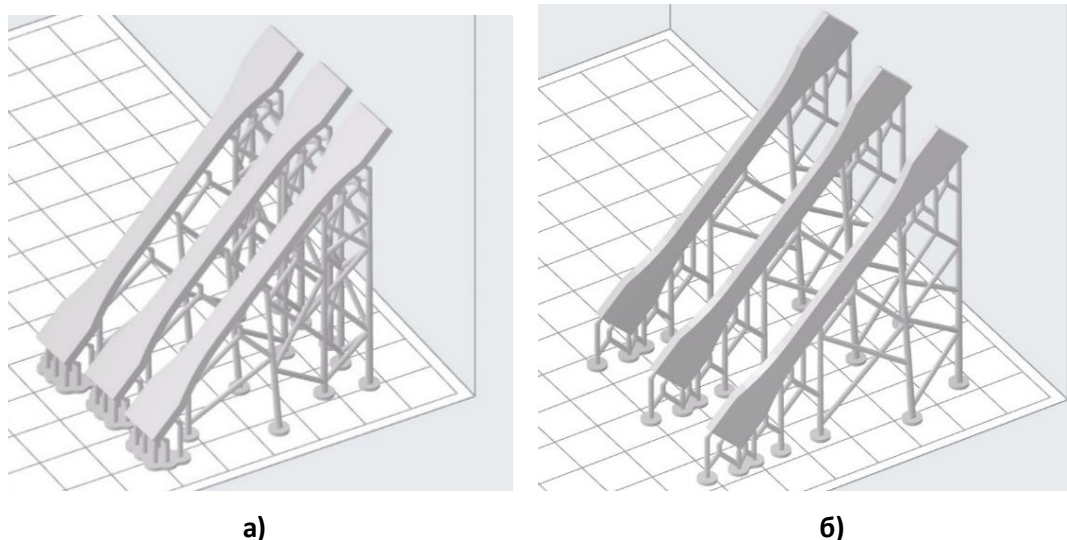
Слика 5.2: Графикон на интервал на одсив за јачината на истегнување кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

Од овие графикони може да се забележи дека материјалот High Temp има пониска јачината на истегнување споредено со Rigid10k по сите ориентации, што беше и очекувано од спецификациите од производителот ([11, 12, 90]).

Во однос на измерените вредности, кај материјалот High Temp за сите различни ориентации примероците покажаа јачина на истегнување пониска од онаа пропишана од самиот производител. Примероците доработени со UV-постстврднување се најблиску до пропишаната јакост, но пак имаа просечна јакост помала за 2,4%.

Од друга страна, примероците изработени од фотополимерот Rigid10k покажаа значително подобри резултати. Примероците во „зелена состојба“ имаа јакост блиска до пропишаната од 55 MPa [12]. По UV-постстврднувањето, јакоста на примероците од сите различни ориентации ја надмина вредноста од 65 MPa дадена од производителот. Во конфигурациите каде што аголот на наклон на примероците е 45°, измерената јакост е повисока од вредностите дадени од производителот за 49,91% и 47,45% соодветно.

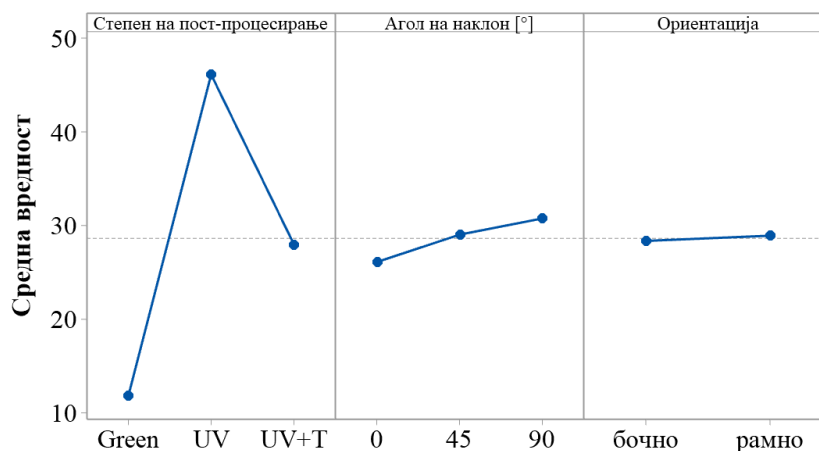
Што се однесува до примероците што се дополнително термички третирани, бочните ориентации со агли на наклон од 0° и 90° покажаа малку пониска јакост од пропишаната, додека кај примероците изработени под агол од 45° повторно е измерена највисока јакост.



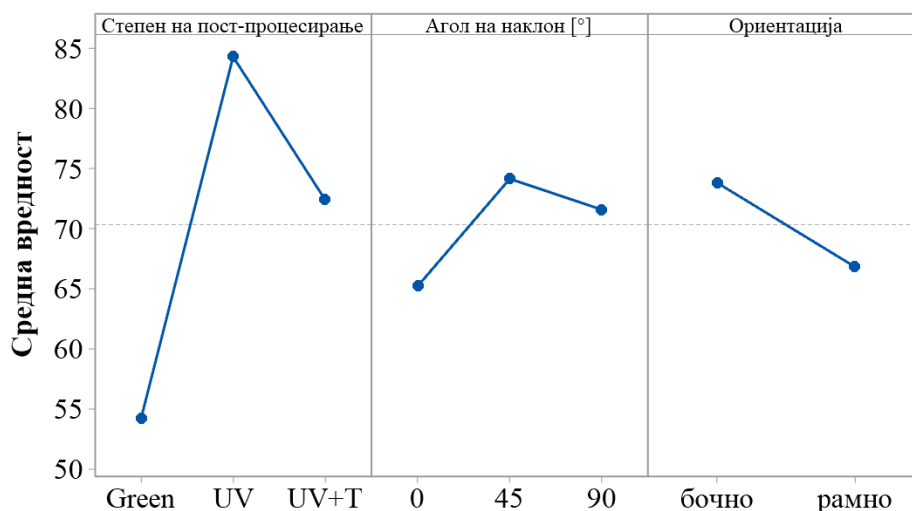
Слика 5.3: Ориентација на примероци со највисока измерена јачина на истегнување σ_m
 а) Ориентација под агол од 45° (рамно)
 б) Ориентација под агол од 45° (бочно)
 (Извор: Сопствено истражување)

Што се однесува до разликите во јакост поврзани со ориентацијата, се забележува дека за двата различни фотополимери, стандардните епрувети отпечатени рамно под агол од 45° покажуваат највисоки механички карактеристики. Меѓутоа, дополнителното термичко третирање кај фотополимерот HighTemp со кое се добива највисока топлотна отпорност значително ги намалува механичките карактеристики на добиениот дел.

На Слика 5.4 и Слика 5.5 се дадени графикони кои ги покажуваат индивидуалните влијанија на факторите врз одзивот за јачината на истегнување кај двата испитувани материјали.



Слика 5.4: Графикон на индивидуални влијанија на факторите врз одзивот за јачината на истегнување кај материјалот High Temp (Извор: [118])



Слика 5.5: Графикон на индивидуални влијанија на факторите врз одзивот за јачината на истегнување кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

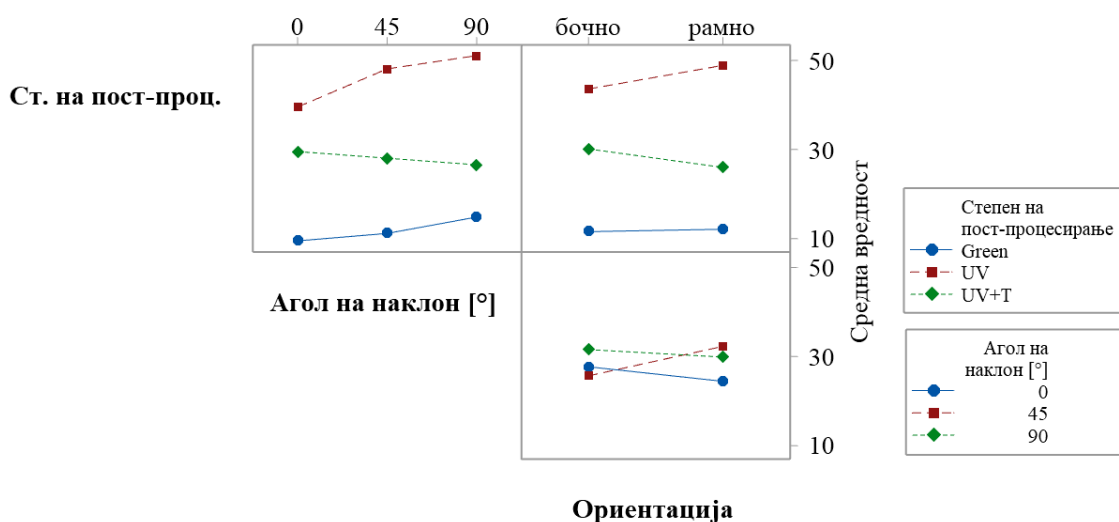
Во однос на степенот на постпроцесирање, идентична зависност има кај двата фотополимери. Во „зелена“ состојба е измерена најниска средна вредност за максималната јакост. По постпроцесирањето со УВ-светлина јакоста расте, а по дополнителното термичко третирање опаѓа. Овој термички третман е препорачан од страна на производителот за подобрување на издржливоста на материјалот на повисоки температури. Меѓутоа, термичката обработка може да предизвика промени во морфологијата на материјалот, менувајќи ги неговите кристални или аморфни области. Овие промени не секогаш резултираат со подобрени механички својства. Прекумерната топлина некогаш може да доведе и до термичка деградација на полимерните синџири, што може да резултира со намалување на вкупната јачина на материјалот.

Во однос на аголот на наклон, кај материјалот HighTemp имаме речиси линеарна зависност на големината на аголот со јачината на истегнување што континуирано расте низ последователните степени на постпроцесирање. Ова не е случај кај материјалот Rigid10k, каде што јакоста расте штом материјалот се постпроцесира со УВ-светлина, а потоа незначително опаѓа штом се подложи на термички третман.

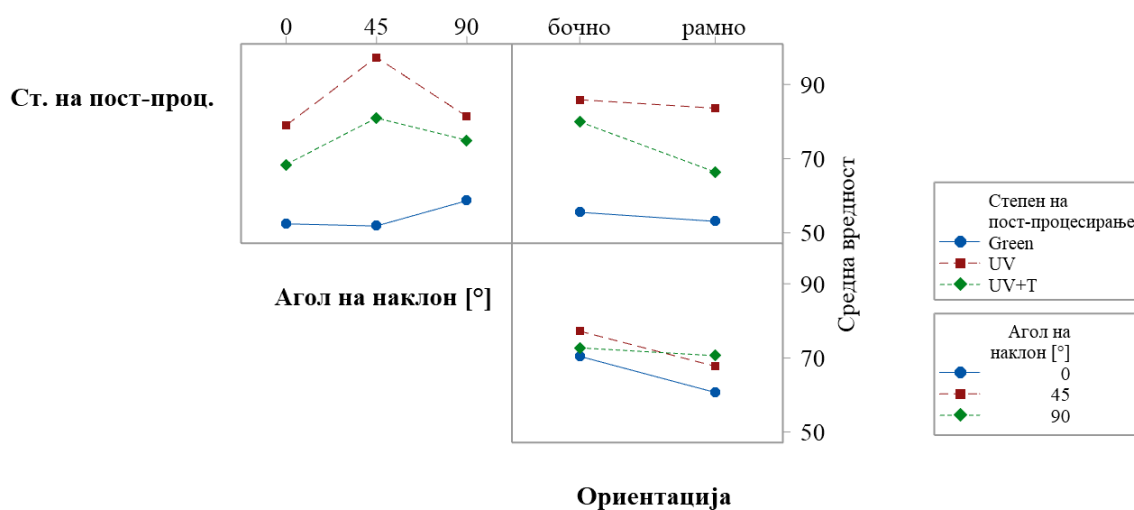
Во однос на ориентацијата, кај материјалот HighTemp овој фактор речиси и да нема никакво влијание врз јакоста. Кај Rigid10k материјалот, за бочната ориентација во просек е измерена повисока јакост за 13% во споредба со рамната ориентација. Тоа значи дека

во понатамошното математичко моделирање на зависностите врз јакоста, факторот ориентација ќе биде разгледуван само за материјалот Rigid10k.

На Слика 5.6 и Слика 5.7 се претставени графикони каде што се гледаат меѓусебните интеракции помеѓу влијанијата на факторите врз одзивот за јачината на истегнување кај испитуваните материјали.



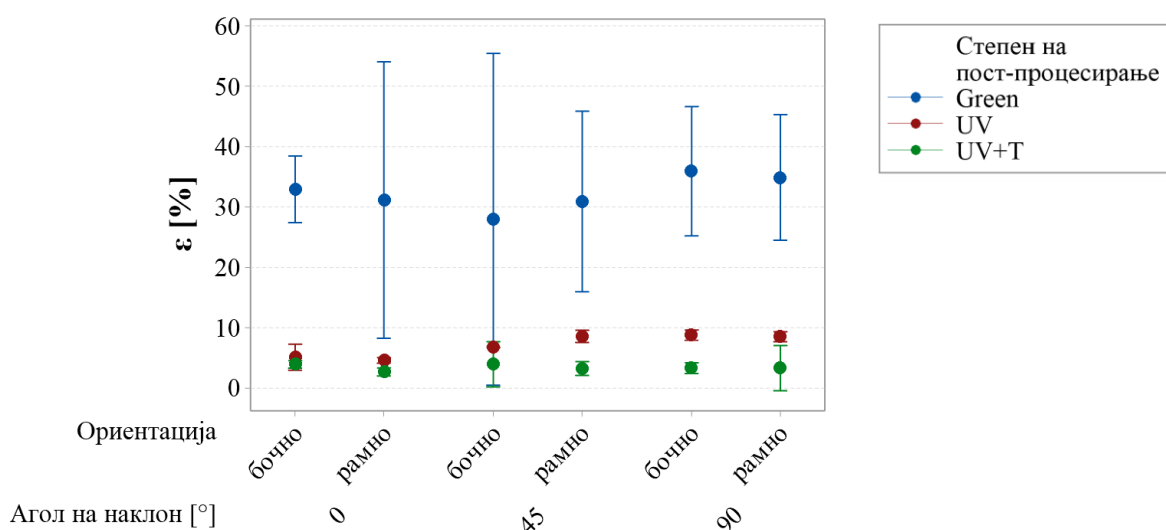
Слика 5.6: Графикон на влијанијата на факторите врз одзивот со интеракции за јачината на истегнување кај материјалот High Temp (Извор: [118])



Слика 5.7: Графикон на влијанијата на факторите врз одзивот со интеракции за јачината на истегнување кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

5.2.2. Релативна деформација

Во однос на релативната деформација, кај двата материјали се забележани различни трендови што се прикажани на графиконите на Слика 5.8 и Слика 5.12. Кај материјалот High Temp по секоја наредна фаза на постпроцесирање е забележано намалување на максималната релативна деформација. Како што може да се види и од приложените $\sigma - \varepsilon$ дијаграми на Слика 5.9, Слика 5.10 и Слика 5.11, High Temp материјалот во „зелена“ состојба има исклучително висока еластичност и се однесува многу слично како еластомер, но по првата фаза на постпроцесирање станува значително покрут. Од таа причина, на Слика 5.8 вредностите на одзивот на релативната деформација имаат многу висока стандардна девијација кај непостпроцесираните „зелени“ примероци.

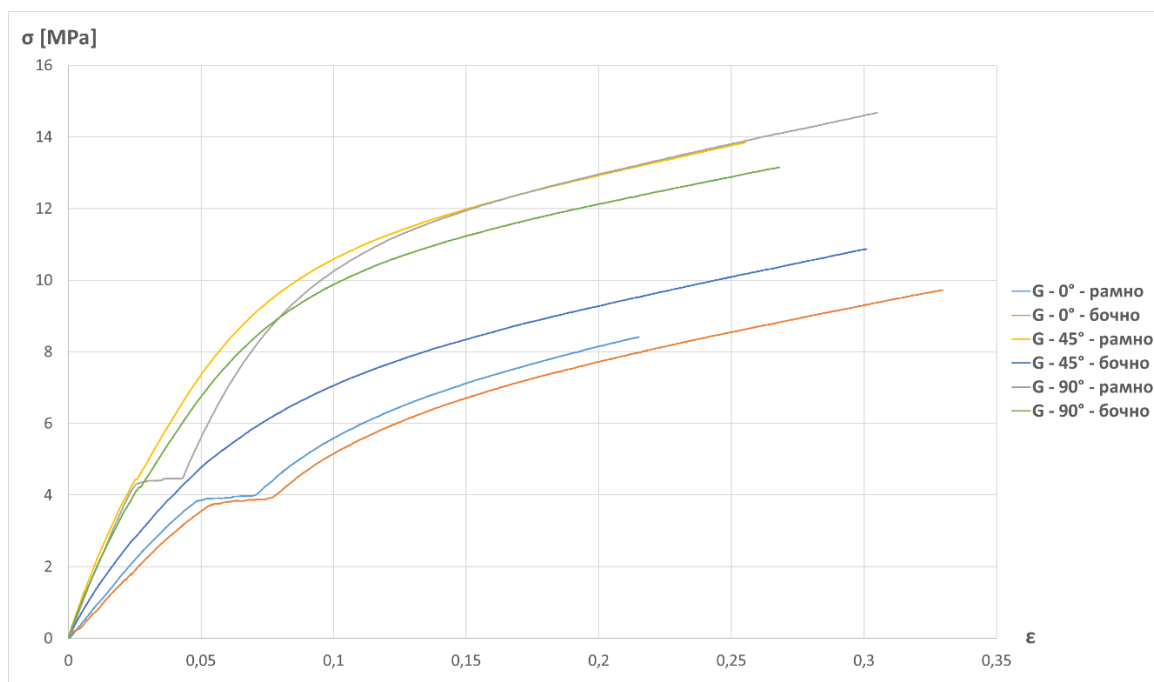


Слика 5.8: Графикон на интервал на одзив за релативната деформација кај материјалот High Temp (Извор: [118])

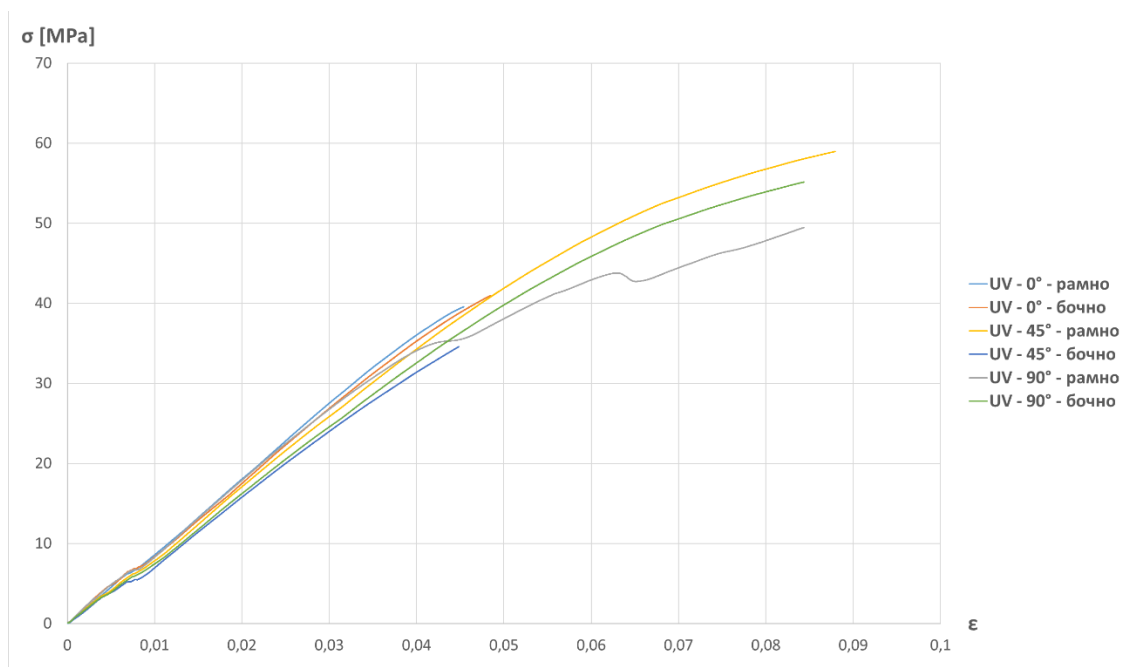
Максималната деформација за сите ориентации кај примероците за материјалот Hightemp во просек се намали за 80 % по УВ-постстврднувањето и дополнително намалување од 40 % е забележано по дополнителното термичко третирање.

Ако материјалот веќе претрпел големо вкрстено поврзување за време на процесот на УВ-стврднување, дополнителна термичка обработка може да предизвика прекумерно вкрстено поврзување во мрежата на полимерниот материјал. Премногу

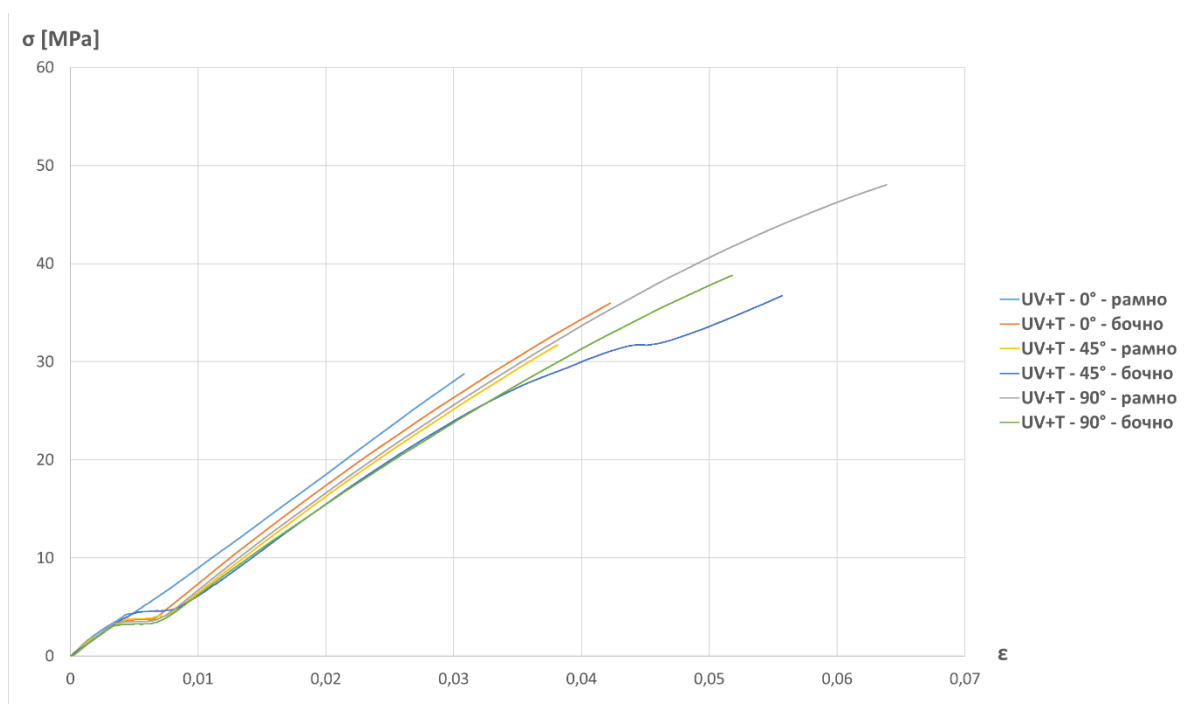
вкрстени врски може да доведат до кршливост, бидејќи материјалот станува помалку способен да се деформира и да апсорбира енергија.



Слика 5.9: Сумарен σ - ϵ дијаграм од „зелените“ примероци изработени на различни ориентации - материјал HighTemp (Извор: Сопствено истражување)



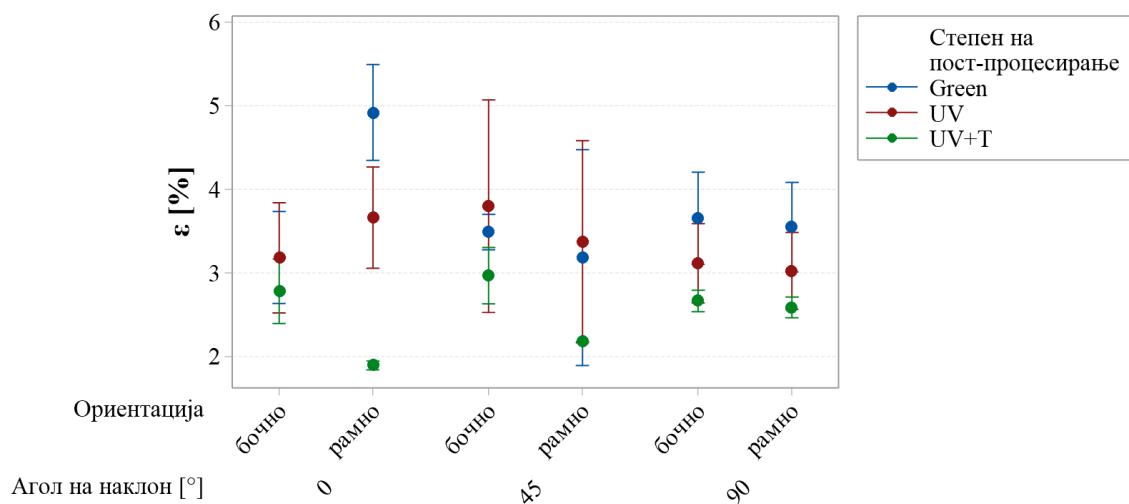
Слика 5.10: Сумарен σ - ϵ дијаграм од примероци третиран со УВ-светлина и изработени на различни ориентации - материјал HighTemp (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.11: Сумарен σ - ϵ дијаграм од примероци третирани со UV-светлина и термичко постпроцесирање и изработени на различни ориентации - материјал HighTemp (Извор: Сопствено истражување)

Единствено во „зелената“ фаза кај HighTemp материјалот е регистрирана пластична деформација. Откако врз фотополимерот е извршено какво било постпроцесирање, од $\sigma - \epsilon$ дијаграмите се забележува дека ломот настанува во непосредна близина на границата на еластичност поради зголемената крутост.

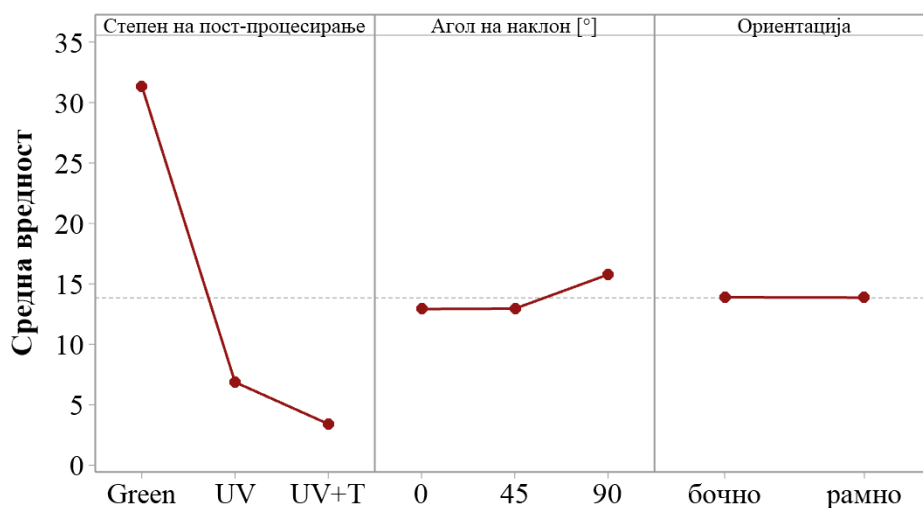
За разлика од HighTemp фотополимерот, кај материјалот Rigid10k е забележана значително поголема крутост и во „зелената“ состојба и по иницијалното постпроцесирање со UV-постстврднување се добиени различни резултати кај примероците изработени со различни ориентации. Кај рамната и бочната ориентација со агли на наклон од 0° и 90° регистрирано е просечно намалување на вкупната деформација за 18 %, додека кај ориентациите (рамно и бочно) со агли на наклон од 45° регистрирано е зголемување од 19,4% и 3% соодветно.



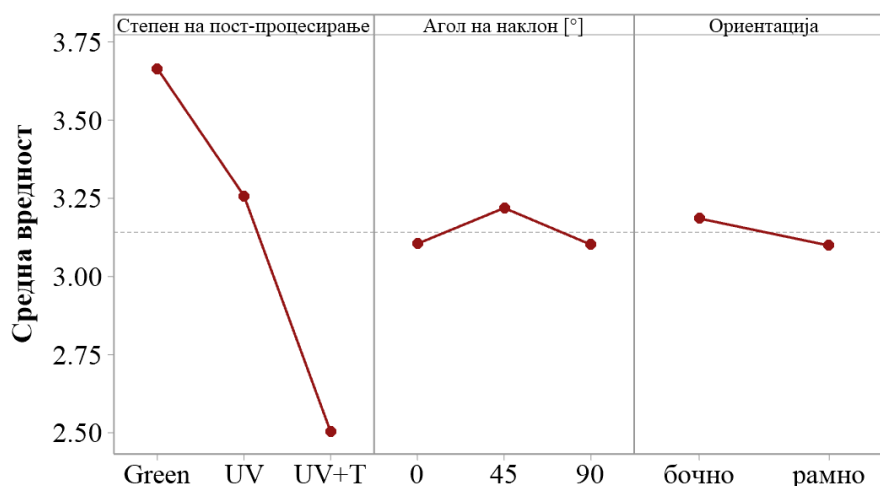
Слика 5.12: Графикон на интервал на одзив за релативната деформација кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

Ова доведува до заклучокот дека слично како максималната јачина на истегнување, и вкупната деформација е до одреден степен зависна од ориентацијата на деловите на подлогата за време на печатењето, меѓутоа, оваа појава е различна за двата материјали.

На Слика 5.13 и Слика 5.14 се дадени графикони кои ги покажуваат индивидуалните влијанија на факторите врз одзивот за јачина на истегнување кај двата испитувани материјали.



Слика 5.13: Графикон на индивидуални влијанија на факторите врз одзивот за релативната деформација кај материјалот High Temp (Извор: [118])



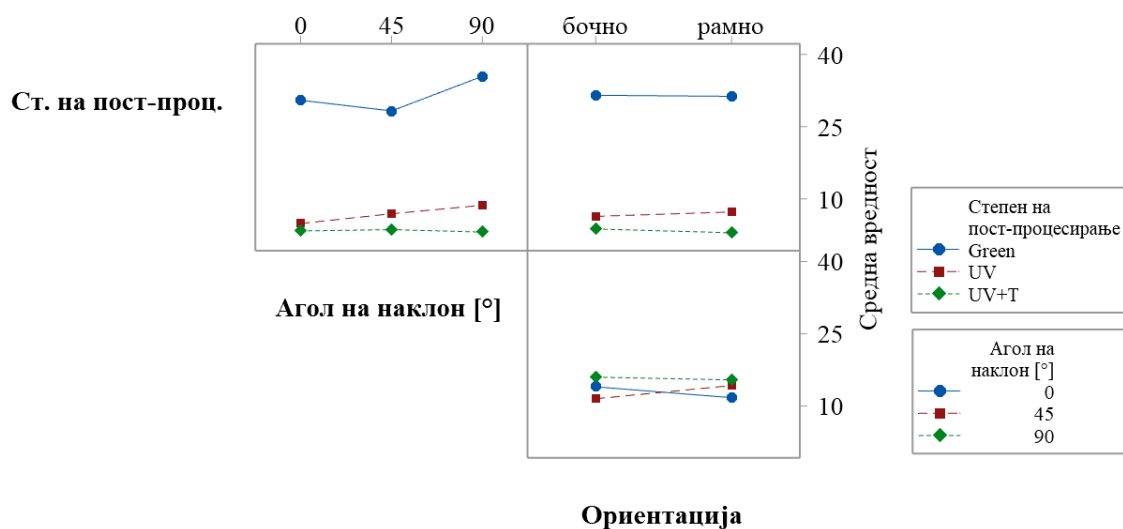
Слика 5.14: Графикон на индивидуални влијанија на факторите врз одзивот за релативната деформација кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

Од овие графикони се гледа дека за материјалот Rigid10k, разликите во измерените вредности за влијанијата на факторите се многу мали. Иако може визуелно да се види интеракција меѓу факторите, сепак, промената на средната вредност е многу мала за да биде значајна. Причината за оваа појава е тоа што материјалот Rigid 10k е исклучително крт и оваа особина се задржува низ сите 3 различни степени на постпроцесирање. Поради овие резултати, нема да се направи математичко моделирање на релативната деформација за материјалот Rigid10k.

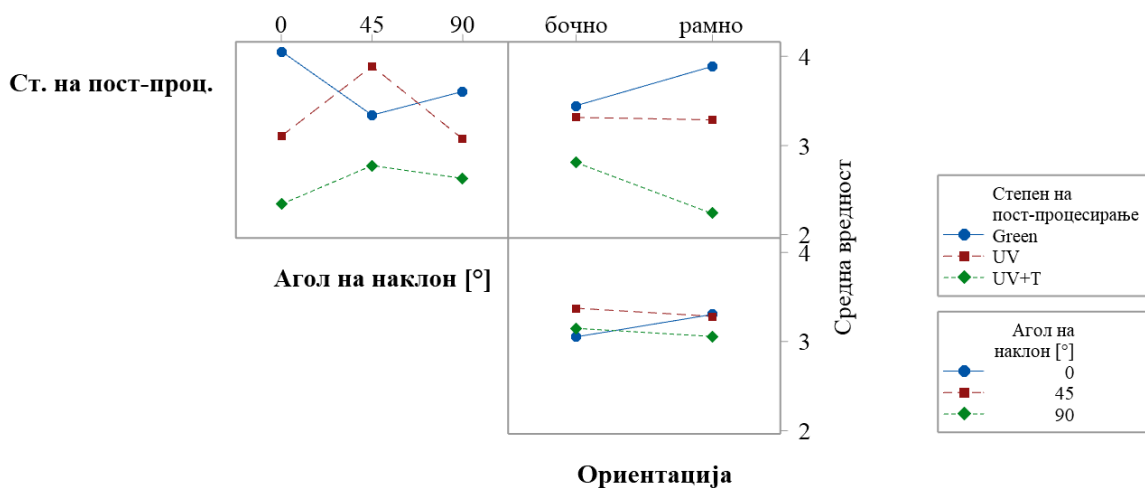
Материјалот HighTemp, од друга страна, е исклучително еластичен во неговата претпроцесирана, „зелена“ состојба, што резултира со поголеми промени за средните вредности за релативната деформација со промена на степенот на постпроцесирање. Понатаму, кај аголот на наклон исто така има значителна зависност. Разликите помеѓу аголот на наклон од 0° и 45° се многу мали, меѓутоа, измерена е поголема разлика за аголот на наклон од 90°, што доведува до зголемување на релативната деформација кај примероците.

Тоа значи дека зависноста помеѓу влезните променливи и релативната деформација кај материјалот High Temp може математички да се моделира бидејќи добиените средни вредности за зависноста на степенот на постпроцесирање и аголот на наклон се со значително поголема меѓусебна разлика.

На Слика 5.15 и Слика 5.16 се претставени графикони каде што се гледаат меѓусебните интеракции на влијанијата на факторите врз одзивот за релативната деформација кај испитуваните материјали.



Слика 5.15: Графикон на влијанијата на факторите врз одзивот со интеракции за релативна деформација кај материјалот High Temp (Извор: [118])

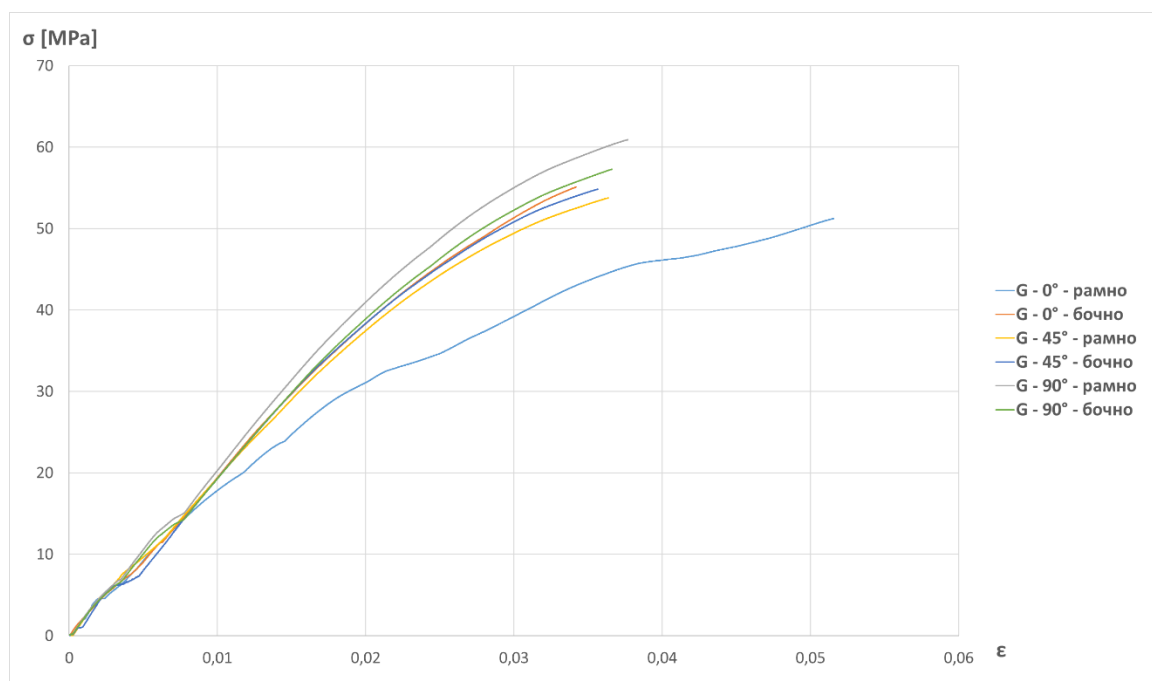


Слика 5.16: Графикон на влијанијата на факторите врз одзивот со интеракции за релативна деформација кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

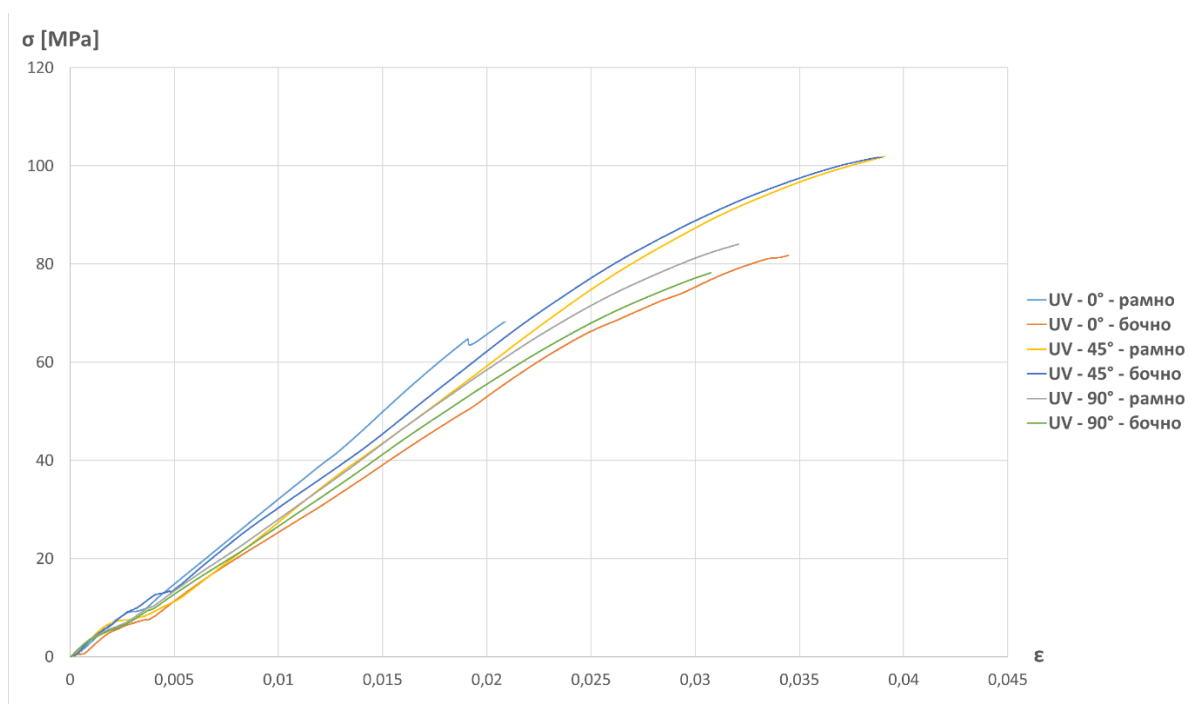
Со анализа на добиените $\sigma - \varepsilon$ дијаграми може да се забележи дека кај нетретираниите „зелени“ примероци од материјалот Rigid10k се појавува мала пластична деформација и овој облик на кривите се задржува и кај примероците што се третирани

со UV-постстврднување (Слика 5.17 и Слика 5.18). Кај примероците што се третирани и термички, дијаграмите добиваат линиски облик, што значи дека таму веќе не се појавуваат пластични деформации (Слика 5.19).

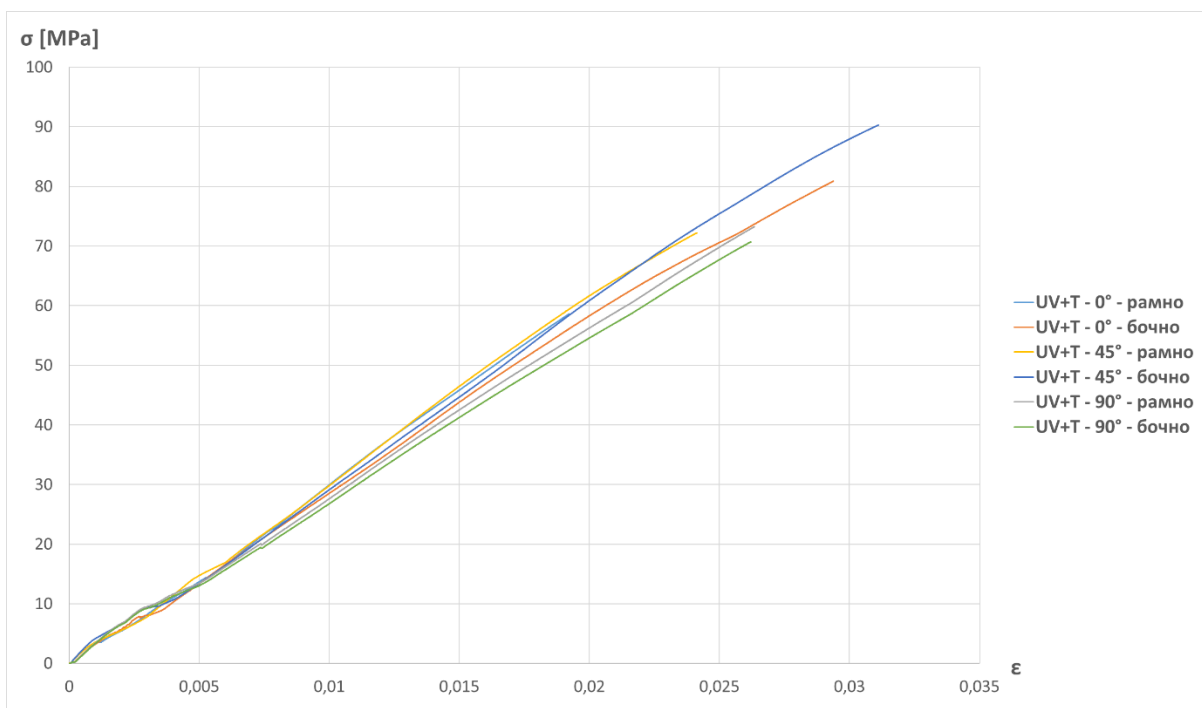
Зголемената крутост при стврднувањето првенствено се припишува на хемиските реакции што се случуваат за време на процесот на фотополимеризација, каде што се забележува раст на полимерните синџири, што доведува до зголемување на просечната молекуларна тежина на материјалот. Поголемата молекуларна тежина често се поврзува со поголема цврстина на материјалот, меѓутоа, прекумерното вкрстување може да го направи материјалот покршлив и склон кон фрактури.



Слика 5.17: Сумарен σ - ϵ дијаграм од „зелените“ примероци изработени на различни ориентации - материјал Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.18: Сумарен σ - ϵ дијаграм од примероци третиран со УВ-светлина и изработени на различни ориентации - материјал Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.19: Сумарен σ - ϵ дијаграм од примероци третиран со УВ-светлина и термичко постпроцесирање и изработени на различни ориентации - материјал Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

5.2.3. Добивање регресиони равенки за моделирање механички карактеристики кај материјалот High Temp

Во регресионите анализи за материјалот High Temp се моделираат и јачината на истегнување и релативната деформација. Притоа, во двата случаи се разгледува линеарен модел од прв степен бидејќи таква зависност е добиена од интеракциите на графиконите дадени на Слика 5.4, Слика 5.5, Слика 5.6 и Слика 5.7.

5.2.3.1. Модел за јачината на истегнување (HighTemp)

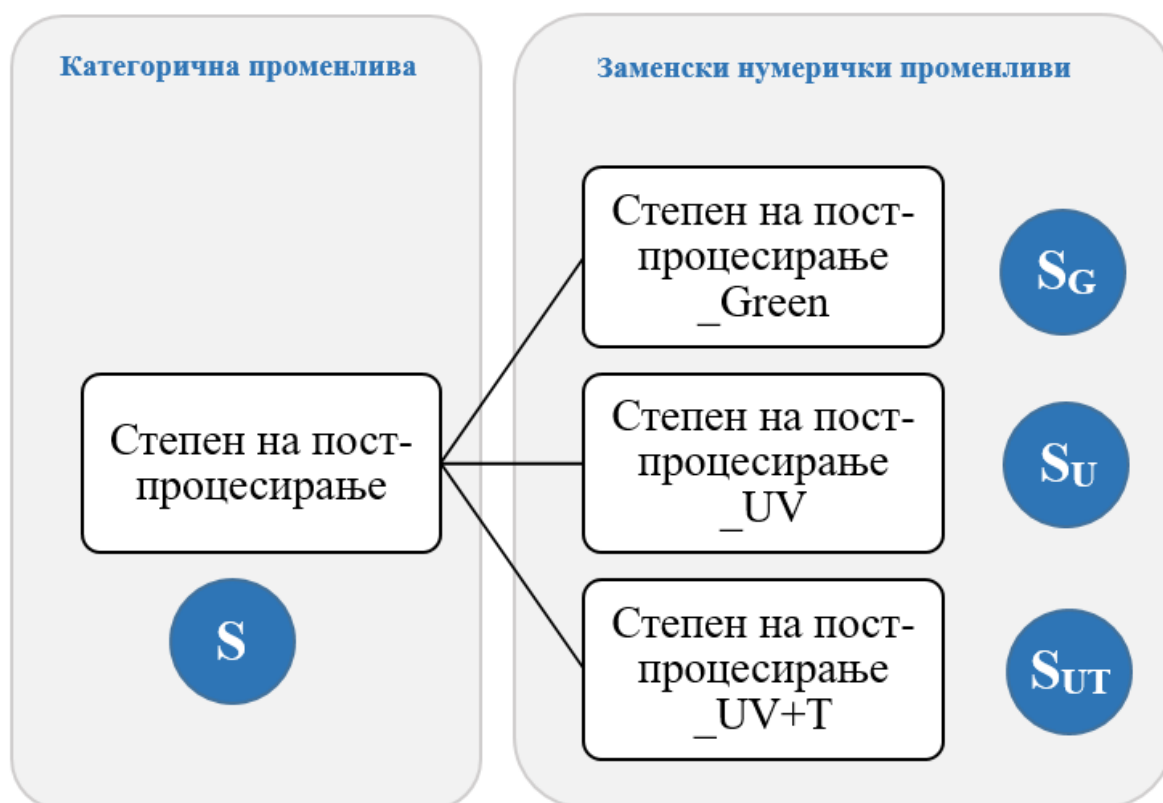
Од ANOVA анализата се заклучува дека ориентацијата нема статистичко значајно влијание врз промената на одзивот σ , додека степенот на постпроцесирање и аголот на наклон се статистички значајни. Тоа се согледува од нивната p -вредност, која е над алфа = 0,05 што е ниво на значајност (significance level) за да се одбие нултата хипотеза. Ниската F -вредност дополнително го потврдува ова.

Се креира линеарен модел на прв степен со влезови, степен на постпроцесирање и агол на наклон, а за проверка на точност на моделот ќе се користи R^2 .

Табела 5.1: Ниво на значајност на факторите според ANOVA анализата за јачината на истегнување кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Фактор	F - вредност	p – вредност
Агол на наклон	12.40	0.001
Степен на постпроцесирање	242.26	0.000
Ориентација	0.15	0.701

Со цел да се спроведе регресиона анализа, бидејќи степен на постпроцесирање е категорична променлива, таа се декодира со користење заменски променливи во континуирана променлива. За секоја можна вредност на категориската променлива, се создава посебна заменска променлива. За факторот „степен на постпроцесирање“ со можност за „green“, „UV“, „UV+T“, се создадени три заменски променливи: „green“, „UV“, „UV+T“.

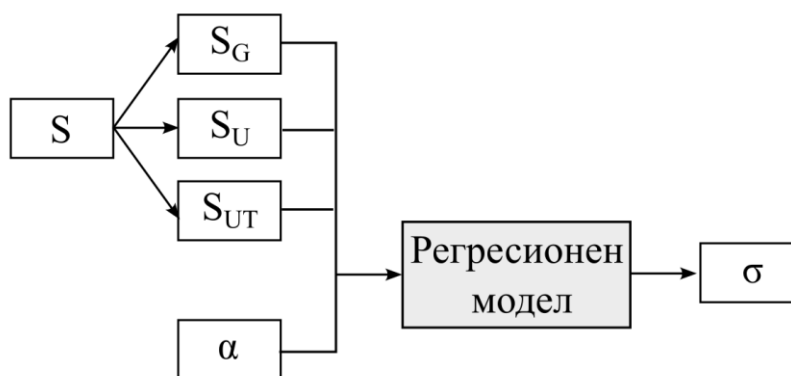


Слика 5.20: Шема за начин на декодирање на категоричната променлива S во три нумерички заменски променливи SG , SU и SUT , кои можат да имаат вредности само 0 или 1 (Извор: Сопствено истражување)

SG , SU и SUT можат да примат вредност или 0 или 1, при што секогаш кога една од нив е 1, останатите две ќе бидат еднакви на 0. Со оваа метода на креирање заменски променливи, категоричната променлива S се претставува како нумеричка променлива и може да се користи во регресиона анализа.

За секој внес на податоци, соодветната заменска променлива се поставува на 1 ако внесот соодветствува на таа вредност или на 0 ако не соодветствува. На пример, ако степенот на постпроцесирање е green, тогаш соодветната заменска променлива за green ќе биде еднаква на 1, а другите две - UV и UV+T ќе бидат еднаков на 0.

Откако се создадени заменски променливи за категорискиот фактор, тие се вклучени како нумерички влезни променливи во регресионата анализа. Ова овозможува на регресионата анализа, моделот да ги користи овие категориски информации за да ја предвидува зависната променлива. Аголот на наклон во регресиониот модел е означен со α .



Слика 5.21: Шема на регресиониот модел за јачината на истегнување кај материјалот HighTemp (Извор: Сопствено истражување)

Бидејќи за S_G (степен green) коефициентот е 0, тоа значи дека таа заменска променлива се зема како референтна (baseline) и таа променлива ќе биде користена како основа за споредба со другите заменски променливи.

Табела 5.2: Коефициенти на регресионен модел за σ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Term	Coef	Standard Error of Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9.38	1.35	6.95	0.000	
Агол на наклон [°]	0.06	0.02	3.56	0.001	1.00
Степен на постпроцесирање					
UV	34.84	1.57	22.22	0.000	1.33
UV+T	16.68	1.52	10.96	0.000	1.34

Високата T-вредност над нивото на значајност од 1,96, заедно со ниската P-вредност под нивото на значајност од 0,05, покажува јака и статистички значајна врска помеѓу променливите и зависната променлива и промени во оваа променлива имаат значително влијание врз зависната променлива.

Од табелата се воочува VIF вредноста блиска до 1. Кога варијанса на инфлација на факторите (VIF) кај регресиониот коефициент е еднаква или блиска до 1, тоа значи дека нема мултиколинearност меѓу таа независна променлива и другите независни

променливи во регресиониот модел и може да се смета за статистички независна во моделот. Мултиколинеарноста се појавува кога две или повеќе независни променливи во регресиониот модел се во висока корелација, при што VIF вредноста е над 5, што го прави тешко да се одреди уникатниот придонес на секоја променлива за објаснување на варијабилноста во зависната променлива. Кај VIF вредности блиску до 1, мултиколинеарноста на претставува проблем.

Според тоа, регресионата равенка со кодирани променливи за зависноста на максималната јачина на истегнување од аголот на наклон α и степенот на постпроцесирање гласи:

$$\sigma [MPa] = 9,38 + 0,06 \cdot \alpha + 34,84 \cdot S_U + 16,68 \cdot S_{UT} + 0 \cdot S_G$$

Овој регресионен модел ја опишува зависноста меѓу факторите и одзивот со точност од 91,95 %. Методот на оцена на точноста е R^2 или коефициентот за детерминација што како мерка во регресиониот модел ја одредува пропорцијата на варијанса во зависната променлива што може да се објасни со независната променлива.

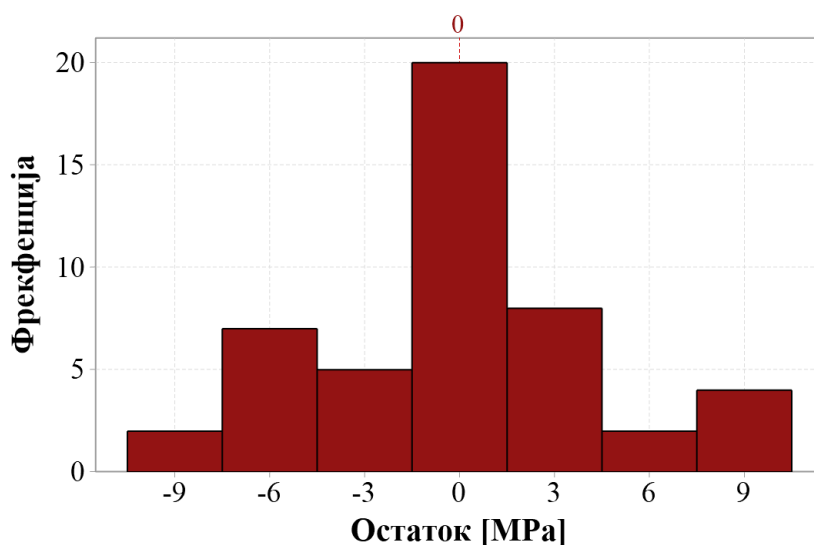
Од коефициентите во регресионата равенка се забележува дека најголемо влијание врз јакоста на материјалот има неговиот степен на постпроцесирање. Аголот на наклон се движи од 0° до 90° , па тој член во најдобар случај би имал вредност од 5,328, што има значително помал удел во споредба со коефициентите што одговараат за двата степени на постпроцесирање.

Табела 5.3: Статистички параметри за проверка на точност на модел за σ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

S	R^2	R^2 (adj)	R^2 (predictive)
4.36	91.95%	91.40%	90.50%

На Слика 5.22 е даден хистограмот на остатоци/грешки што претставуваат разлика во апсолутна вредност меѓу вистинската и моделираната вредност на јакоста на истегнување на материјалот. Ако во општ случај, хистограмот покажува дека случајната грешка не е нормално распределена, тоа сугерира дека основните претпоставки за моделот можеби се прекршени. Во овој случај, хистограмот ни покажува дека

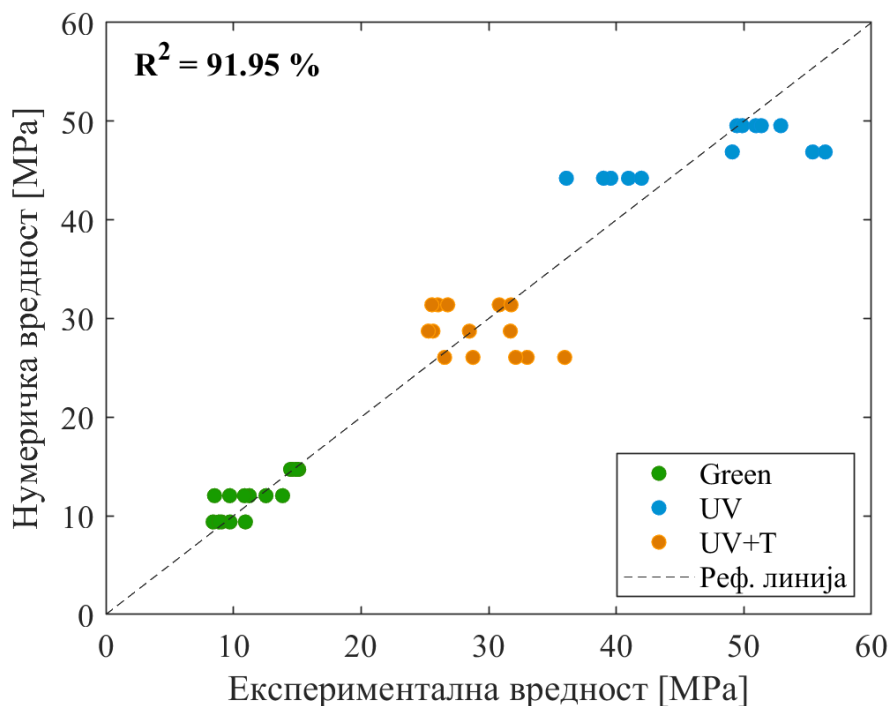
најголемиот дел од остатоците се блиски до нулата, а приближно нормалната дистрибуција на распределба на остатоците покажува оптимален модел.



Слика 5.22: Хистограм на остатоци/грешки (residuals) на модел за σ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Споредба на разликите меѓу нумеричките и експериментално добиените вредности за примероците за јакоста кај материјалот HighTemp

На Слика 5.23 е даден дијаграм на расејување на кој се гледаат отстапувањата помеѓу нумеричките и експериментално измерените вредности за сите комбинации на примероците според регресивниот математички модел за јакоста на фотополимерот HighTemp. Облаците од точки во различни бои се однесуваат на различните степени на постпроцесирање и се групирани во зоните што одговараат на добиените зависности во графиконите за интеракции. Овој модел има точност од 91,95 % според коефициентот за детерминација R^2 .



Слика 5.23: Дијаграм на нумерички наспроти експериментални вредности за регресиониот модел за σ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

На дијаграмот за расејување јасно се гледа групирањето што соодветствува со различните степени на постпроцесирање. Ваквата распределба одговара на трендот забележан кај графиконите за индивидуални влијанија на факторите за релативната деформација за овој материјал (Слика 5.4 и Слика 5.13). Распределбата на групите на примероци е речиси симетрична по целиот опсег на измерени вредности за σ . „Зелените“, нетретирани примероци имаат најмала јакост и се групирани во долниот дел на графиконот. Со првиот степен на постпроцесирање со UV-светлина, овој материјал ги достигнува највисоките измерени вредности за јачината на истегнување од 50 МПа. Штом на примероците се додаде дополнителен термички третман, јакоста на материјалот опаѓа до средна вредност од околу 30 МПа.

Една од причините за ова покачување може да биде фактот дека прекумерната топлина може да доведе до термичка деградација на полимерните синџири. Високите температури може да ги нарушат хемиските врски во полимерниот материјал, предизвикувајќи намалување на молекуларната тежина и прекин на синџирот. Тоа може да резултира со намалување на вкупната јачина на материјалот. Овој тип на

постпроцесирање воедно ја зголемува издржливоста на материјалот на високи температури, што значи во зависност од примената, корисникот треба да најде средина помеѓу издржливоста на топлина и јакоста на деловите изработени од овој фотополимер.

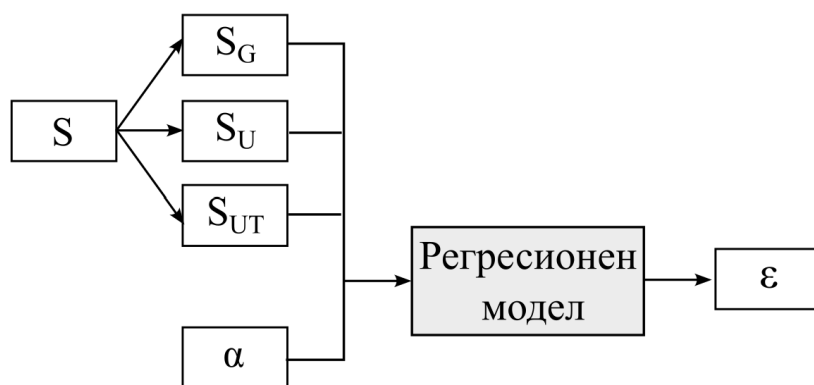
5.2.3.2. Модел за релативна деформација (HighTemp)

Од ANOVA анализата се заклучува дека исто како за јакоста, ориентацијата нема статистички значајно влијание врз промената на одсивот ϵ , додека степенот на постпроцесирање и аголот на наклон се статистички значајни. Тоа се гледа од вредноста на p -value поголема од нивото на значајност од 0,05 дадена во Табела 5.1. Аголот на наклон и степенот за постпроцесирање уште еднаш имаат повисоко ниво на значајност и се земени како влезови за креирање линеарен модел на прв степен.

Табела 5.4: Ниво на значајност на факторите според ANOVA анализата за релативната деформација кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Фактор	F - вредност	p - вредност
Агол на наклон	7.74	0.008
Степен на постпроцесирање	614.51	0.000
Ориентација	0.17	0.681

Исто како и претходно, за степенот на постпроцесирање како категорична променлива се врши декодирање со користење заменски променливи во континуирана променлива. За факторот „степен на постпроцесирање“ со можност за „green“, „UV“, „UV+T“ се создадени три заменски променливи: SG, SU и SUT. Аголот на наклон во регресиониот модел (Слика 5.24) е означен со α .



Слика 5.24: Шема на регресиониот модел за релативна деформација кај материјалот HighTemp (Извор: Сопствено истражување)

Табела 5.5: Коефициенти на регресионен модел за ϵ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Term	Coef	Standard Error of Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	31.33	0.79	39.85	0.000	
Агол на наклон [°]	0.03	0.01	2.81	0.007	1.00
Степен на постпроцесирање					
UV	-25.53	0.91	-27.96	0.000	1.33
UV+T	-29.05	0.89	-32.77	0.000	1.34

Апсолутната Т-вредност е над нивото на значајност од 1,96, додека Р-вредноста е под нивото на значајност од 0,05, што покажува јака и статистички значајна врска помеѓу променливите и зависната променлива. Со оглед на тоа дека VIF вредноста кај променливите и во овој модел е блиска до 1, тоа значи дека нема мултиколинеарност меѓу таа независна променлива и другите независни променливи во регресиониот модел и може да се смета за статистички независна во моделот.

Регресионата равенка со кодирани променливи за зависноста на максималната релативна деформација од аголот на наклон α и степенот на постпроцесирање гласи:

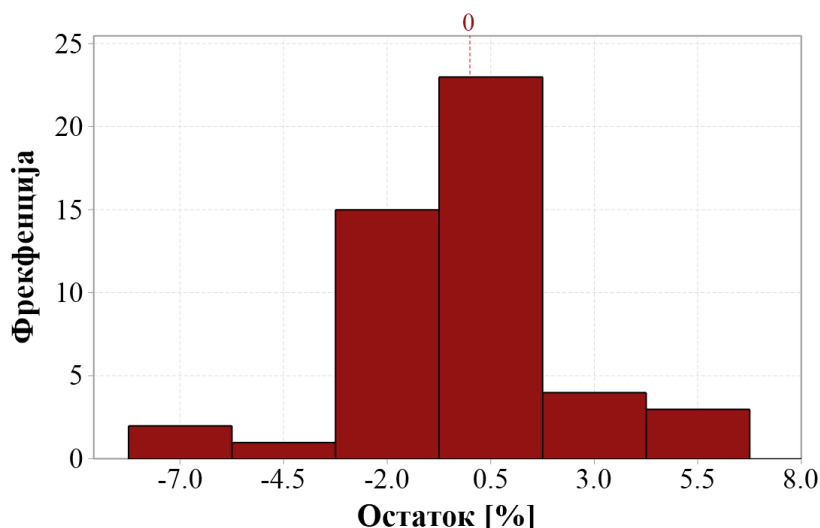
$$\epsilon [\%] = 31.33 + 0.03 \cdot \alpha - 25.53 \cdot S_U - 29.05 \cdot S_{UT} + 0 \cdot S_G$$

Регресиониот модел со точност 96,66 % ја опишува зависноста меѓу факторите и одзивот. Од коефициентите во регресионата равенка се забележува дека најголемо влијание врз максималната деформација на материјалот има неговиот степен на постпроцесирање. Тука со дополнително постпроцесирање се гледа значителен пад на пластичноста на примероците со оглед на негативниот предзнак кај коефициентите. Ова намалување е уште поголемо доколку примерокот е дополнително термички третиран. Оваа појава е видливо забележана кај примероците од HighTemp фотополимерот. При подготовката за тестирање, „зелените“ парчиња се со изразена флексибилност карактеристична за еластомерите. По постпроцесирањето материјалот стана исклучително крт и кршлив и неколку од примероците што се испитуваа за истегнување мораа да се изработат повторно бидејќи се скршија во челустите на машината за тестирање.

Табела 5.6: Статистички параметри за проверка на точност на модел за ϵ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

S	R ²	R ² (adj)	R ² (predictive)
2.54	96.66%	96.44%	96.09%

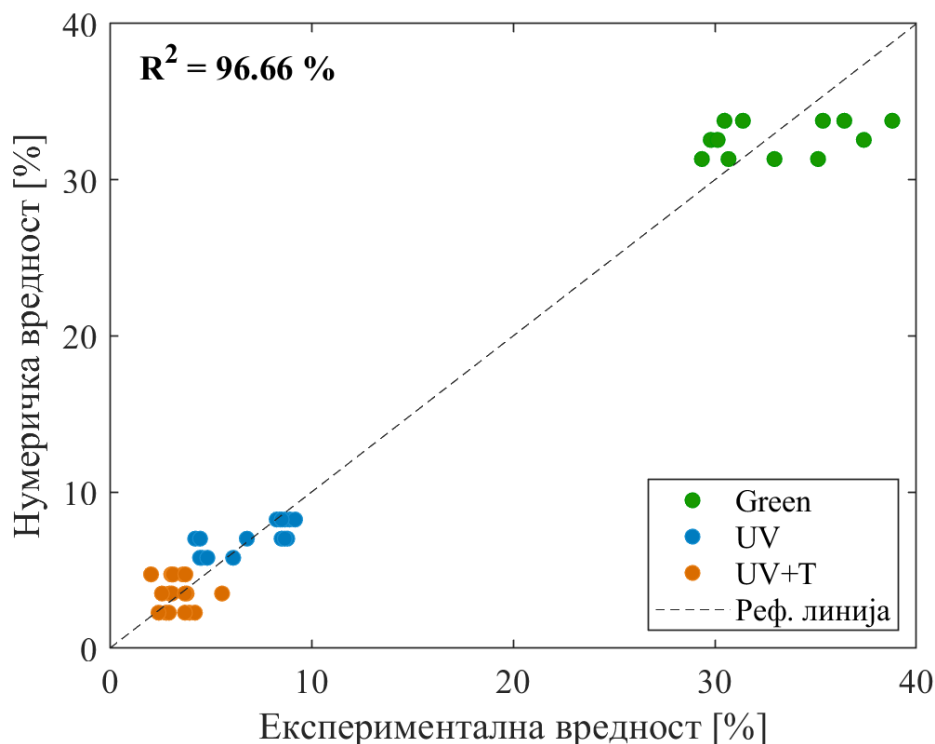
На Слика 5.25 е даден хистограмот на остатоци/грешки каде што се гледа дека најголемиот дел од остатоците се блиски до нулата со приближно нормална дистрибуција на распределба на остатоците. Ова е показател за оптимален математички модел.



Слика 5.25: Хистограм на остатоци/грешки (residuals) на модел за ϵ кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Споредба на разликите меѓу нумеричките и експериментално добиените вредности за примероците за релативната деформација кај материјалот HighTemp

На Слика 5.26 е даден дијаграм на расејување на кој се гледаат отстапувањата помеѓу нумеричките и експериментално измерените вредности за сите комбинации на примероците според регресивниот математички модел за максималната релативна деформација на фотополимерот HighTemp. Облаците од точки во различни бои се однесуваат на различните степени на постпроцесирање и се групирани во зоните што одговараат на добиените зависимости во графиконите за интеракции. Овој модел има точност од 96,66 % според коефициентот за детерминација R^2 .



Слика 5.26: Дијаграм на нумерички наспроти експериментални вредности за регресиониот модел за ε кај материјалот HighTemp (Извор: [118])

Групирањето на облаците од точки кај овој модел повторно одговара на трендот што е забележан кај графиконот за индивидуални влијанија на факторите за релативната деформација за овој материјал (Слика 5.13).

„Зелените“, нетретирани примероци имаат видливо најголемо издолжување и се групирани во горниот дел на дијаграмот. Примероците постпроцесирани со УВ-светлина и дополнително со УВ-светлина и термички третман имаат значително повисока крутост и помала измерена деформација и се групирани во долниот дел на графиконот. Ваквата разлика во еластичноста кај примероците со различно постпроцесирање беше коментарирана претходно и е забележлива за време на подготовката и манипулацијата со примероците.

Дополнителниот термички третман тука особено влијае врз крутоста на материјалот, што е забележливо и во приложените $\sigma - \varepsilon$ дијаграми на Слика 5.9, Слика 5.10 и Слика 5.11. Високата точност од 96,66 % кај овој модел е очигледна од блиската

корелација на расејувањето до референтната линија. Кај овој модел не се забележани истакнати отстапувања од зависноста во мерењата на примероците.

5.2.4. Добивање регресиони равенки за моделирање механички карактеристики кај материјалот Rigid 10k

Кај материјалот Rigid10k може да се изработи регресионен модел само за јачината на истегнување σ бидејќи за влијанијата на факторите врз релативната деформација се гледа дека разликите во вредностите се многу мали. Варијациите на ϵ се многу мали за да можат да се моделираат. Иако на графиконите за интеракции (Слика 5.13, Слика 5.14, Слика 5.15 и Слика 5.16) може визуелно да се види интеракција меѓу факторите, промената на средната вредност е многу мала за да биде значајна. Причината за оваа појава е тоа што материјалот Rigid 10k е исклучително крт и оваа особина се задржува низ сите 3 различни степени на постпроцесирање.

Моделот за σ на материјалот Rigid10k треба да е полином од втор ред бидејќи како што се гледа од графиконот на индивидуални влијанија на факторите врз одзивот, аголот на наклон креира зависност од втор ред што не може да се претстави со линеарен модел, што е случај со фотополимерот HighTemp.

5.2.4.1. Модел за јачината на истегнување (Rigid10k)

Од ANOVA анализата се заклучува дека кај овој материјал сите поединечни фактори имаат статистичко значајно влијание на σ , вклучувајќи ја и ориентацијата. Преку ANOVA анализата се согледува и значајноста на факторот агол на наклон на втор степен во моделот, кој креира полиномна регресија од втор ред. P вредноста и F вредноста за секој од факторите се дадени во Табела 5.7. P-вредноста е заокружена на 3 децимални места.

Табела 5.7: Ниво на значајност на факторите според ANOVA анализата за јачината на истегнување кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

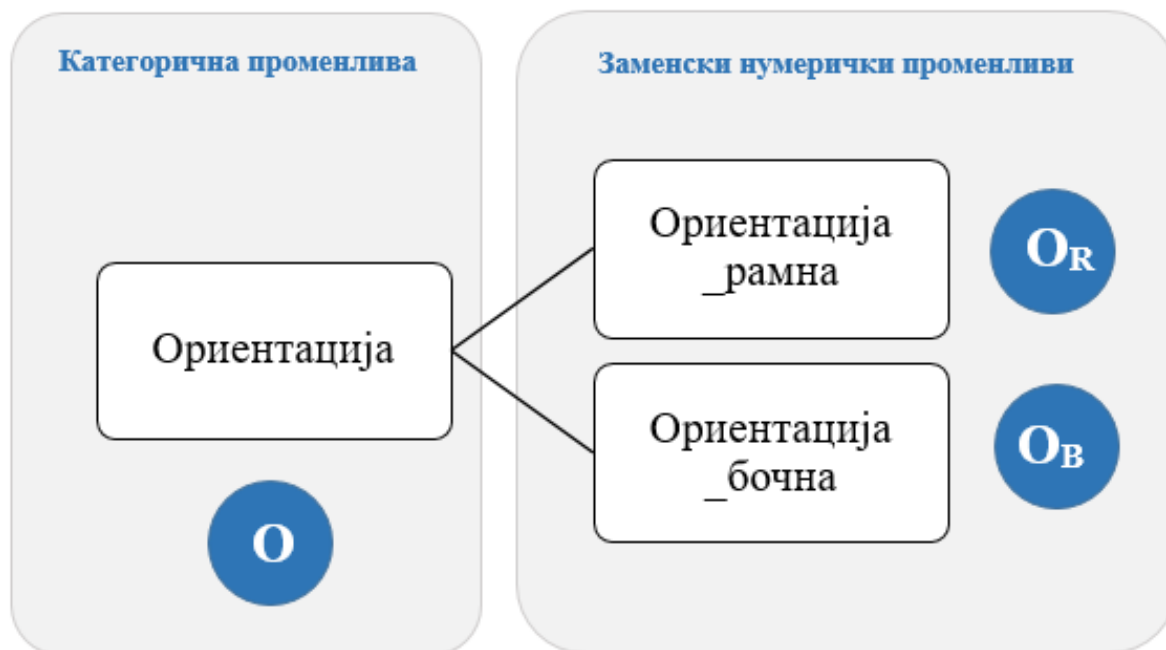
Фактор	F - вредност	p - вредност
Агол на наклон	15.84	0.000
Степен на постпроцесирање	120.17	0.000
Ориентација	8.77	0.005
Агол на наклон * Агол на наклон	12.18	0.001

За да се спроведе регресионата анализа, категоричните променливи ориентација и степен на постпроцесирање се декодирани со вредности 0 и 1 за да се претворат во нумерички влезови. Во овој модел имаме две категорични променливи:

- степен на постпроцесирање
- ориентација

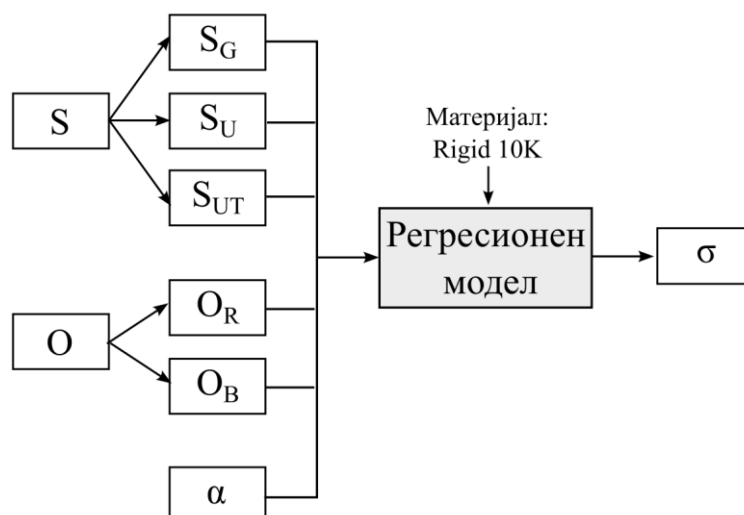
За факторот „степен на постпроцесирање“ со можност за „green,“ „UV,“ „UV+T,“ се создадени три заменски променливи: SG, SU и SUT. Шемата за декодирање на оваа категорична променлива е претходно дадена на Слика 5.20.

За факторот „ориентација“, бидејќи постојат 2 нивоа - бочна или рамна, при декодирање на оваа категорична променлива во нумеричка, ќе се создадат две заменски променливи, едната за ориентација „бочна“ и една за ориентација „рамна“, при што секоја од нив може да има вредности или 0 или 1. За оваа променлива се креирани две заменски променливи: O_R и O_B . Шемата за декодирање на оваа категорична променлива е дадена на Слика 5.27.



Слика 5.27: Шема за начин на декодирање на категоричната променлива O во две нумерички заменски променливи O_R и O_B , кои можат да имаат вредности само 0 или 1 (Извор: Сопствено истражување)

Откако се создадени заменски променливи за двата категорични фактори, тие се вклучени како нумерички влезни променливи во регресионата анализа. Аголот на наклон во регресиониот модел е означен со α . Шемата за регресиониот модел од втор степен е дадена на Слика 5.28.



Слика 5.28: Шема на регресиониот модел за јачината на истегнување кај материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Референтните вредности (baseline) со коефициенти 0 во регресионата равенка се SG (степен green) за степенот на пост-процесирање и бочната ориентација O_v . Овие две променливи ќе се користат како основа за споредба со другите заменски променливи.

Табела 5.8: Коефициенти на регресионен модел за σ кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

Term	Coef	Standard Error of Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	53.02	1.96	27.10	0.000	
Агол на наклон [°]	0.33	0.08	3.98	0.000	14.71
Степен на пост-процесирање					
UV	30.42	1.98	15.35	0.000	1.33
UV+T	18.98	1.98	9.58	0.000	1.33
Ориентација					
Рамно	-4.82	1.63	-2.96	0.005	1.01
Агол на наклон [°]*Агол на наклон [°]	-0.003	0.001	-3.49	0.001	14.72

Од Табела 5.8 за коефициенти на регресиониот модел се гледа јака и статистички значајна врска помеѓу променливите и зависната променлива според високата апсолутна Т-вредност над нивото на значајност од 1,96 и ниската Р-вредност под нивото на значајност од 0,05. Тоа значи дека промени во овие варијабли имаат значително влијание врз зависната променлива.

Во овој модел дополнително се гледа висока VIF вредност кај факторите „агол на наклон“ и „(агол на наклон)*(агол на наклон)“ што е логично бидејќи тие се секако корелирани меѓусебно, агол на наклон*агол на наклон е втор степен од агол на наклон, така што тоа е во ред.

Според тоа, регресионата равенка со кодирани променливи за зависноста на максималната јачина на истегнување од аголот на наклон α , степенот на постпроцесирање и ориентацијата гласи:

$$\sigma [MPa] = 53,02 + 0,33 \cdot \alpha + 30,42 \cdot S_U + 18,98 \cdot S_{UT} - 4,82 \cdot O_R - 0,003 \cdot \alpha^2 + 0 \cdot S_G + 0 \cdot O_B)$$

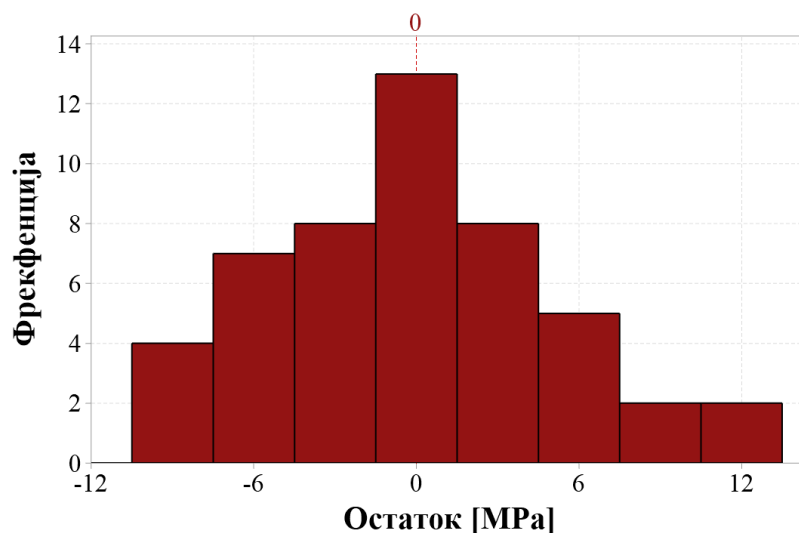
Овој регресионен модел ја опишува зависноста меѓу факторите и одзивот со точност од 85,66 % (Табела 5.9). Методот на оцена на точноста е R^2 или коефициентот за детерминација што како мерка во регресиониот модел ја одредува пропорцијата на варијанса во зависната променлива што може да се објасни со независната променлива.

Од коефициентите во регресионата равенка се забележува дека исто и кај HighTemp, и тука најголемо влијание на јакоста на материјалот има неговиот степен на постпроцесирање, што е околу 6 пати поголемо од влијанието на ориентацијата. Притоа, предзнакот пред променливата O_R е негативен, што покажува дека оваа ориентација има негативно влијание врз јакоста. Аголот на наклон и кај линискиот и кај квадратниот член има значително помала вредност и помал удел во споредба со коефициентите што одговараат за двата степени на постпроцесирање и ориентацијата.

Табела 5.9: Статистички параметри за проверка на точност на модел за σ кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

S	R^2	R^2 (adj)	R^2 (predictive)
5.78	85.66%	84.07%	81.52%

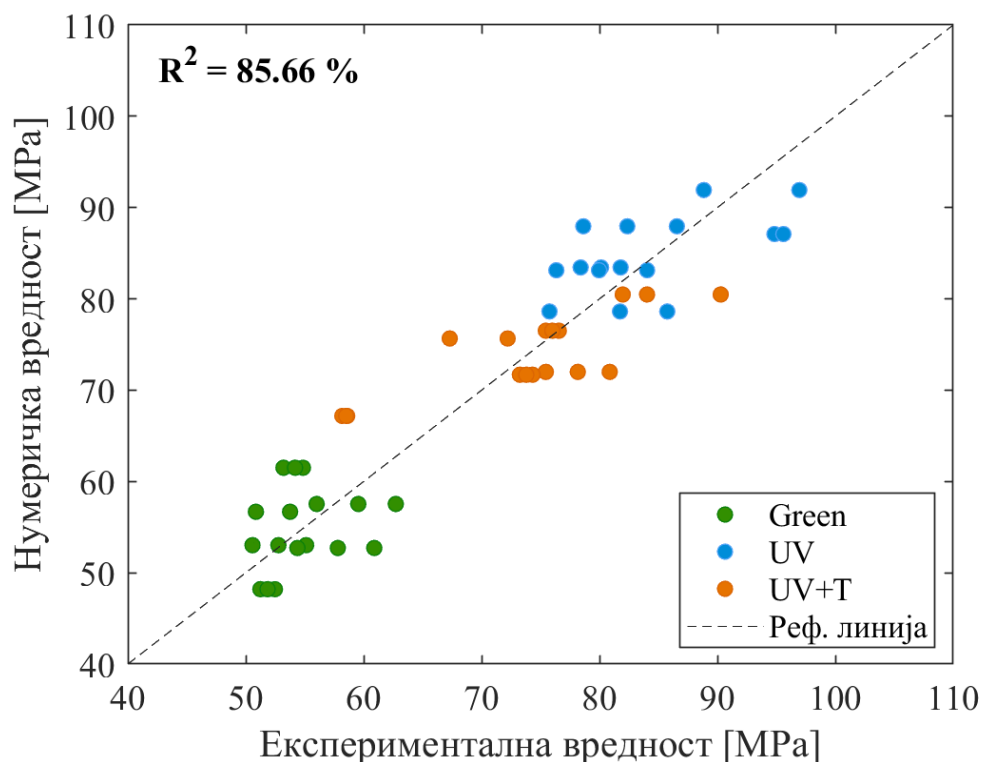
На Слика 5.29 е даден хистограмот на остатоци/грешки што и во овој регресионен модел покажува дека остатоците имаат оптимална нормална дистрибуција со 0 средна вредност.



Слика 5.29: Хистограм на остатоци/грешки (residuals) на модел за σ кај материјалот Rigid10k (Извор: [118])

Споредба на разликите меѓу нумеричките и експериментално добиените вредности за примероците за јакоста кај материјалот Rigid10k

На Слика 5.30 е даден дијаграм на расејување на кој се гледаат отстапувањата помеѓу нумеричките и експериментално измерените вредности за сите комбинации на примероците според регресивниот математички модел за јакоста на фотополимерот Rigid10k. Облаците од точки во различни бои се однесуваат на различните степени на постпроцесирање и се групирани во зоните што одговараат на добиените зависности во графиконите за интеракции. Овој модел има точност од 85,66 % според коефициентот за детерминација R^2 .



Слика 5.30: Дијаграм на нумерички наспроти експериментални вредности за регресиониот модел за σ кај материјалот Rigid 10k (Извор: [118])

Кај овој регресионен модел, за разлика од претходните за материјалот HighTemp, постои зона на преклопување на јакоста што е добиена кај примероците со степен на постпроцесирање UV и UV+T. „Зелените“, нетретирани примероци имаат видливо најниска јакост и се групирани во долниот дел на дијаграмот. Како што се покажа и од графиконот за индивидуални влијанија на факторите (Слика 5.5), по третирањето со UV-светлина, кај овој материјал се зголемува јачината на истегнување. По дополнителното термичко третирање за добивање на максималната температурна издржливост, кај материјалот Rigid 10k се бележи пад на јакоста, што јасно се гледа од дијаграмот. Во однос на примероците што отстапуваат од групирањето, два примероци со постпроцесирање UV+T експериментално покажаа пониски вредности од остатокот на популацијата, меѓутоа, и покрај тоа, ова отстапување е во границите на грешка од 14% што кореспондира со пресметаната вредност за R^2 .

5.2.5. Заклучни согледувања за експеримент 1

Кога резултатите од овој експеримент ги гледаме низ призмата на применливост на фотополимерите за изработка на гравури за инјекционо вбригување, може да извлечеме неколку заклучоци.

- Процесот на УВ-постстврднување ја зголемува максималната јачина на истегнување. Дополнителна изложеност на УВ-светлина иницира дополнително формирање на вкрстени врски помеѓу полимерните синџири во материјалот. Зголемената јакост е резултат на погустата тридимензионална мрежа помеѓу одделните полимерни синџири.
- Со дополнително термичко третирање јакоста на примероците се намалува, но затоа деловите имаат подобри термички карактеристики.
- Постпроцесирањето со УВ-светлина и термички третман ја намалува пластичноста, во некои случаи предизвикувајќи кршливо однесување.

Од аспект на оптимална температурна издржливост за време на процесот, препорачливо е секогаш деловите да бидат подложени барем на еден степен на постпроцесирање за да може да дојде до израз максималната отпорност на материјалот кон температурен отклон. Фотополимерот Rigid10k, поради поголемата цврстина во „зелената“ состојба, технички може да се применува и без процесирање, меѓутоа, во овој случај треба да се разгледуваат случаи за вбригување полимерни материјали со пониски температури на топење. Од друга страна, фотополимерот HighTemp во „зелена“ состојба е неприменлив за изработка на какви било гравури. Високата еластичност и ниската јакост што овој материјал ги има без дополнително постпроцесирање го прават доста несоодветен за примена во процесот на инјекционо вбригување. Неговата природа во оваа состојба, исто така, ја олеснува дополнителната машинска обработка, што е најчесто неопходна за подготовка на полимерните гравури за монтажа во куќиштата на алатите за инјекционо вбригување.

Кај двата материјали е забележано намалување на еластичноста со дополнителното постпроцесирање и е откриено дека материјалите може да покажат поголема кршливост по дополнителните третмани. Овој феномен може да се поврзе со

ефектот на волуменско собирање, кој создава заостанати напрегања во примероците. Во зависност од специфичниот фотополимер, во дадени случаи ова може да резултира со чисто кршливо или квазикршливо однесување на материјалот, додека во други тоа само предизвикува намалување на пластичното издолжување. Друга причина за намалување на еластичноста може да се бара кај прекумерното вкрстено поврзување на полимерниот материјал, што може да биде предизвикано од дополнителната термичка обработка. Големите број вкрстени врски може да резултираат со зголемена кршливост наместо подобрена цврстина, бидејќи материјалот станува помалку способен да се деформира и апсорбира енергија.

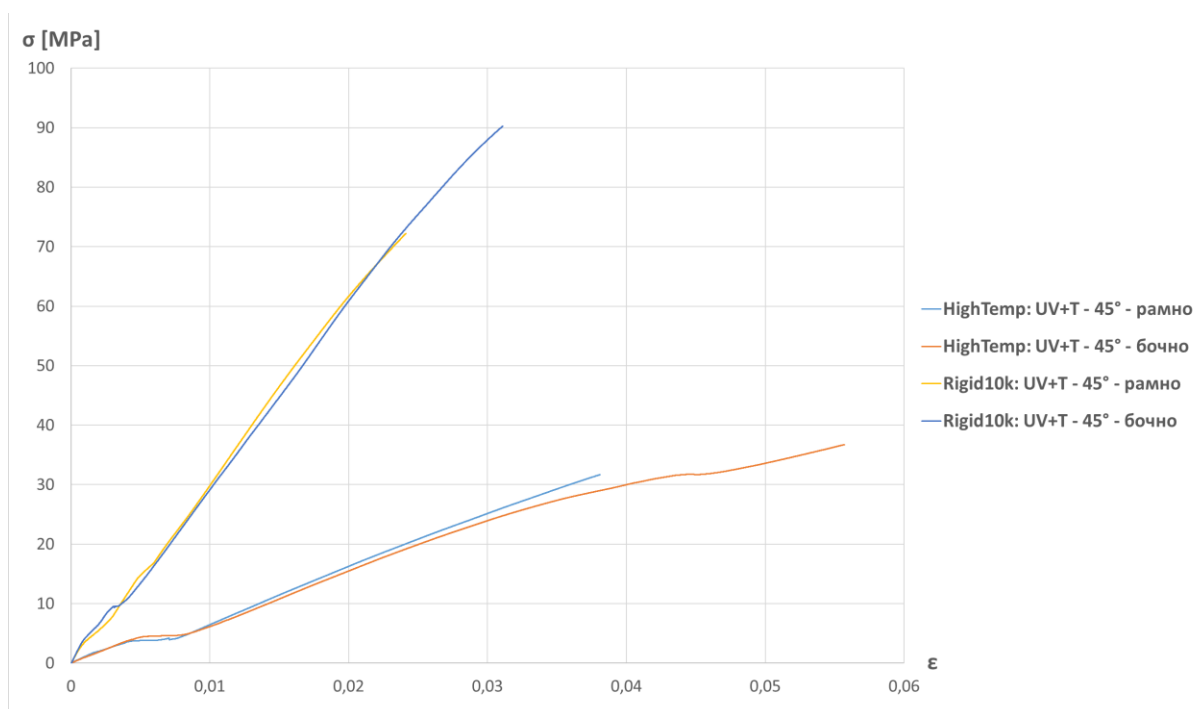
Ваквото однесување може, но не мора, да биде штетно според специфичната употреба за која е наменет 3D-печатениот објект. За целите кои се разгледуваат во овој докторски труд, односно при изработка на функционални гравури за инјекционо вбригување, одредено ниво на пластичност е препорачливо и се претпочита да се избегне ненадејно кршење. Овој недостаток треба да се земе во предвид кога се користи SLA 3D печатење за структурни компоненти, меѓутоа во овој момент сите фотополимери кои се способни да ги издржат високите температури што се појавуваат во процесот на инјекционо вбригување се истовремено доста крти

На крај, експерименталните резултати во одредена мера се разликуваат од очекуваните вредности што се декларирани во документацијата за материјалите достапна од производителот. Ова најверојатно се должи на дополнителни варијабли, како што е нивото на влажност и собната температура за време на складирањето на фотополимерите. Ова остава простор за дополнителна анализа со земање во предвид овие фактори. Сепак, точниот состав на фотополимерите не се открива од страна на производителите и ова ја попречува анализата на материјалите на молекуларно ниво за да се донесе дефинитивен заклучок за својствата на полимерната мрежа што се формира по стврднувањето.

Од добиените резултати се покажа дека ориентацијата под 45° на моделите дава најоптимални резултати кај двата фотополимери. Компаративни σ - ϵ дијаграми од овие ориентации се прикажани на Слика 5.31. Оваа ориентација не само што дава најдобри

механички карактеристики на деловите, туку овозможува и најголемо искористување на работниот простор на 3Д-печатачот и изработка на делови со поголеми димензии.

Од аспект на јакост, фотополимерот Rigid10k има речиси 3 пати повисока јачина на истегнување, меѓутоа, е за околу 50 % покрут од материјалот HighTemp. Главната предност на материјалот HighTemp во однос на Rigid10k е малку повисоката температурна издржливост и 30 % пониската цена. Меѓутоа, во однос на сите други карактеристики, фотополимерот Rigid10k е посоодветен за изработка на функционални гравури. Главната предност на овој материјал што не може да се види од овие испитувања е способноста лесно и прецизно машински да се обработува, што не е случај со материјалот HighTemp.



Слика 5.31: Компаративен σ - ϵ дијаграм од примероци изработени со ориентација под агол од 45° на највисок степен на постпроцесирање за материјалите HighTemp и Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Примената на добиените регресиони равенки за моделирање на јачината на истегнување и релативната деформација не е ограничена само за гравури, туку тие може да се применуваат и за утврдување на оптималните ориентации и агли на наклон за изработка на најразлични делови со помош на стереолитографските методи за адитивно производство.

Нормално, како и кај сите адитивни технологии, оптималната ориентација зависи и од самата геометрија. Присуството на зони на моделот каде што ќе мора да има потпори често пати е највлијателно доколку сакаме да имаме колку што е можно помалку помошен материјал, меѓутоа, во услови каде што механичките параметри на делот се значајни, тогаш регресионите модели презентирани во ова поглавје може значително да помогнат при изборот на оптимална ориентација на делот на работната подлога.

5.3. Резултати од анализата на димензионалните отстапувања кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури

Во ова поглавје е даден преглед на податоците што се собрани за време на експериментот 2. Презентирани се податоците од сите фази на експериментот и на крајот од секој дел е направена дискусија за добиените резултати. Во резимето се вклучени дополнителни статистички информации за севкупните перформанси и прифатливоста на произведените пластични модели.

Статистички информации се дадени за секоја одделна испитана гравура. Во статистичките табели се вклучени количината на примероци произведени по гравура, номиналната мерна вредност на контролната димензија, минималните и максималните вредности, средната вредност и отстапувањето на средната вредност од номиналната доделена димензија. Како дополнување на табелите, прикажани се и дијаграми за следење на однесувањето на секоја контролна геометрија. Целта на овие дијаграми е да се проучи однесувањето на алатниот вметокот во текот на неговиот животен век. На дијаграмите се прикажани номиналната димензија, максималната и минималната дозволена толеранција и функционалната зависност на трендовите на промена кај измерените податоци.



За контрола на мерките, на димензиите помали од 50 mm им е доделена толеранција од $\pm 0,1$ mm, додека на мерките над 50 mm им е доделена гранична толеранција од $\pm 0,2$ mm. Димензиите за контрола и толеранциите за секој дел може да се најдат во техничките цртежи во Прилог В.

На крајот, како што е наведено во методологијата на експериментот, лом на гравурата е класифициран како дефект или фрактура што спречува понатамошно обликување или ќе ја загрози безбедноста на опремата за инјекционо вбризување. Традиционалните дефекти на пластичните делови, како прекумерен венец и заоблување на деталите на гравурата, не се земаа предвид сè додека дефектот директно не влијае врз структурниот интегритет на гравурата или ги загрозува критичните димензии на делот. Причината поради која венецот не се смета за критичен дефект на гравурата е бидејќи венецот кај деловите за прототипирање и мали серии обично е очекуван и дополнително се отсекува.

Во рамките на испитувањето се направени 50 вбризувања во двете гравури од материјалот Rigid10k, а бројот на вбризувања во гравурите од материјалот HighTemp е 10 и 3 соодветно за обликот на стандардна епрувета и заоблен трапез.

Параметрите за процесирање се држеа константни за време на вбризувањето за двата материјали и се дадени во Табела 5.10. Температурата на топење на користената ABS пластика (Табела 8.5) е избрана на долната граница на препорачаните вредности што за овој полимерен материјал се движат од 200 до 280 °C.

Табела 5.10: Процесни параметри за инјекционо вбризување користени во експериментите (Извор: Сопствено истражување)

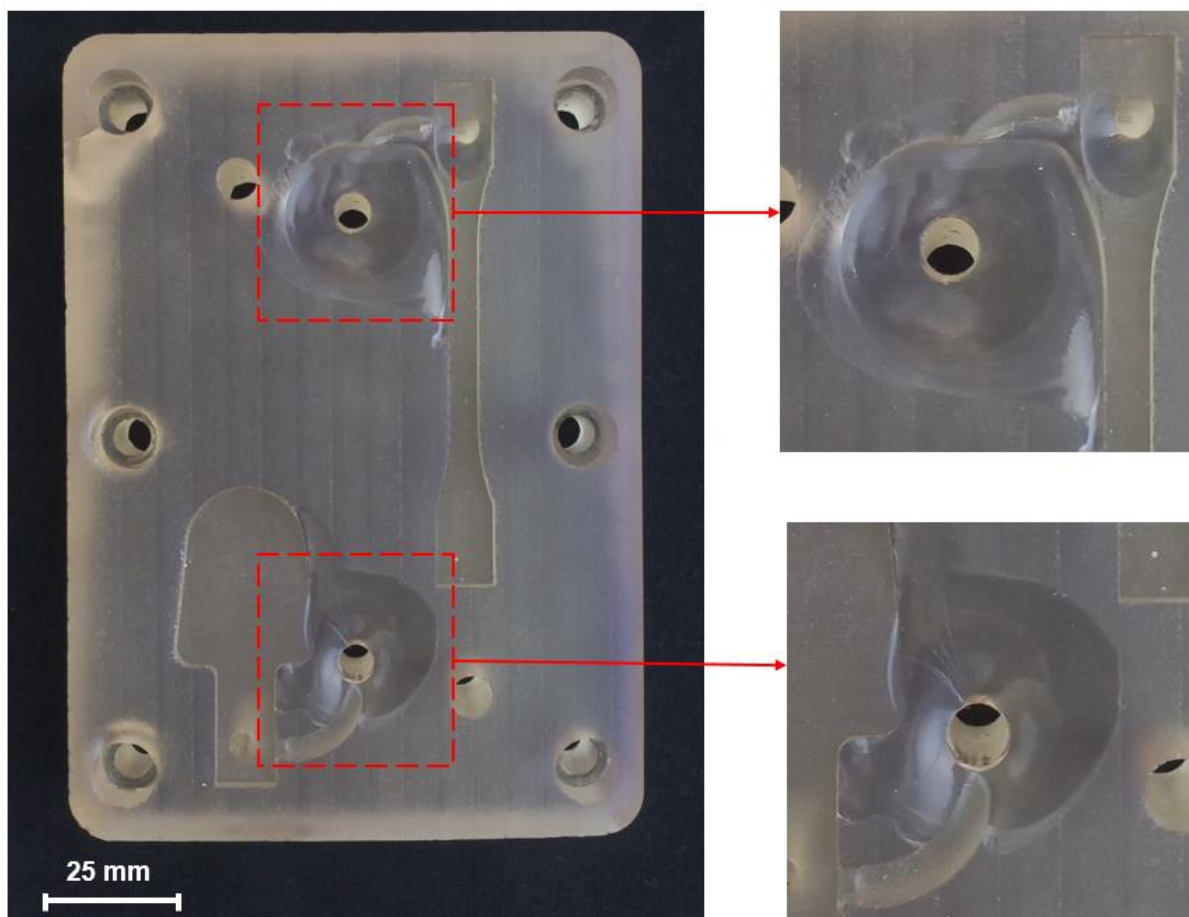
	Облик на гравура	
		
Притисок на вбризување [MPa]	48	57
Температура на вбризување [°C]	200	200
Брзина на вбризување [mm/s]	120	120
Сила на притегање [kN]	150	150
Време на полнење [s]	1,63	1,25
Време на пакување [s]	3,5	3,5
Притисок на пакување [MPa]	25	20
Време на ладење [s]	48 – 60	55

Причината за ова беше што алатот кој се користеше не беше претходно загреан и неговата температура се контролираше и мереше по секој циклус за да не се надмине препорачаната температура за гравурата. Деталната постапка е опишана во поглавјето 4.2.

5.3.1. Гравура од High Temp

Гравурата изработена од фотополимерот High Temp за двете гнезда на алатот покажа значително полоши резултати во однос на фотополимерот Rigid10k.

За гнездо 1 (облик на стандардна епрувета), оваа гравура издржа 10 работни циклуси пред појавата на лом, додека за гнездо 2 (облик на заоблен трапез) лом кај гравурата се појави по три работни циклуси. Дефектот во гравурата во двата случаи е авулзионо откинување на поголемо парче материјал на локацијата кај вливната порта. За време на овие експерименти причината за појава на лом се должи на тоа што делот се прилепуваше на површината на гравурата, што го спречува слободното исфрлање на делот после работниот циклус. За време на исфрлањето ломот се појави кај локацијата на исфрлувачот за вливниот систем правејќи го вметокот неупотреблив.



Слика 5.32: Критичен авулзионоен дефект кај отворот за исфрлување кај гравурата од HighTemp материјал (Извор: Сопствено истражување)

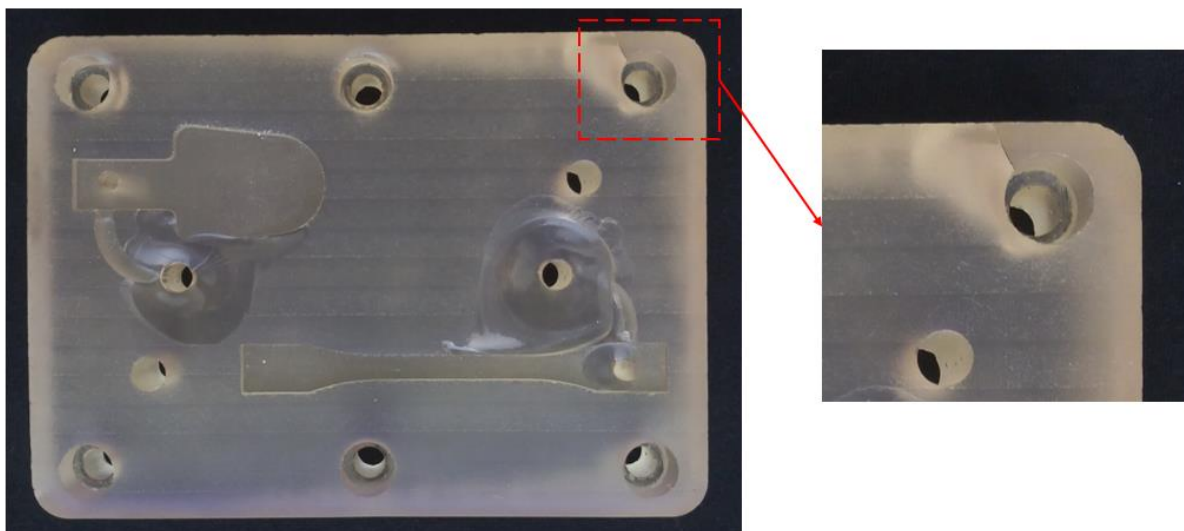
Кај претходни испитувања на ваков тип гравури е забележана постепена промена во бојата на гравурата 5 до 10 работни циклуси пред појава на лом, што не беше случај кај овие гравури. Дефектите се прикажани на Слика 5.32.

Резултатите од мерењата на парчињата добиени од оваа гравура се дадени во Табела 5.11 и Табела 5.12 со нивните апсолутни големини само како референтни вредности. Поради вкупниот мал број циклуси, тие не се земени предвид за дополнителни статистички анализи.

Од аспект на машинска обработливост за целите на постпроцесирањето, материјалот Rigid 10k покажа многу подобри карактеристики во однос на HighTemp. Механичките испитувања покажаа дека двата материјали се доста крти, меѓутоа, фотополимерот HighTemp при обработката со машинско глодање даде видливо полоши резултати. За успешна машинска обработка на овој материјал, треба да се направат дополнителни тестирања на работните режими за да се добие квалитетен финиш на гравурата. Кај овој материјал, поради изразената кртост, при излезот на резното сечило на глодалото од материјалот се случуваше да се откине дел од материјалот, што е особено изразено на рабовите на моделот.

Овој проблем не е присутен кај фотополимерот Rigid 10k, кој се покажа како доста обработлив и дополнителното глодање кај овој материјал резултира со исклучително мазни површини кај гравурата. Кај алатите за инјекционо вбризгување е доста важно да се обезбедат добри поделбени површини помеѓу гравурите за правилно обликување на деловите во алатните гнезда. Од таа причина, способноста за дополнителна обработка е нешто што го прави овој фотополимер доста соодветен за употреба како материјал за изработка на гравури.

Исклучително ниската жилавост на материјалот HighTemp предизвика појава на пукнатини при прицврстувањето на гравурата во алатните плочи (Слика 5.33), што значи дека при конструирањето на гравурата што треба да се добие од некаков фотополимер потребно е да се обрне внимание и на дебелината на сидот на локациите каде што е планирано да се постават завртките за спојување со плочите за да не дојде до оштетување при монтажа.



Слика 5.33: Појава на пукнатина кај гравурата од фотополимерот HighTemp за време на прицврстувањето во алатните плочи (Извор: Сопствено истражување)

Табела 5.11: Статистички резултати од мерењата на примероците од гнездо 1 од гравурата изработена од материјалот High Temp (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура High Temp гнездо 1, епрувета за испитување по ISO 527 тип 1BA					
	Мерки [mm]				
	Дебелина [mm]	Должина [mm]	Ширина (мерно подрачје) [mm]	Ширина (глава 1) [mm]	Ширина (глава 2) [mm]
Број на мерења	10	10	10	10	10
Во рамки на толеранции	10	10	10	10	10
Надвор од толеранции	0	0	0	0	0
Номинална мерка	2	87	5	10	10
Min	2,053	86,913	5,019	10,001	9,991
Max	2,100	87,100	5,092	10,096	10,063
Опсег	0,047	0,187	0,074	0,095	0,072
Просек	2,075	87,009	5,056	10,068	10,034
Медијана	2,070	86,987	5,081	10,078	10,050
Стандардна девијација	0,015	0,050	0,019	0,028	0,024
Просечна грешка	0,075	0,009	0,056	0,068	0,034
% прифатливи	100%	100%	100%	100%	100%

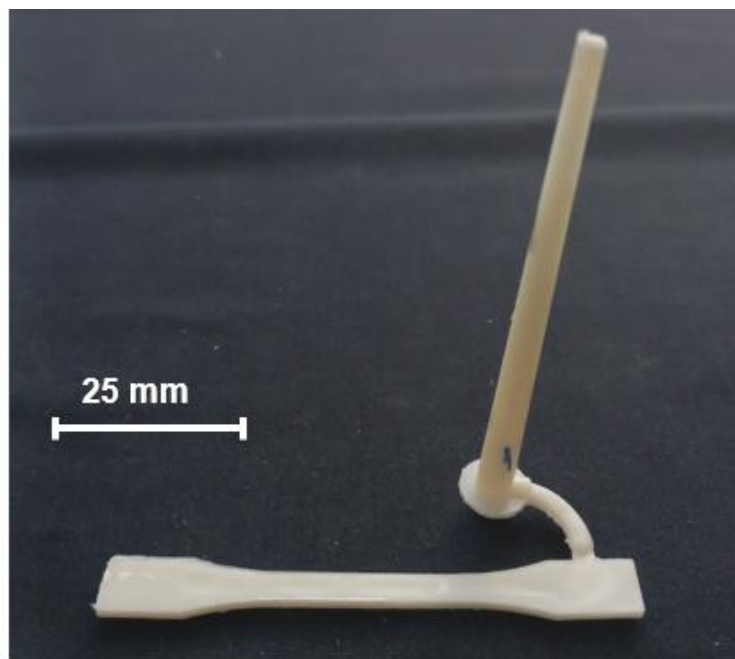
Табела 5.12: Статистички резултати од мерењата на примероците од гнездо 2 од гравурата изработена од материјалот High Temp (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура High Temp, гнездо 2, заоблена трапезна плочка					
	Мерки [mm]				
	Дебелина [mm]	Ширина [mm]	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 (лево) [mm]	Мал радиус 2 (десно) [mm]
Број на мерења	3	3	3	3	3
Во рамки на толеранции	3	3	2	3	2
Надвор од толеранции	0	0	1	0	1
Номинална мерка	2	10	10	3	3
Min	2,017	10,071	10,090	3,053	2,983
Max	2,054	10,089	10,130	3,093	3,203
Опсег	0,037	0,018	0,040	0,040	0,220
Просек	2,033	10,078	10,103	3,066	3,086
Медијана	2,028	10,075	10,090	3,053	3,073
Стандардна девијација	0,019	0,010	0,023	0,023	0,111
Просечна грешка	0,033	0,078	0,103	0,066	0,086
% прифатливи	100%	100%	67%	100%	67%

5.3.2. Гравура од Rigid10k

5.3.2.1. Гнездо 1: стандардна епрувета за испитување со истегнување, тип 1BA (според стандардот ISO 527)

Првото гнездо од гравурата за експериментот е во облик на стандардна епрувета за испитување со истегнување, тип 1BA (според стандардот ISO 527) за следење на отстапувањата во дебелина, ширина и должина.



Слика 5.34: Пример на изработена епрувета од гнездо 1 (Извор: Сопствено истражување)

За гравурата изработена од Rigid 10k, ова гнездо ги издржа сите предвидени 50 работни циклуси без појава на критични дефекти. Појавата на венец е единствениот конвенционален дефект забележан кај парчињата и е доста помал во споредба со експериментот од второто гнездо. Првите мали траги од венец се појавија по 25-тиот работен циклус (Слика 5.35). Интензивното прогресивно влошување настана по 40-тиот работен примерок. Појавата на венец кај деловите е најизразена кај двете глави на епруветата и на поделбената линија кај вливниот систем.



Слика 5.35: Прогресивно зголемување на венецот кај изработените модели. Број на примероци на сликата од лево на десно: 1, 33, 50 (Извор: Сопствено истражување)

Од сите 50 вбризгани примероци, за статистички мерења се земени 44 парчиња. Причината за ова е што примероците од 11 до 16 не се вбризгаа докрај поради потребата за корекција на процесните параметри за инјекционо вбризгување.



Слика 5.36: Пример од примероците (11 до 16) кои не се земени предвид за статистичка анализа поради нецелосно исполнување на гравурата (Извор: Сопствено истражување)

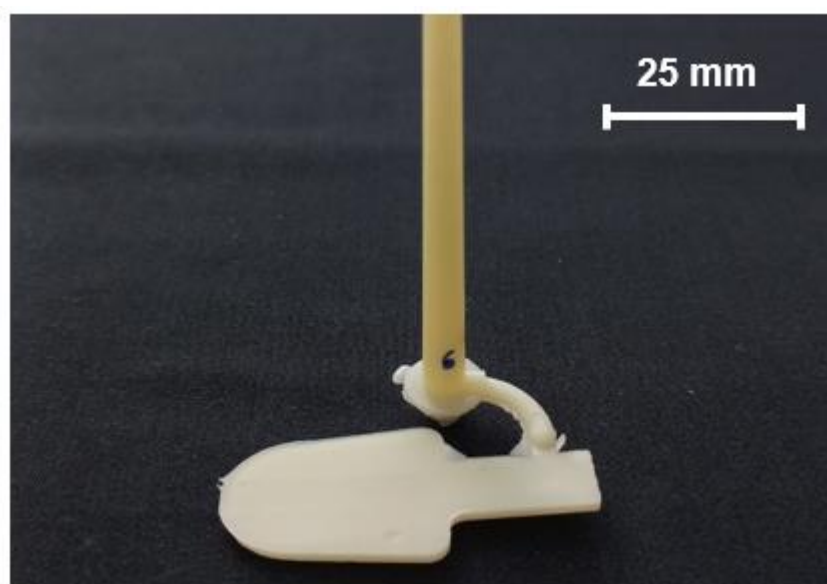
Во прилог е дадена табела со сумарните статистички податоци од мерењата за овој дел:

Табела 5.13: Статистички резултати од мерењата на примероците од гнездо 1 од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура Rigid10k, гнездо 1, епрувета за испитување по ISO 527 тип 1BA					
	Мерки [mm]				
	Дебелина [mm]	Должина [mm]	Ширина (мерно подрачје) [mm]	Ширина (глава 1) [mm]	Ширина (глава 2) [mm]
Број на мерења	44	44	44	44	44
Во рамки на толеранции	38	44	41	43	44
Надвор од толеранции	6	0	3	0	0
Номинална мерка	2	87	5	10	10
Min	2,080	86,827	5,019	9,991	9,981
Max	2,148	87,090	5,190	10,110	10,083
Опсег	0,067	0,263	0,172	0,119	0,103
Просек	2,110	86,963	5,085	10,075	10,048
Медијана	2,110	86,977	5,082	10,077	10,053
Стандардна девијација	0,017	0,064	0,028	0,019	0,023
Просечна грешка	0,110	-0,037	0,085	0,075	0,048
% прифатливи	86%	100%	93%	98%	100%

5.3.2.2. Гнездо 2: трапезоидна плоча со заоблување на горната страна и рабовите на основата

Второто гнездо од гравурата за експериментот е во облик на заоблен трапез за следење на отстапувањата во дебелина, ширина и радиуси на заоблување.

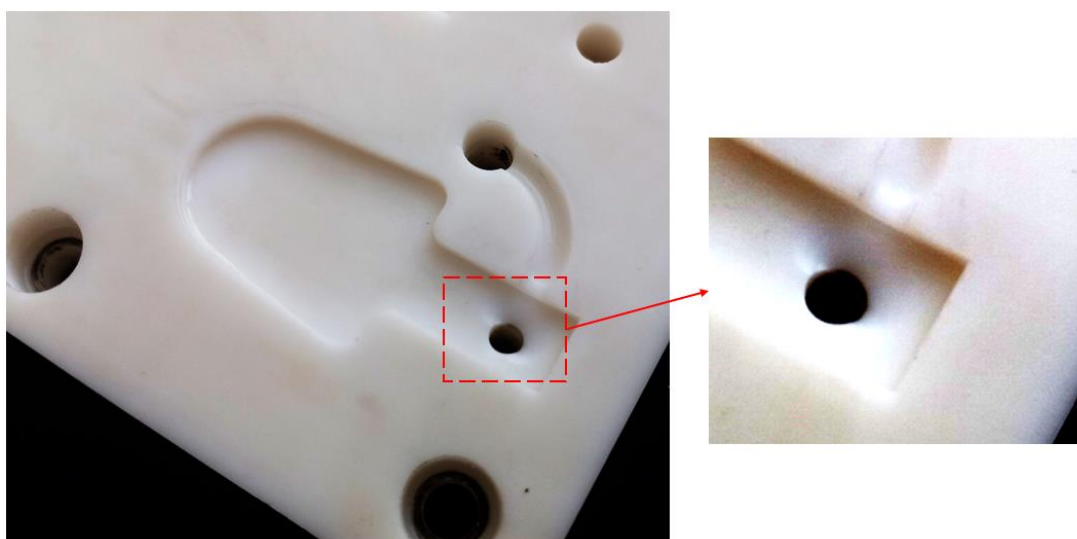


Слика 5.37: Пример на изработена трапезна плочка од гнездо 2 (Извор: Сопствено истражување)

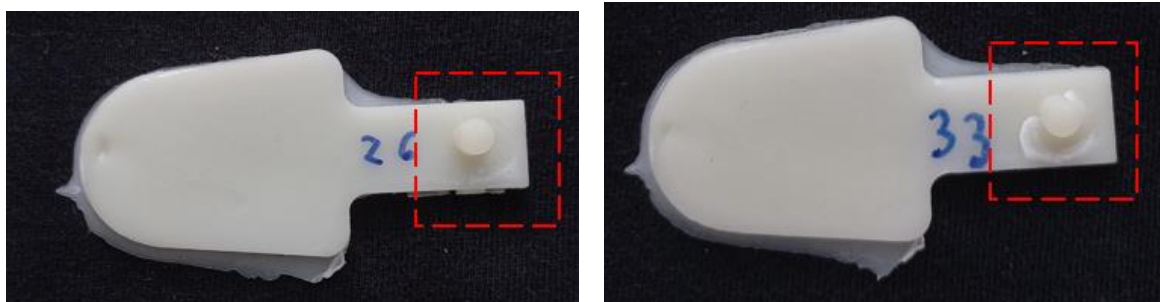
За гравурата изработена од Rigid 10k, ова гнездо ги издржа сите предвидени 50 работни циклуси без појава на критични дефекти. На 27-миот работен циклус се појави мала пукнатина кај отворот на гравурата предвиден за исфрлувачот, меѓутоа, ова не влијаеше врз контролираните мерки на примероците. Разликата кај деловите добиени пред и по појавата на пукнатината е дадена на Слика 5.40. Друга видлива промена кај алатниот вметок изработен од материјалот Rigid 10k е појава на мала пукнатина близу вливниот систем кон крајот на експериментот. Венец кај деловите е присутен почнувајќи од примерокот со реден број 10 и неговата големина прогресивно се влошува низ експериментите (Слика 5.38). Појавата на венец кај деловите е најизразена на поделбената линија кај вливниот систем.



Слика 5.38: Прогресивно зголемување на венецот кај изработените делови. Број на примероци на сликата од лево на десно: 1, 10, 19, 26, 38, 48 (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.39: Авулзионо откинување на парче материјал кај отворот за исфрлање во гравурата по 27-миот циклус на вбризување (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.40: Промена во геометријата кај примероците изработени по откинување парче материјал кај отворот за исфрлање во гравурата (Извор: Сопствено истражување)

Причина за откинувањето материјал од гравурата на локацијата на исфрлувачот е присуството на локализирани напрегања на смолкнување во цилиндричниот отвор каде што поминува пинот за исфрлање. На таа локација, по секој работен циклус силата од исфрлувачот дејствува на стврднатата пластична маса и ја раздвојува од гравурата. Паралелно на ова се совладуваат и отпорите помеѓу гравурата и стврднатиот полимерен материјал, кои се спротивставуваат на таа сила и по повеќе работни циклуси ова доведува до откинување на парче материјал.

Во прилог е дадена табела со сумарните статистички податоци од мерењата за овој дел:

Табела 5.14: Статистички резултати од мерењата на примероците од гнездо 2 од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)



Материјал на гравура Rigid10k, гнездо 2, заоблена трапезна плочка					
	Мерки [mm]				
	Дебелина [mm]	Ширина [mm]	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 (лево) [mm]	Мал радиус 2 (десно) [mm]
Број на мерења	50	50	50	50	50
Во рамки на толеранции	49	48	50	47	48
Надвор од толеранции	1	2	0	3	2
Номинална мерка	2	10	10	3	3
Min	1,952	10,048	9,92	2,87	2,90
Max	2,121	10,114	10,09	3,14	3,12
Опсег	0,169	0,066	0,17	0,27	0,22
Просек	2,004	10,080	10,02	3,01	3,01
Медијана	2,007	10,081	10,03	3,025	3
Стандардна девијација	0,033	0,011	0,048	0,068	0,061
Просечна грешка	0,004	0,080	0,0232	0,013	0,009
% прифатливи	98%	96%	100%	94%	96%

5.3.3. Резултати од мерења

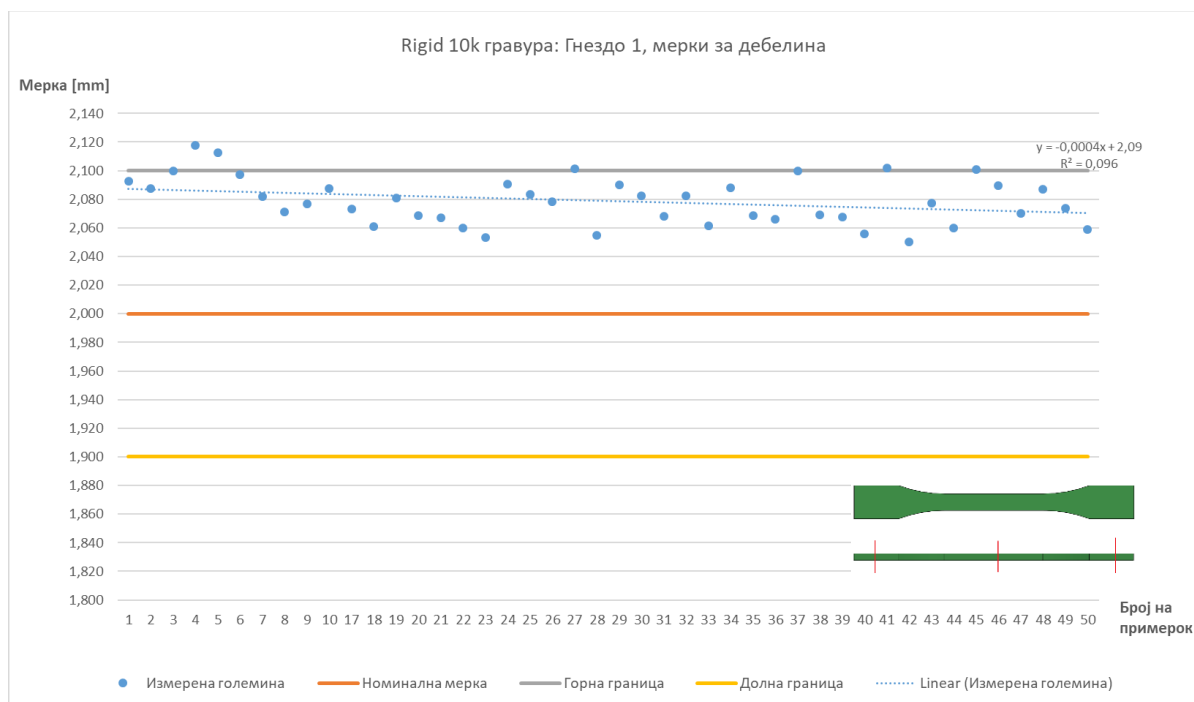
5.3.3.1. Дебелини

Статистичките информации во врска со дебелините на изработените делови се дадени во Табела 5.15. Во оваа табела се дадени сите мерења на дебелина земени од двете гнезда на гравурата изработена од фотополимерот Rigid10k. Направени се вкупно 94 мерки, 44 од деловите изработени во првото гнездо во облик на стандардна епрувета за испитување и 50 од второто гнездо во облик на трапезна плочка. Од овие мерења, 87 примероци се изработени во рамките на дозволеното толерантно отстапување од $\pm 0,1$ mm што одговара на 92,6% од вкупната бројка.

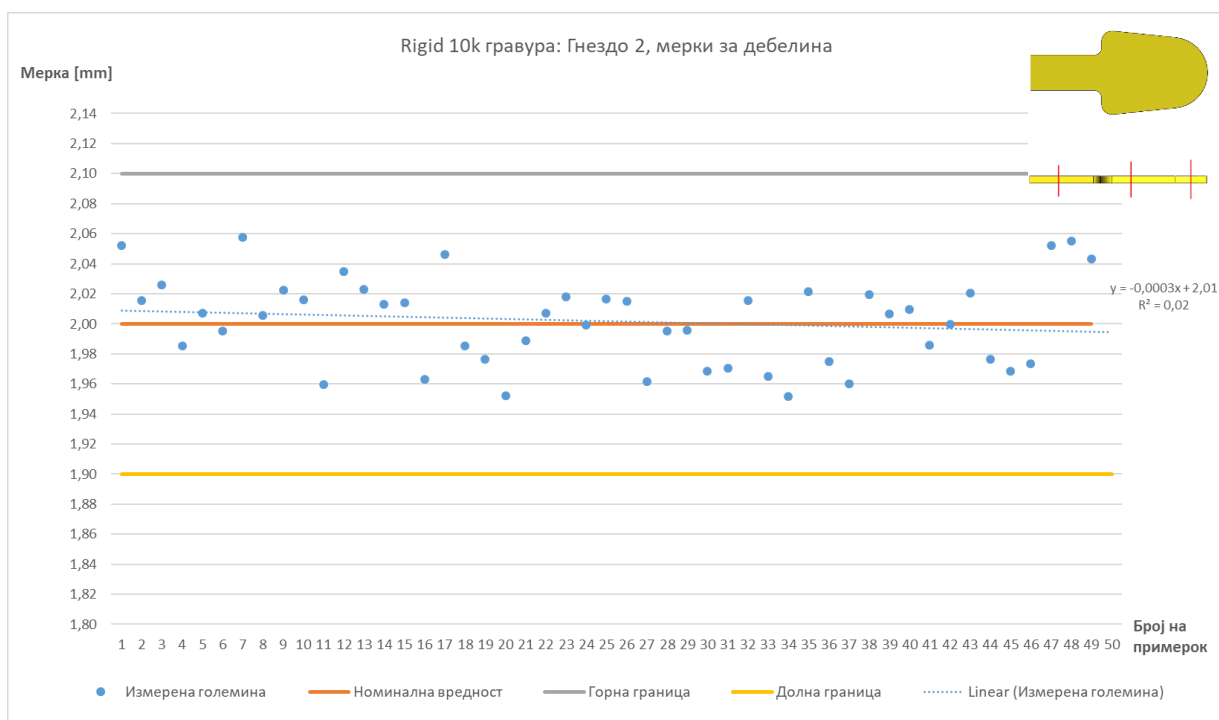
Табела 5.15: Статистички резултати од мерењата на дебелина за примероците од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

	Материјал на гравура: Rigid10k	
	 Дебелина дел 1, епрувета тип 1BA, ISO 527 [mm]	 Дебелина дел 1, заоблена трапезна плочка [mm]
Број на мерења	44	50
Во рамки на толеранции	38	49
Надвор од толеранции	6	1
Номинална мерка	2	2
Min	2,080	1,952
Max	2,148	2,121
Опсег	0,067	0,169
Просек	2,110	2,004
Медијана	2,110	2,007
Стандардна девијација	0,017	0,033
Просечна грешка	0,110	0,004
% прифатливи	86%	98%

Отстапувањето од дефинираната толеранција е поголемо кај стандардните епрувети изработени во првото гнездо каде што 38 парчиња се во усвоеното толерантно поле, што одговара на 86% од вкупната бројка. Од друга страна, кај 50-те трапезни плочки изработени од второто гнездо само еден примерок отстапува од мерките, што значи дека 98% од произведените парчиња се со прифатливи толеранции. Дијаграмите што го прикажуваат однесувањето на дебелините се претставени на Слика 5.41 и Слика 5.42.



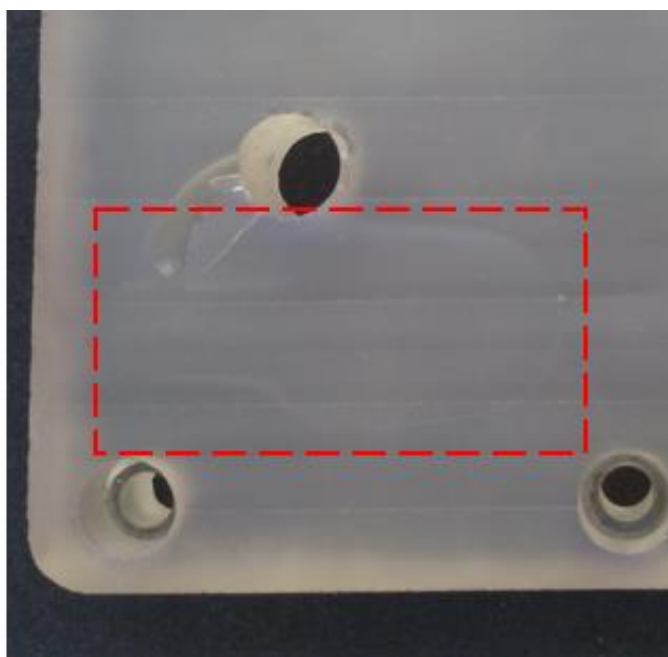
Слика 5.41: Дијаграм за измерените вредности на дебелината на епруветите (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.42: Дијаграм за измерените вредности на дебелината на трапезните плочки (Извор: Сопствено истражување)

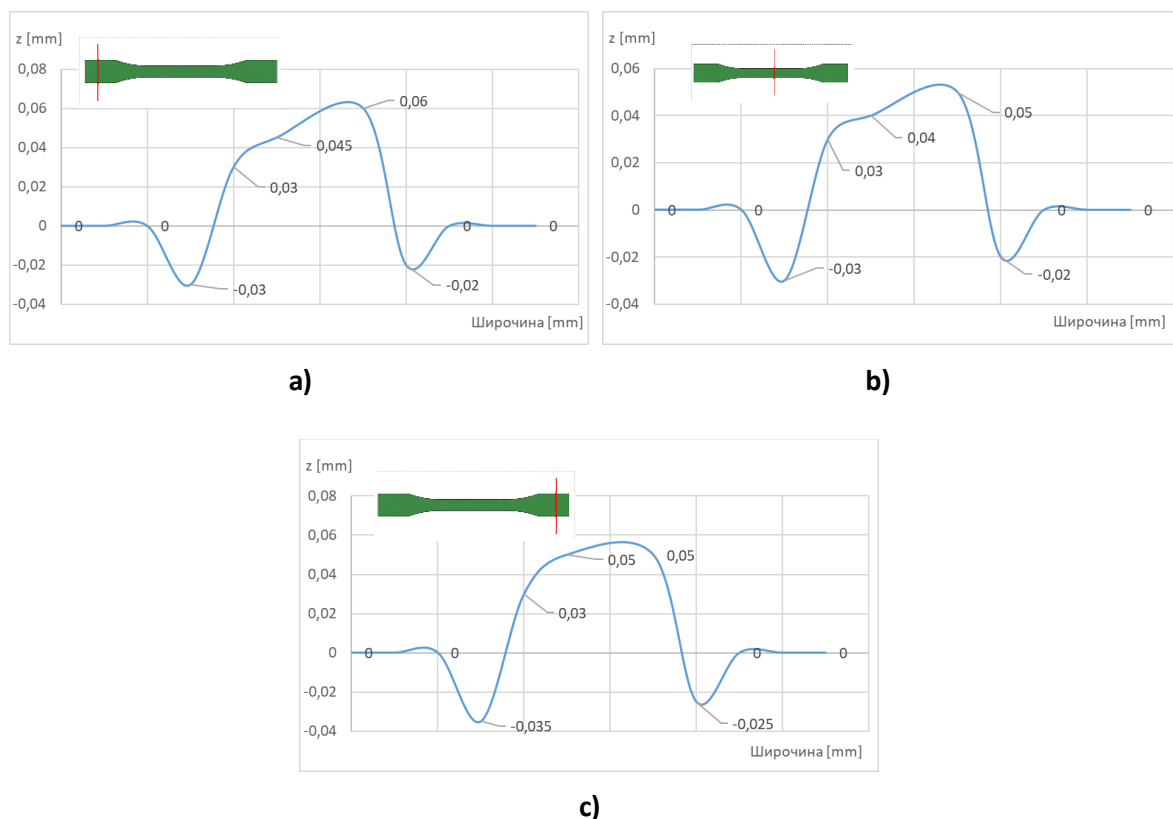
Кај деловите од гнездо 1 сите отстапувања во дебелината на деловите се над номиналната вредност и имаат опаѓачки тренд. Кај второто гнездо отстапувањата во мерките се од двете страни на дефинираната номинална мерка, функцијата на трендот исто така опаѓа, меѓутоа, вкупниот опсег на вредностите е речиси за 3 пати повисок во однос на измерените дебелини од првото гнездо.

Опаѓачкиот тренд во дебелините кај деловите изработени од двете гнезда е спротивен на иницијалната претпоставка пред експериментот. Имено, почетната хипотеза е дека со текот на работните циклуси ќе дојде до трошење на контактните површини што ќе ја зголеми длабочината на гравурата и ова ќе предизвика раст кај дебелината на парчињата со текот на времето. Опаѓачките функции кај дијаграмите покажаа спротивни трендови. Причината за оваа појава е утврдена со дополнителна анализа на рамниот вметок по вбригањето. Имено, на поделбената површина се видливи траги кои ја исцртуваа контурата на пластичниот дел што се изработува (Слика 5.43).

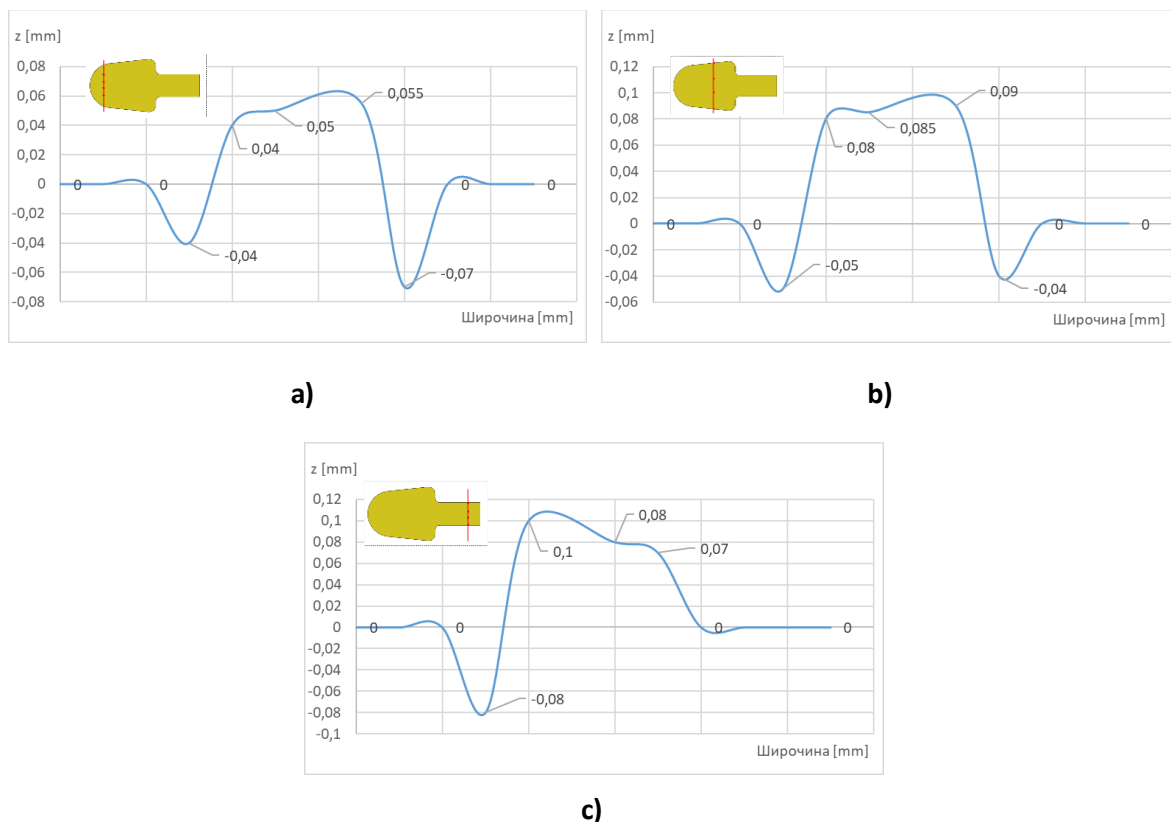


Слика 5.43: Појава на централно испакнување и вдлабнувања по контурата на пластичниот дел кај рамниот стереолитографски вметок (Извор: Сопствено истражување)

Под дејство на притисокот на вбризување по контурата се појавуваат вдлабнувања и централниот дел се деформира нагоре, што го намалува просторот во гравурата и доведува до континуирано намалување на дебелината на произведените делови, што се отсликува од функциите на трендовите во дијаграмите. Овие нерамнини се измерени кај двете гравури и приближниот профил на деформираните површини е даден на следните графикони.



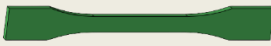

Слика 5.44: Профил на деформација на гравура по 50 работни циклуси кај гнездо 1; а) глава 1; б) мерно подрачје; с) глава 2; (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.45: Профил на деформација на гравура по 50 работни циклуси кај гнездо 2; а) глава 1; б) мерно подрачје; с) глава 2; (Извор: Сопствено истражување)

Од Слика 5.44 и Слика 5.45 се забележуваат разликите во висините во однос на поделбената рамнина. Длабочината на жлебот по работ на контурата е континуирано присутен со просечни длабочини од 0,04 до 0,06 mm. Најмалата длабочина е измерена на локациите на вливната порта соодветно прикажана на Слика 5.44 (с) и Слика 5.45 (с). Кај Гнездо 1 тука е измерена вредност од 0,025 mm, додека кај гнездо 2 од таа страна не е регистрирано никакво отстапување од поделбената површина.

Табела 5.16: Функционални зависности за толерантните отстапувања на дебелините од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

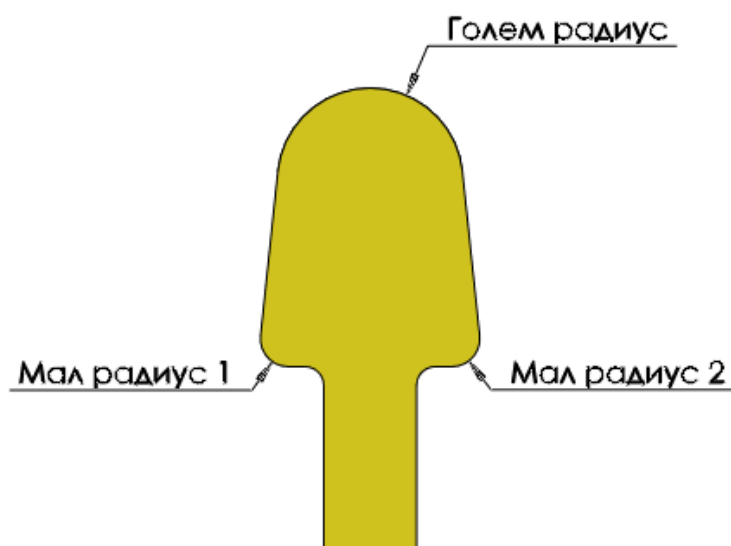
Материјал на гравура: Rigid10k		
		
	Дебелина дел 1, епрувета тип 1BA, ISO 527 [mm]	Дебелина дел 1, заоблена трапезна плочка [mm]
Номинална мерка	2	2
Линиска функција на тренд	$y = -0,0003x + 2,09$	$y = -0,0005x + 2,02$
Тип на наклон	↘	↘
Толерантна граница во однос на трендот	1,9	1,9
Теоретски број на работни циклуси пред надминување на дозволената толеранција	623	236

Деталните податоци од мерењата на дебелини се дадени во Табела 8.28 во Прилог

Е.

5.3.3.2. Радиуси

Статистички информации за сите измерени радиуси може да се најдат во Табела 5.17. Оваа табела ги прикажува сите мерења на радиус од трапезните примероци изработени во второто гнездо на гравурата. На Слика 5.46 се прикажани ознаките на радиусите на примероците.



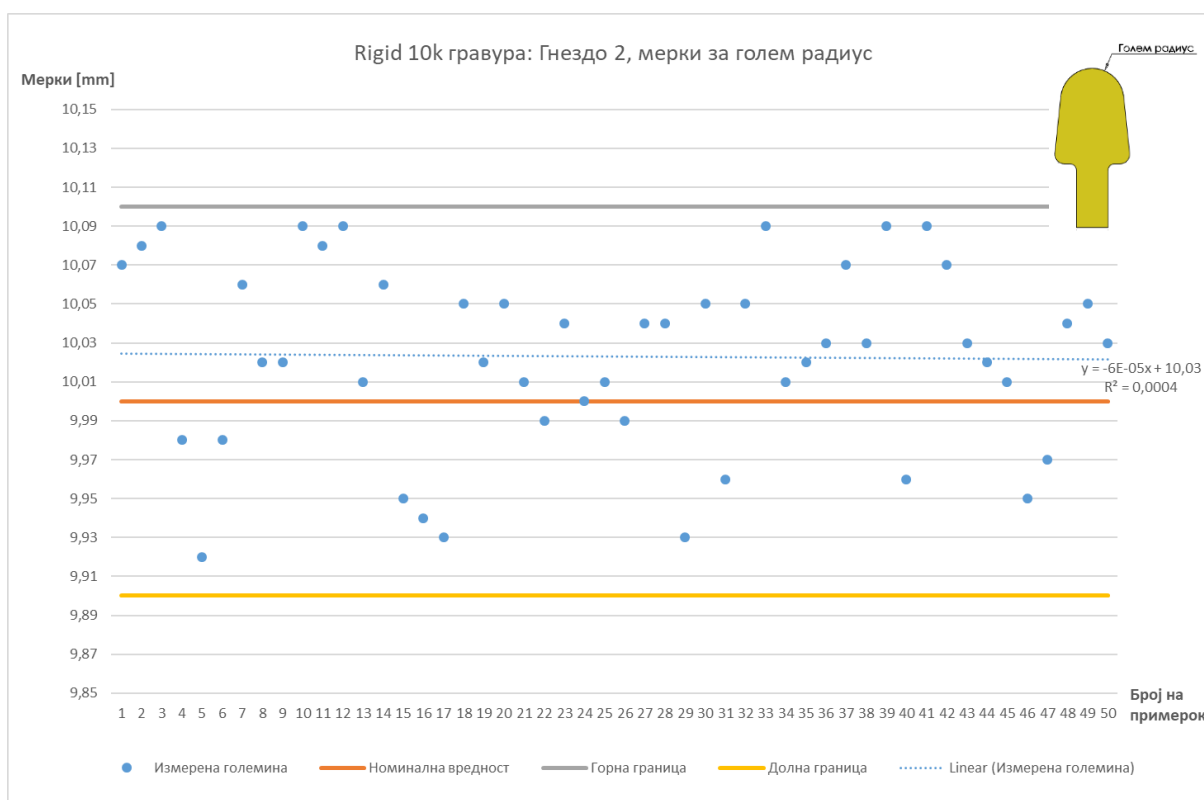
Слика 5.46: Ознаки на контролираните радиуси кај испитуваниот модел (Извор: Сопствено истражување)

Од вкупно 50 индивидуални компоненти изработени со користење на стереолитографските гравури се собрани 150 мерки на радиуси, од кои 145 или 96,7 % се димензионално прифатливи. За димензионално прифатлива мерка се смета доколку отстапувањето е во интервал од $\pm 0,1$ mm. Од сумарните податоци, исто така, се забележува дека само кај една мерка (мал радиус 1) опсегот на податоците е малку поголем од установената зона на толеранција и изнесува 0,27 mm. За сите останати радиуси, пресметаниот опсег на мерките се движи до 0,22, што е речиси еквивалентно на усвоената дозволена зона на толеранција.

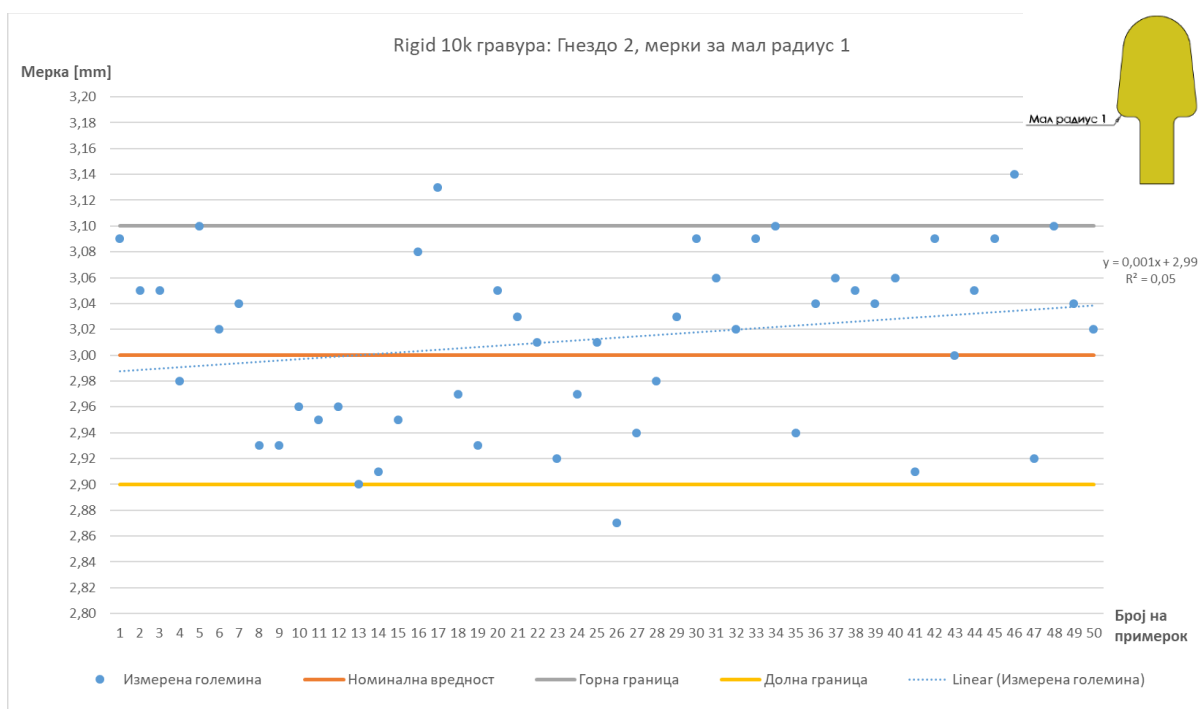
Дијаграмите дадени во прилог го прикажуваат однесувањето на измерените радиуси прикажани на Слика 5.47, Слика 5.48 и Слика 5.49.

Табела 5.17: Статистички резултати од мерењата на радиусите на примероците од гнездо 2 од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

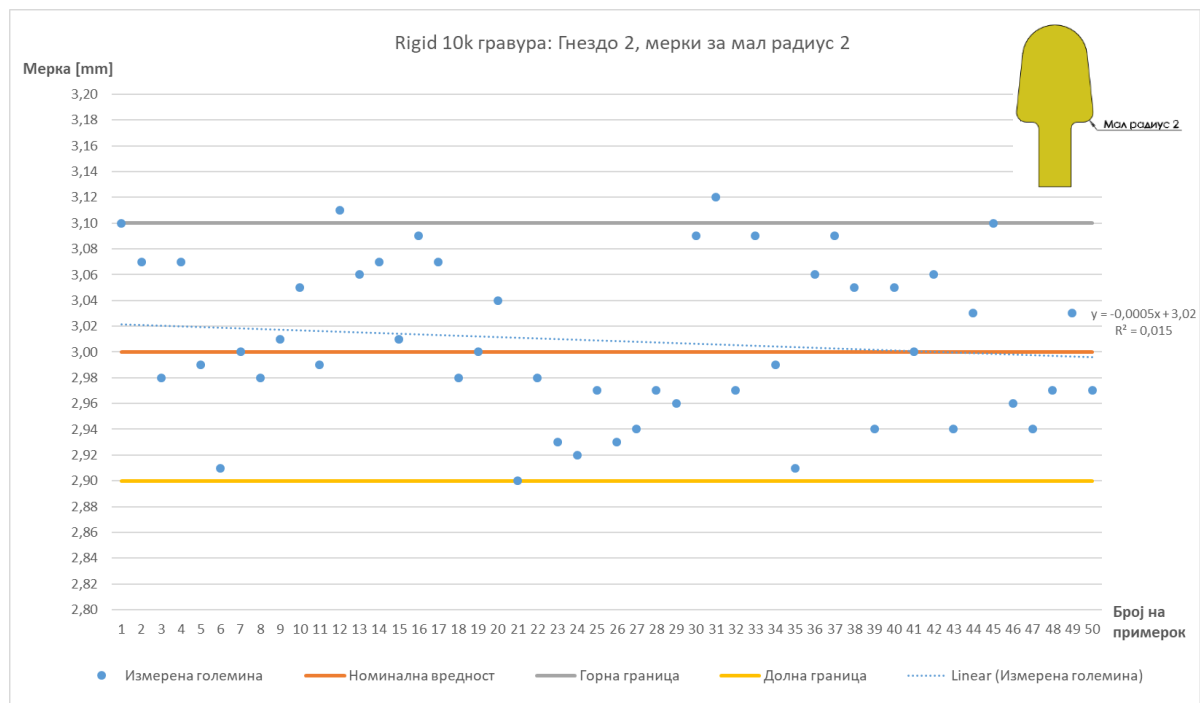
Материјал на гравура Rigid10k, гнездо 2, заоблена трапезна плочка			
	Мерки [mm]		
	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 (лево) [mm]	Мал радиус 2 (десно) [mm]
Број на мерења	50	50	50
Во рамки на толеранци	50	47	48
Надвор од толеранци	0	3	2
Номинална мерка	10	3	3
Min	9,92	2,87	2,90
Max	10,09	3,14	3,12
Опсег	0,17	0,27	0,22
Просек	10,02	3,01	3,01
Медијана	10,03	3,025	3
Стандардна девијација	0,048	0,068	0,061
Просечна грешка	0,0232	0,013	0,009
% прифатливи	100%	94%	96%



Слика 5.47: Дијаграм за измерените вредности на големиот радиус на трапезните плочки (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.48: Дијаграм за измерените вредности на мал радиус 1 на трапезните плочки (Извор: Сопствено истражување)



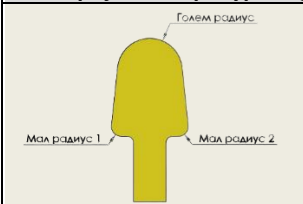
Слика 5.49: Дијаграм за измерените вредности на мал радиус 2 на трапезните плочки (Извор: Сопствено истражување)

Овие дијаграми графички го прикажуваат однесувањето на мерките за време на сите работни циклуси. Податоците покажуваат дека постои стабилен тренд кај мерките, што се гледа од линиските функции на дијаграмите. Кај мерките на големиот радиус, функцијата на трендот е речиси паралелна со хоризонталната оска, што значи дека севкупно постојат многу мали варијации во однос на номиналната димензија на делот и дека теоретски, оваа мерка ќе остане во толеранциите за дадената толеранција за доста голем број работни циклуси.

Кај малите радиуси 1 и 2, функциите на трендот имаат спротивни наклони. Ова може да се должи на малите разлики во оддалеченоста на радиусите во однос на вливната порта, меѓутоа, за точно определување на причината за ваквата зависност, потребно е да се направат дополнителни експерименти кои ќе го земат предвид овој фактор.

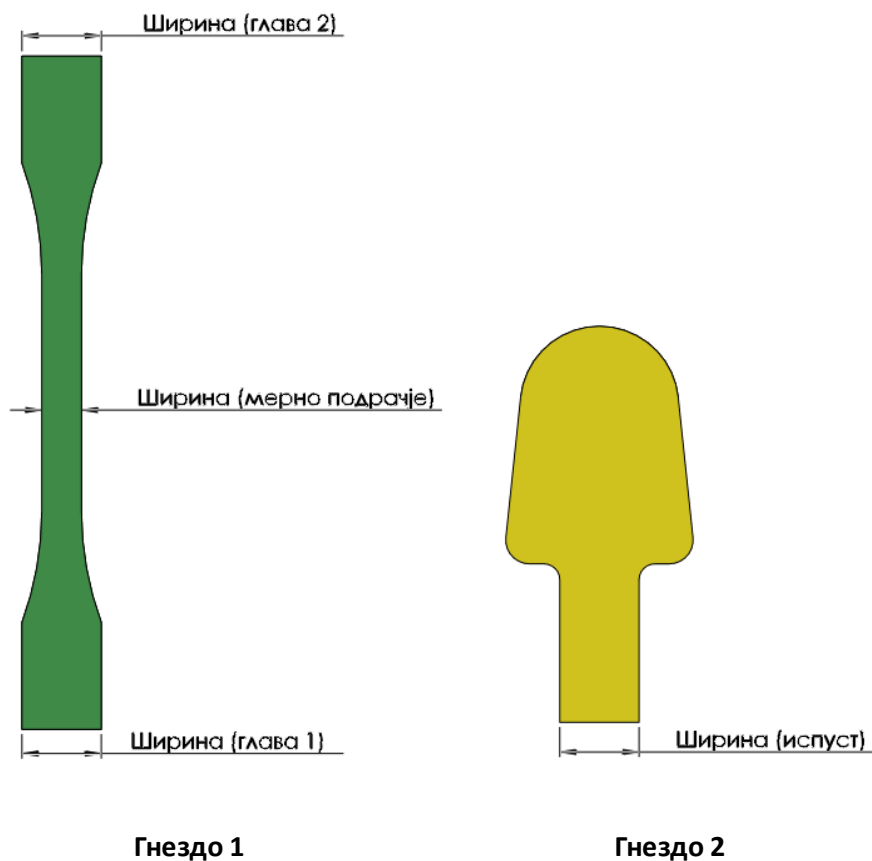
Сите собрани податоци од овие мерења се дадени во Табела 8.29 во Прилог Е.

Табела 5.18: Функционални зависности за толерантните отстапувања на радиусите од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гавура Rigid10k, гнездо 2, заоблена трапезна плочка			
	Голям радиус [mm]	Мал радиус 1 (лево) [mm]	Мал радиус 2 (десно) [mm]
Номинална мерка	10	3	3
Линиска функција на тренд	$y = -6 \cdot 10^{-5}x + 10,03$	$y = 0,001x + 2,99$	$y = -0,0005x + 3,02$
Тип на наклон	↘	↗	↘
Толерантна граница во однос на трендот	9,9	3,1	2,9
Теоретски број на работни циклуси пред надминување на дозволената толеранција	2083	113	244

5.3.3.3. Широчини

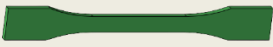
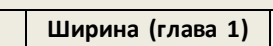
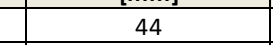

Во Табела 5.19 се прикажани сумарните статистички податоци собрани од измерените ширини на обликуваните делови.



Слика 5.50: Ознаки на контролираните широчини кај моделите (Извор: Сопствено истражување)

Како што се гледа на Слика 5.50, од парчињата изработени во двете гнезда на стереолитографската гравура има 4 различни мерки за широчина. Направени се вкупно 182 мерења на широчините, од кои 176 мерења или 96,7% се димензионално прифатливи и во рамки на усвоените толерантни подрачја.

Табела 5.19: Статистички резултати од мерењата на широчините на примероците од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

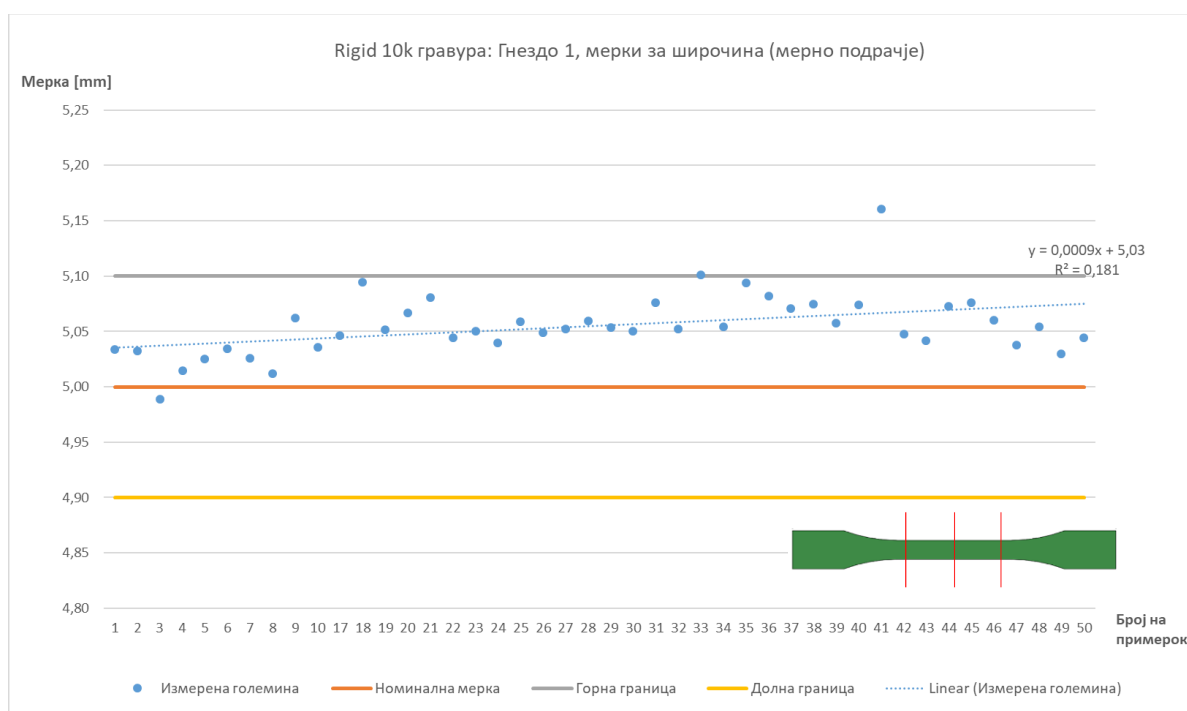
	Материјал на гравура: Rigid10k			
				
	Ширина (мерно подрачје) [mm]	Ширина (глава 1) [mm]	Ширина (глава 2) [mm]	Ширина (испуст) [mm]
Број на мерења	44	44	44	50
Во рамки на толеранции	41	43	44	48
Надвор од толеранции	3	0	0	2
Номинална мерка	5	10	10	10
Min	5,019	9,991	9,981	10,048
Max	5,190	10,110	10,083	10,114
Опсег	0,172	0,119	0,103	0,066
Просек	5,085	10,075	10,048	10,080
Медијана	5,082	10,077	10,053	10,081
Стандардна девијација	0,028	0,019	0,023	0,011
Просечна грешка	0,085	0,075	0,048	0,080
% прифатливи	93%	98%	100%	96%

Мерењата на широчина се наоѓаат на дијаграмите од Слика 5.51 до Слика 5.54. Врз основа на овие графикони може да се направат неколку заклучоци. Сите мерења се поблиску до горното толерантно подрачје за доделената мерка и функциите на трендовите за сите различни широчини имаат растечки тренд. Ова е особено евидентно кај дијаграмот за широчините на правоаголниот испуст кај трапезните делови од гнездо 2. Кај оваа мерка димензиите исклучително блиску го следат трендот на раст и при крајот на мерењата веќе некои од деловите почнуваат да имаат ширина што е надвор од толерантното подрачје од $\pm 0,1$ mm.

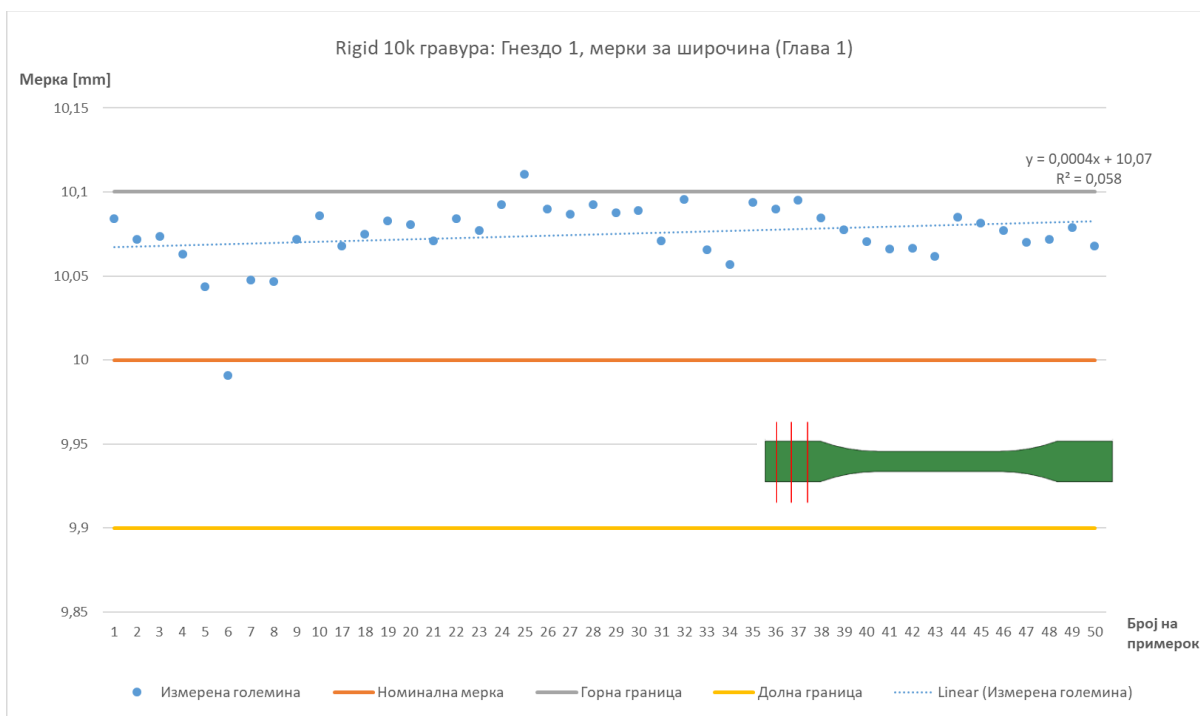
Слика 5.51 и Слика 5.53 ги прикажуваат дијаграмите за широчината на мерното подрачје и глава 2 на епруветата. Кај овие мерења сумарната линиска функција на трендовите има севкупно позитивен наклон, меѓутоа, кај последните мерења се забележува намалување на димензиите. Оваа појава е забележана и кај некои други мерења во овој докторски труд, што значи дека за попрецизна детерминација на однесувањето на тие специфични димензии, потребни се повеќе парчиња за тестирање.

Мерките за ширина на глава 1 дадени на Слика 5.52, исто така, имаат генерално позитивен наклон со единствено поголемо отстапување во трендот кај шестиот примерок. Слично и кај другите измерените широчини, и тука по 35-тиот примерок се забележува пад на измерените големини што е нешто помал во споредба со широчините на мерното подрачје и глава 2 на епруветата.

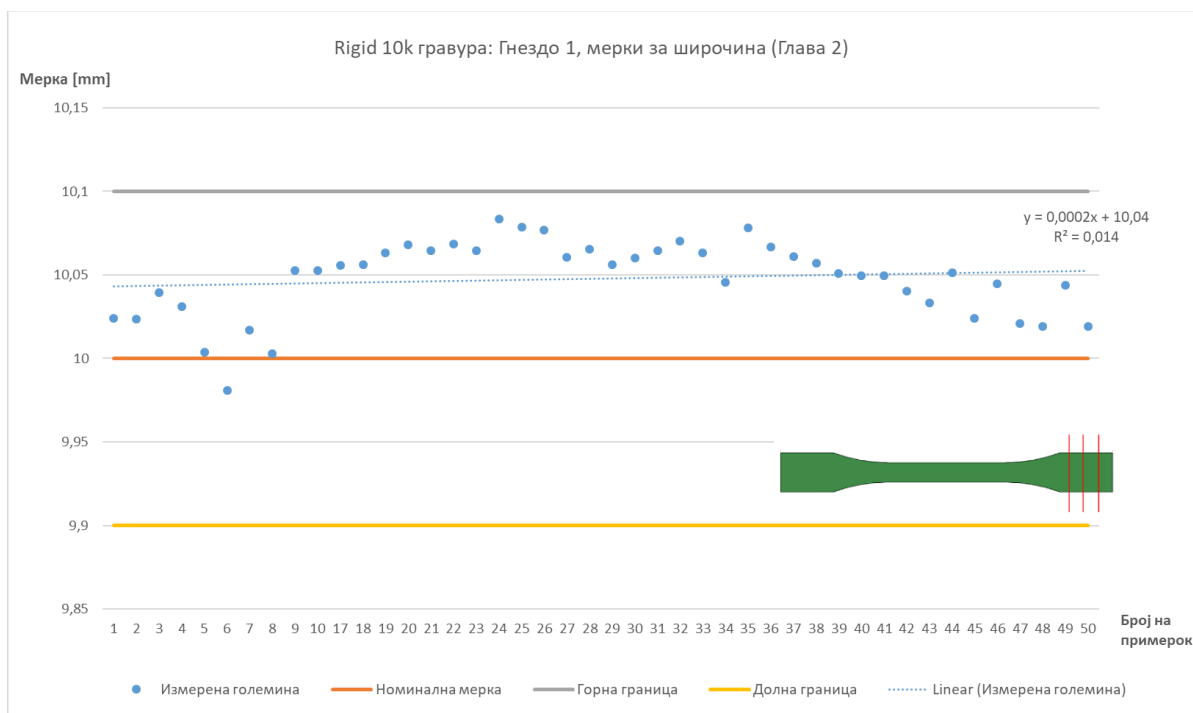
Меѓутоа, и покрај овој пад, кај сите широчини измерени кај епруветата изработена во гнездо 1 од алатот е задржан позитивен наклон. Доколку овие мерења се споредат со мерењата на ширина кај правоаголниот испуст кај гнездо 2 дадено на Слика 5.54, се забележува дека кај трапезот позитивниот тренд на измерените димензии се задржува за сите 50 примероци, што резултира со надминување на горната дозволена толеранција кај примерокот 48 и 50.



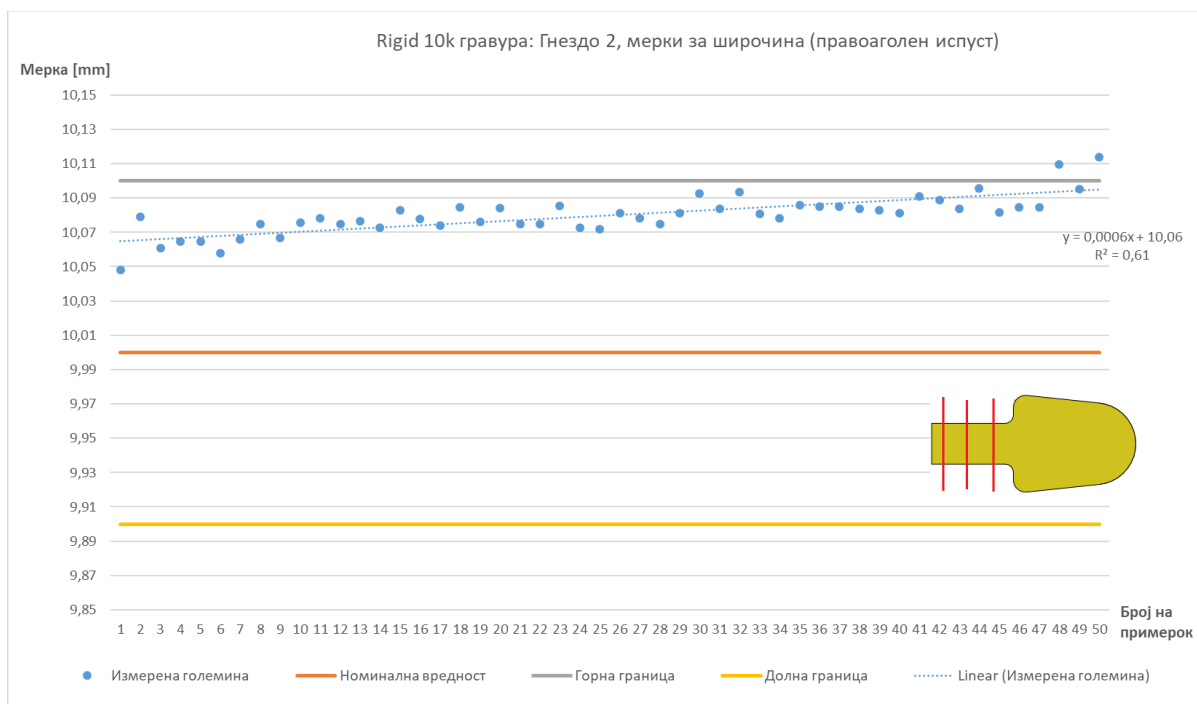
Слика 5.51: Дијаграм за измерените вредности за ширина кај мерно подрачје на епруветите (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.52: Дијаграм за измерените вредности за широчина кај глава 1 на епруветите (Извор: Сопствено истражување)





Слика 5.53: Дијаграм за измерените вредности за широчина кај глава 2 на епруветите (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.54: Дијаграм за измерените вредности за широчина кај правоаголниот испуст на трапезните плочки (Извор: Сопствено истражување)

Табела 5.20: Функционални зависности за толерантните отстапувања на широчините од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура: Rigid10k				
				
	Ширина (мерно подрачје) [mm]	Ширина (глава 1) [mm]	Ширина (глава 2) [mm]	Ширина (испуст) [mm]
Номинална мерка	5	10	10	10
Линиска функција на тренд	$y = 0,0009x + 5,03$	$y = 0,0004x + 10,07$	$y = 0,0002x + 10,04$	$y = 0,0006x + 10,06$
Тип на наклон	↗	↗	↗	↗
Толерантна граница во однос на трендот	5,1	10,1	10,1	10,1
Теоретски број на работни циклуси пред надминување на дозволената толеранција	73	82	285	60


5.3.3.4. Должина

Мерки за должина во овој експеримент се земени само од примероците од гнездо 1. Тоа значи дека се направени 44 мерења, од кои сите мерки се во прифатливите толеранции кои за номиналната должина на парчињата од 87 mm се движат во границите од $\pm 0,2$ mm. Статистичките податоци за овие должински мерења се дадени во Табела 5.21.



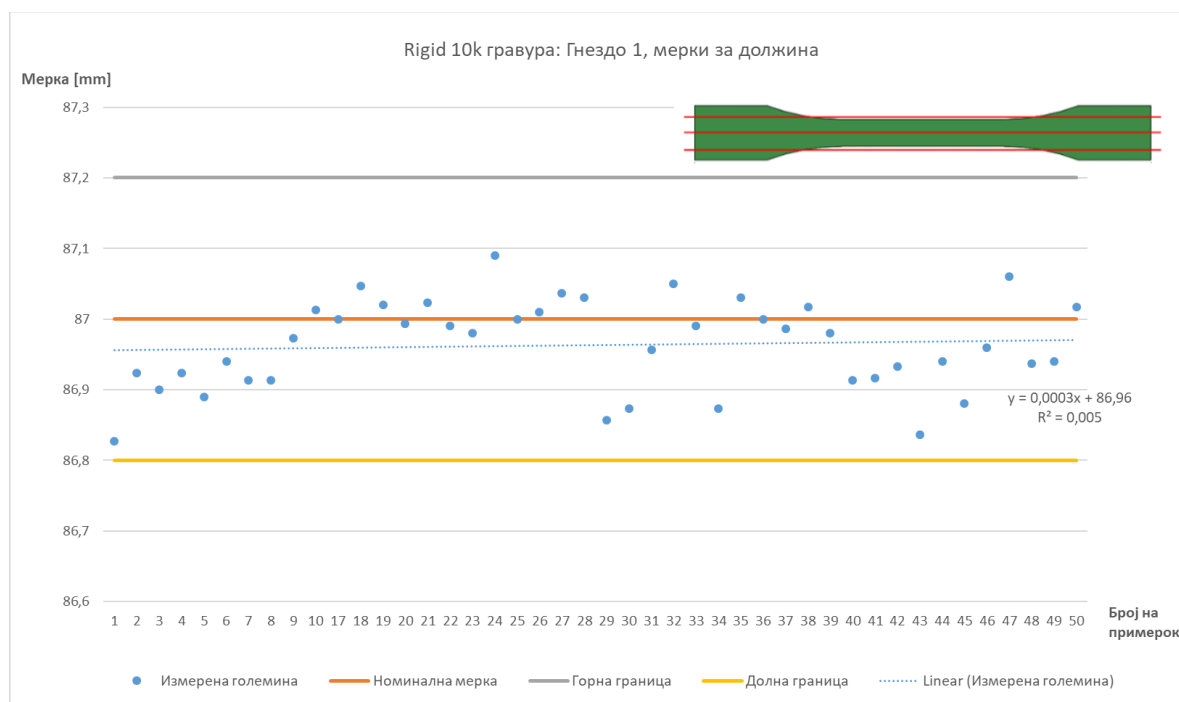
Слика 5.55: Ознака за контролираната должина кај моделот (Извор: Сопствено истражување)

Табела 5.21: Статистички резултати од мерењата на должина за примероците од гнездо 1 од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура Rigid10k гнездо 1, епрувета за испитување по ISO 527 тип 1BA	
	Должина [mm]
Број на мерења	44
Во рамки на толеранции	44
Надвор од толеранции	0
Номинална мерка	87
Min	86,827
Max	87,090
Опсег	0,263
Просек	86,963
Медијана	86,977
Стандардна девијација	0,064
Просечна грешка	-0,037
% прифатливи	100%


Од сумарните податоци се забележува дека опсегот на измерените вредности е 0,27 mm и е доста помал од рамките на установената зона на толеранција. Од дијаграмот за должинските мерења даден на Слика 5.56 може да се види дека димензионалното однесување на одделните компоненти е многу слично со текот на времето. Присутниот

тренд во мерките има благо позитивен наклон, што теоретски значи дека деловите стануваат подолги со одминување на повеќе работни циклуси. Ова значи дека настанува димензионална промена како резултат на последователното изложување на гравурата на растопен полимерен материјал кој се вбригува под висок притисок во гнездото. Меѓутоа, малиот наклон исто така покажува дека должинската мерка е релативно стабилна, што се отсликува и со високиот теоретски број на парчиња што би можеле да се изработат пред надминување на толерантната граница (Табела 5.22)



Слика 5.56: Дијаграм за измерените вредности за должината кај епруветите од гнездо 1 (Извор: Сопствено истражување)

Табела 5.22: Функционални зависности за толерантните отстапувања на должината на епруветата од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура High Temp гнездо 1, епрувета за испитување по ISO 527 тип 1BA	
	Должина [mm]
Номинална мерка	87
Линиска функција на тренд	$y = 0,0003x + 86,96$
Тип на наклон	↗
Толерантна граница во однос на трендот	87,2
Теоретски број на работни циклуси пред надминување на дозволената толеранција	813,33

5.3.4. Заклучни согледувања за експеримент 2

Сите функционални зависности од мерењата од овој експеримент добиени од распределбата на мерките низ различните работни циклуси се дадени сумарно во Табела 5.23.

Табела 5.23: Сумарни функционални зависности за контролираните мерки во однос на бројот на работни циклуси (Извор: Сопствено истражување)

Разгледувана мерка		Функционална зависност	R ²
Дебелина	гнездо 1	$f(x) = -0,0004 \cdot x + 2,09$	0,096
	гнездо 2	$f(x) = -0,0003 \cdot x + 2,01$	0,019
Ширина	мерно подрачје	$f(x) = 0,0009 \cdot x + 5,03$	0,181
	глава 1	$f(x) = 0,0004 \cdot x + 10,07$	0,058
	глава 2	$f(x) = 0,0002 \cdot x + 10,04$	0,014
	испуст	$f(x) = 0,0006 \cdot x + 10,06$	0,610
Должина	примерок 1	$f(x) = 0,0003 \cdot x + 86,96$	0,005
Радиус	голем радиус	$f(x) = -6E - 05 \cdot x + 10,03$	0,0004
	мал радиус 1	$f(x) = 0,001 \cdot x + 2,99$	0,050
	мал радиус 2	$f(x) = -0,0005 \cdot x + 3,02$	0,015

Соодветните дијаграми за измерените вредности во претходните поглавја овозможуваат и визуелно да се утврди потенцијалниот тренд. Параметарот x во

равенките е бројот на циклус, додека $f(x)$ е целната димензија вклучувајќи ја и најголемата или најдолната дозволена толеранција. Димензионалните толеранции за контролираните мерки во овој експеримент се дадени во Табела 5.24.

Табела 5.24: Дозволени толеранции за контролираните мерки (Извор: [131])

Контролни мерки	Должина	Дебелина	Широчина - мерно подрачје	Широчина - глава 1	Широчина - глава 2
Номинална големини [mm]	75	2	5	10	10
Дозволени толеранции	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$

Според вака добиените изрази, за примена на стереолитографски гравури за производство на пластични делови теоретски може да се предвиди по колку работни циклуси би дошло до нарушување на контролната димензија што е критична за даден производ. Во зависност од предзнакот на коефициентите пред променливата x во равенките може да се утврди дали функцијата има позитивен или негативен наклон и според тоа знаеме дали конкретната мерка се зголемува или се намалува по секој работен циклус и дали при пресметката да се усвои долната или горната толерантна граница.

Од добиените резултати може да се забележи дека кај овие математички модели има значителен простор за подобрување со оглед на ниските вредности на R^2 . Мерките на радиусите се со особено високи отстапувања од генералниот тренд, што може да се забележи и на дијаграмите на Слика 5.47, Слика 5.48 и Слика 5.49.

Прецизноста на моделите е највисока за мерките за ширина на испуст, меѓутоа, и таму како и кај останатите модели може да се добијат подобрувања со експериментирање на поголем број примероци, што ќе резултира со попрецизна финална функција. Во овој експеримент условите за инјекционо вбригање не се разгледувани дополнително и се одржувани константни низ сите циклуси.

5.4. Резултати од анализата на механичките карактеристики кај пластични модели изработени во стереолитографски гравури

Во ова поглавје е даден преглед на податоците што се добиени за време на третиот експеримент од овој докторски труд. Сите стандардни епрувети изработени во првото гнездо од стереолитографската гравура се подложени на тест на испитување со истегнување според стандардот ISO 527 и добиените резултати за максималната јачина на истегнување и максималната релативна деформација се споредени со референтните вредности од производителот. Резимираните резултати од сите мерења се прикажани во Табела 5.25.

Како што може да се види на Слика 5.35, кај изработените примероци по 25-тиот работен циклус се појави венец кој прогресивно се влошува. Интензивно влошување е забележано по 40-тиот работен циклус, меѓутоа, венецот е најизразен кај двете глави на епруветата. Од оваа причина, механичкото испитување со истегнување е направено на примероците без отстранување на венецот. Дебелината и широчината на венецот во зоната на мерното подрачје на епруветата се занемарливо мали (Слика 5.57). Дебелината на венецот во овој регион е 0,12 mm, што е само 6% од номиналната дебелина кај примероците и незначително влијае врз напречниот пресек.

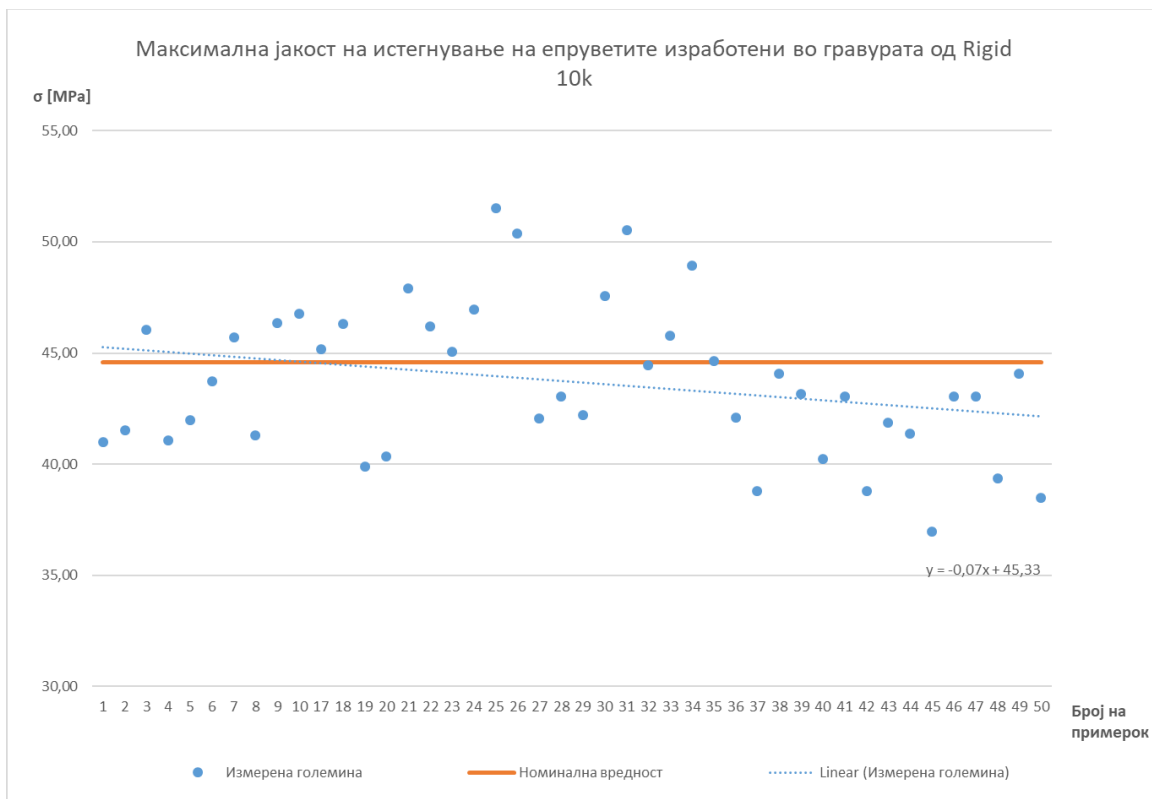


Слика 5.57: Широчина на формираните венец во близина на мерното подрачје на епруветата (Извор: Сопствено истражување)

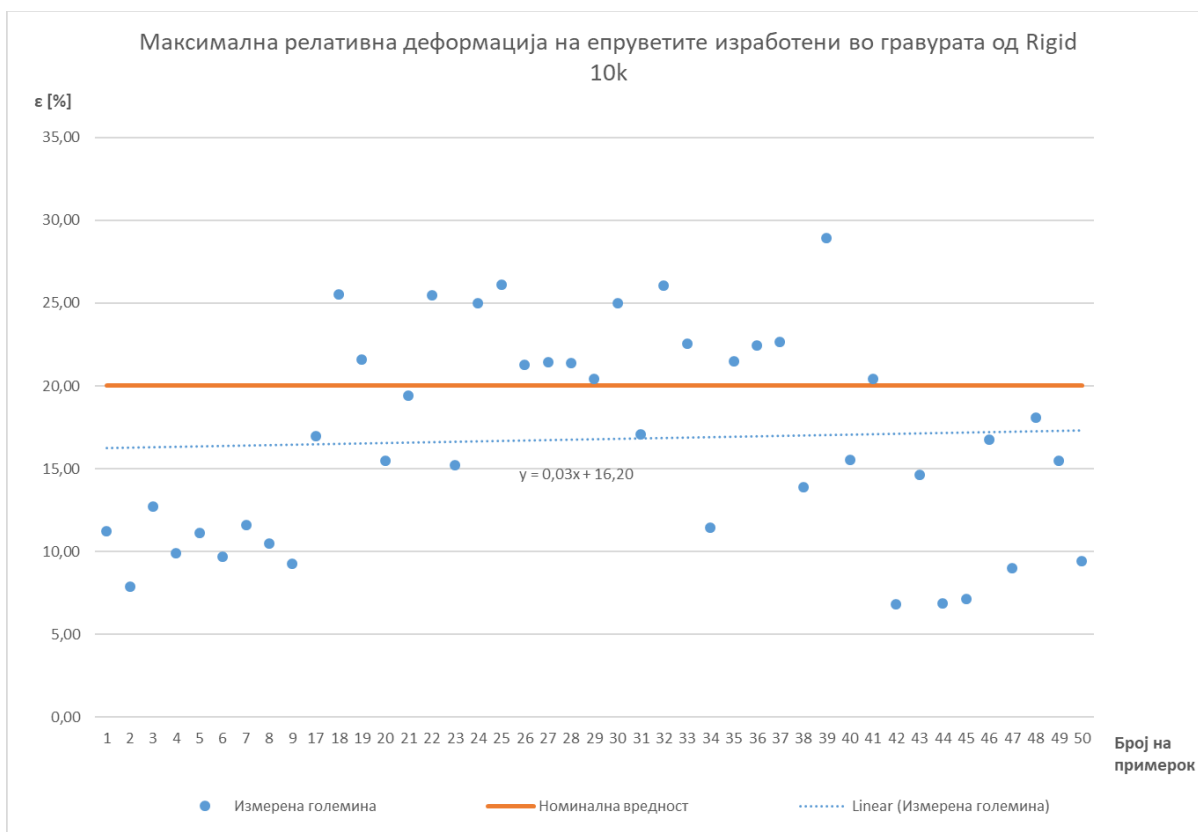
Табела 5.25: Статистички резултати од испитувањата на истегнување на стандардните епрувети добиени од гнездо 1 од гравурата изработена од материјалот Rigid10k (Извор: Сопствено истражување)

Материјал на гравура Rigid10k, гнездо 1, епрувета за испитување по ISO 527 тип 1BA		
	Максимално напрегање σ_m [MPa]	Максимална релативна деформација ϵ [%]
Број на мерења	44	43
Мерки еднакви или поголеми од референтните	17	17
Мерки помали од референтните	27	26
Номинална мерка	44,6	20
Min	36,961	6,820
Max	51,534	28,932
Опсег	14,572	22,112
Просек	43,702	16,763
Медијана	43,113	16,768
Стандардна девијација	3,395	6,334
Просечна грешка	-0,898	-3,237
% прифатливи	39%	40%

Тестирањето е направено на 44 целосно вбригани парчиња добиени од претходниот експеримент. Притоа се анализирани резултатите за максималната јачина на истегнување σ_m за сите примероци, додека максималната релативна деформација ϵ се анализира за 43 примероци. Причината за ова е што за време на тестирањето на 10-тиот примерок, Shimatzu Autograph AGS-X машината изгуби контакт со софтверот за управување и тестот не можеше да се реализира докрај за да се измери деформацијата. Со оглед на тоа дека е надмината точката на максимална јачина на истегнување, таа вредност е позната и е вклучена во статистичките пресметки за јакоста на вбриганите парчиња.



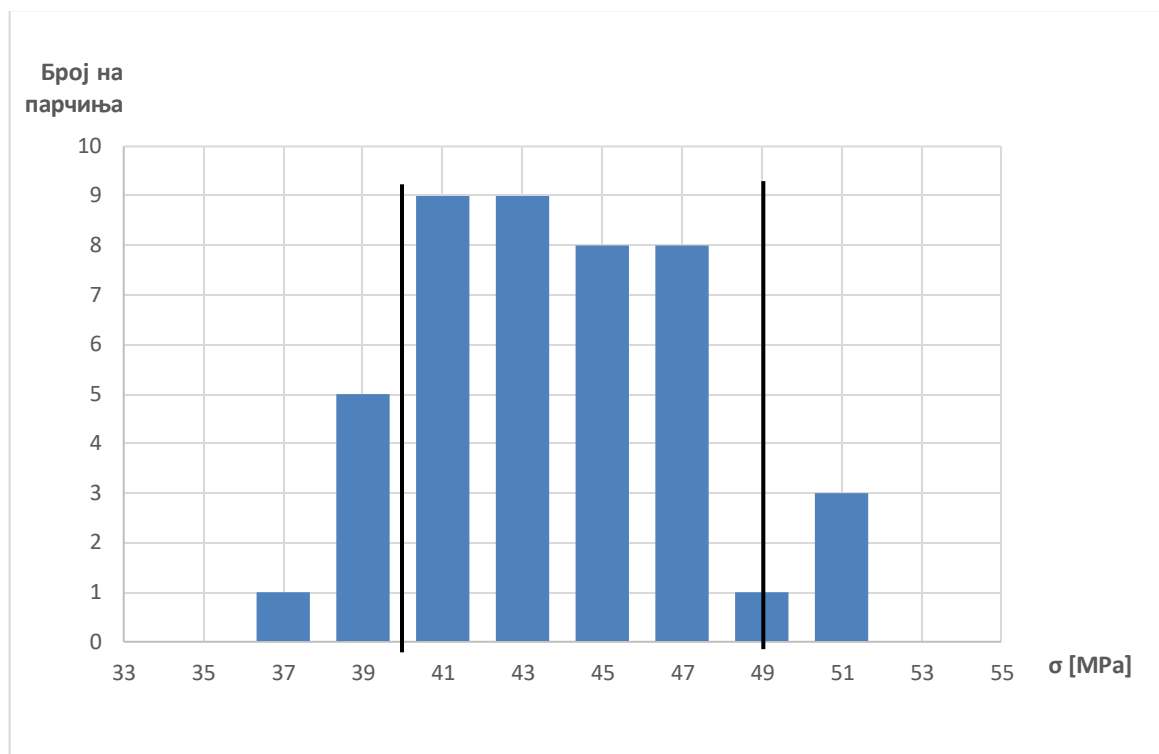
Слика 5.58: Дијаграм за измерените вредности за максимална јакост на истегнување (Извор: Сопствено истражување)



Слика 5.59: Дијаграм за измерените вредности за максимална релативна деформација (Извор: Сопствено истражување)

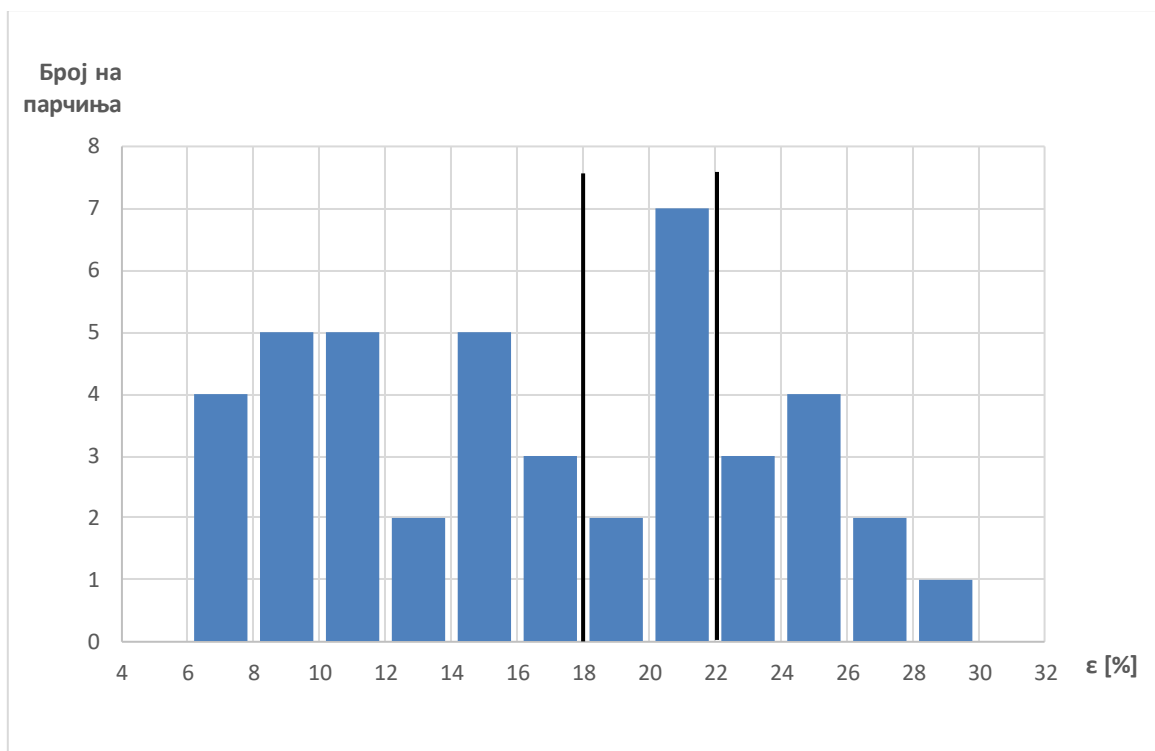
На Слика 5.58 и Слика 5.59 се прикажани дијаграмите за максималната јачина на истегнување и максимална релативна деформација. Прикажаната номинална вредност за секој дијаграм е земена според информациите од производителот на полимерниот материјал што се користи во истражувањето (Табела 8.5).

Резултатите од испитувањата покажаа дека само 39% од испитаните примероци имаат јакост поголема или еднаква на номиналната, што според официјалниот Datasheet на материјалот изнесува 44,6 МПа. Меѓутоа, ако внимателно ги погледнеме мерењата, повеќето од примероците, поточно 86,36% од парчињата имаат јакост на истегнување што е само 10% помала од номиналната. Распределбата на јачината на истегнување (Слика 5.60) за сите примероци, исто така, има добра нормална дистрибуција.



Слика 5.60: Хистограм за распределба на измерената јакост (Извор: Сопствено истражување)

Во однос на максималното издолжување, 40% од примероците имаат релативна деформација поголема или еднаква на номиналната, што според официјалниот Datasheet на материјалот изнесува 20 %. Кај релативната деформација максималното отстапување од номиналното кај некои примероци е доста големо. Кај 10 од парчињата е измерена релативна деформација од 10 % или помалку, што е повеќе од 50 % помала вредност од номиналната. Притоа распределбата на издолжувањето кај сите примероци е доста лоша, како што се гледа од хистограмот на Слика 5.61.



Слика 5.61: Хистограм за распределба на измерената релативна деформација (Извор: Сопствено истражување)

Врз база на овие истражувања може да се заклучи дека стереолитографскиот фотополимер од кој е изработена гравурата има генерално негативно влијание врз механичките карактеристики на изработените делови, особено врз жилавоста на материјалот. Со оглед на тоа дека останатите процесни параметри се држеа на константни вредности за време на вбригањето, оваа претпоставка е валидна, но поради малиот број парчиња, овој феномен и понатаму треба да се испита, особено со акцент на начинот и времето на ладење на гравурите со оглед на тоа дека претходните истражувања во оваа област заклучиле дека термичките карактеристики на фотополимерите, особено ниската топлотна спроводливост, се едни од потенцијалните причини за намалените механички карактеристики на деловите изработени во ваков тип гравури.

6. ЗАКЛУЧОК

Врз основа на спроведените теоретски и експериментални анализи, како и спроведените мерења на експериментално добиените примероци од полимерен материјал, добиени со процес на инјекционо вбризгување во алати кои имаат гравури добиени со STL, може да се постават следниве заклучни согледувања:

1. Пластичните делови обликувани преку полимерни алати добиени со Rapid Tool ги исполнија посакуваните димензионални барања во контролните делови со различни степени на сложеност на геометриите.
2. Врз основа на брзината на промена на димензиите кај вбризганите делови во текот на животниот век на алатот, стереолитографските гравури ги задржуваат саканите толеранции кај деловите за време на поголемиот дел од реализираните работни циклуси на алатите.

Овие два заклучоци покажуваат дека стереолитографските гравури се стабилни и цврсти и затоа нивната примена може да се смета како изводлива за употреба како функционални гравури во алатите за инјекционо вбризгување за мали серии на парчиња.

Првиот заклучок е донесен откако е утврдено дека деловите обликувани во стереолитографските гравури ги задоволуваат бараните димензии во рамките на наведените толеранции во 470 мерења на примероците со 96,1 % задоволувачки резултати. Понатаму, 77 од 94 примероци ги задоволија сите конструктивни спецификации. Тоа значи дека 82,9% од сите примероци се изработени во димензионални рамки што се прифатливи за нивните соодветни димензионални барања. Вака сумираните кумулативни податоци покажуваат дека пластичните делови добиени со инјекционо вбризгување во стереолитографски гравури не само што исполнуваат индивидуални димензионални барања, туку со ваквиот тип алати се задоволуваат димензионалните барања кај делови со поширок спектар на димензии и форми. Исто така, податоците покажуваат дека со стереолитографските гравури е можно да се исполнат димензионалните ограничувања за поголемиот дел од изработените пластични модели.

Од спроведените испитувања може да се извлече заклучок дека степенот на варијабилност кај добиените модели, во текот на животниот век на стереолитографската гравура, е помал од стандардните толеранции за делови добиени со инјекционо вбригување.

Најголемата варијација кај обликуваните примероци е 0,190 mm за едноставните геометрии каде што наведената дозволена толеранција изнесува $\pm 0,1$ mm. Меѓутоа, во овој конкретен случај 94 % од примероците се вклопија во рамките на една стандардна девијација, $\pm 0,05$ mm, што е под наведениот опсег на дозволена толерантно отстапување. Понатаму, откриено е дека степенот на димензионална промена кај стереолитографските гравури се движи помеѓу 0,005 и 0,006 % по работен циклус. Ова значи дека во просек кај еден модел што се изработува во стереолитографска гравура би се појавила димензионална промена од 0,025 mm кај некоја специфична мерка на секои 20 работни циклуси на алатот.

На крај, и покрај тоа што поголемиот број од дијаграмите имаат видливи екстреми што се соодветни со димензионални отстапувања кај примероците, кај различните стереолитографски гравури отстапувањата во најголем дел остануваат во рамките на нивните специфицирани граници за толеранција за поголемиот дел од животниот век на алатот. Овие функции на трендови со специфичен наклон покажуваат дека кај гравурите се појавуваат одредени разлики со текот на времето и дека ова влијае врз деловите што се изработуваат. Ова потенцијално може да значи дека доколку иницијалните димензии во стереолитографските гравури се усвојат да бидат близу до долниот крај на дозволените толеранции, тогаш би можеле да се зголемат целокупниот животен век на гравурите и бројот на работните циклуси каде што со нив ќе може да се изработуваат парчиња кои би ги задоволиле димензионалните барања.

Покрај сè, за ефикасна имплементација на стереолитографски гравури за производство на мали серии или прототипирање на пластични делови, треба да се надминат неколку препреки.

Еден од главните проблеми е успешна и ефикасна контрола на температурата во гравурата. Кога станува збор за квалитетот на деловите кои се добиваат со инјекционо вбригување, интеракцијата помеѓу оптималната температура на алатот и

температурата на топење е од суштинско значење. Постојат голем број работи што треба да се земат предвид за да се избегне губење на важни својства на обработениот полимерен материјал. Соодветен избор на температурата на алатот во зависност од материјалот кој се вбригува оневозможува предвременно стврднување и дозволува полимерните макромолекули да формираат подредена структура. Со загревање на алатот на соодветна температура се добива контролирано ладење и делот може да се исфрли од гравурата без негово оштетување. Ова важи и за конвенционалните алати и за алатите добиени со стереолитографски методи на адитивно производство.

Во процесот на инјекционо вбригување се работи со температури на топење на полимерните материјали од 200 °C до 430 °C, а температурата на алатот притоа се движи измеѓу 20 °C и 220 °C, во зависност од материјалот кој се процесира. Температурата на топење мора да се одржува, во спротивно не може да се добијат индивидуалните карактеристики на полимерниот материјал. Ако температурата е превисока, материјалот може да се оштети; ако температурата е премногу ниска, материјалот нема да е доволно хомоген при топењето и може да се појават дефекти како воздушни џебови или линии.

При инјекционото вбригување во стереолитографските алати наспроти конвенционални алати од челик или алуминиум се појавуваат и разлики во условите на загревање на алатот. Загревањето на алатите на специфични температури во однос на полимерниот материјал кој се процесира го подобрува и го олеснува протокот на растопената полимерна маса низ алатот. Кога полимерниот материјал се загрева, неговата вискозност се намалува и таа може полесно да тече во сложените детали на гравурата на алатот. Ова е особено важно во случаи со сложени форми и фини детали. Доколку инјекционото вбригување се направи во услови каде што има голема температурна разлика помеѓу растопениот полимерен материјал и алатот, тогаш може да се предизвика термички шок, да дојде до предвременно стврднување на материјалот и потенцијално да се предизвика оштетување на алатот. Загревањето на алатните плочи помага да се спречи овој термички стрес и да се продолжи животниот век на гравурата.

Знаејќи го ова, доаѓаме до заклучокот дека за да се проектира успешен процес на инјекционо вбригување каде што некои од работните елементи на алатите се изработени со стереолитографија, мора да се земе предвид различната топлинска

спроводливост кај полимерните материјали и металите. Тоа повлекува потреба од поголема контрола при загревањето на стереолитографските гравури и зголемени работни циклуси поради побавното ладење на полимерните материјали.

Анализираните фотополимери, како и останатите комерцијално достапни фотополимерни маатеријали применливи во оваа област, немаат комплетен профил за теоретско моделирање на ладењето за даден алат и затоа поставувањето на работниот циклус за инјекционото вбризгување, доколку сакаме автоматска работа на машината, е нешто што би се правело мануелно со повеќе проби. Дури и кај релативно малите парчиња, кои во конвенционални метални алати би се изработувале без проблем и во отсуство на канали на ладење, кај стереолитографските алати ладењето е отежнато и често пати се препорачува дополнително воздушно ладење со компресиран воздух за скратување на работните циклуси.

Во однос на параметрите за процесирање во инјекционото вбризгување како притисок, температура, сила на држење и брзина на вбризгување, сите досегашни студии на случај укажуваа на тоа да се изберат ниските вредности од тоа што е препорачано за полимерниот материјал што се преработува. Овој конзервативен пристап е оптимален, особено кога се почнува со работа на нова гравура. Меѓутоа, за време на испитувањето дојдено е до заклучок дека конкретно за силата на притегање може да се користат повисоки вредности од тоа што е утврдено дека е потребно со симулацијата бидејќи јакоста на материјалите го дозволува тоа.

За добивање колку што е можно подобра поделбена површина, стереолитографските гравури мора машински да се доработат. Ова значи дека при самиот дизајн на гравурите ќе треба да се земат предвид додатоци за обработка за дополнително порамнување и ова додава дополнителни чекори за подготовка на алатот. Двата испитани материјали се обработливи, но материјалот Rigid 10k се покажа како исклучително лесен за дообработка со глодање. Можноста за појава на тешкотии при нагудувањето на толеранциите кај поделбената линија значи дека најпроблематични за изработка би биле гравурите со релјефна поделбена линија. Дополнителни техноекономски анализи за истражување на влијанието на поделбената

линија на гравурата врз трошоците и времето за подготовка на еден ваков алат добиен со SLA технологија би биле доста корисни.

6.1. Научен придонес

Врз основа на претходно изложените цели и работни хипотези, од анализираните резултати во експериментите во оваа дисертација може да се дефинира следниот научен придонес во областа.

Преку регресионите анализи се успеа да се најде математичка зависност помеѓу јакоста на истегнување на испитуваните материјали и нивната максимална деформација со влезните параметри во процесот. Ова е нешто што е корисно не само во дизајнот на стереолитографски гравури, туку може да се искористи и при изработка на какви било други делови со оваа технологија, за чија примена јакоста и дозволената деформација играат голема улога. Истражувањето тука е концентрирано само на два материјали од компанијата FormLabs со комерцијални имиња HighTemp и Rigid10k, меѓутоа, пристапот за добивање на математичките модели и зависности е применлив и за други материјали од истиот тип.

Со употребата на стереолитографските фотополимерни гравури во процес на инјекционо вбризгување на едноставни делови се потврди применливоста на овие материјали. Преку контрола на димензиите на изработените делови по повеќе работни циклуси се заклучи дека најголем дел ги исполнуваат потребните димензионални барања, што е задоволително во услови на мали, пилот-серии на производство.

За време на експериментот се увидоа и ограничувањата што ги имаат стереолитографските материјали за оваа примена. Слабата топлотна спроводливост води кон подолги циклуси, што ја ограничува примената само во услови на малосериско производство бидејќи во спротивно продуктивноста на процесот ќе биде многу мала. Тука мора да се спомене и големата тешкотија во автоматско работење поради потенцијалните проблеми при исфрлувањето на деловите доколку текстурата на површината на гравурата не е дополнително доработена. Материјалите може да ги издржат работните услови за процесирање на ABS пластика, меѓутоа, доколку се

користат за изработка на делови од полимерни материјали со повисоки точки на топење или полимерни композити со некакво полнило што се поабразивни, тогаш очекувано е дека животниот век на гравурите значително ќе опадне.

6.2. Препораки за понатамошни истражувања

Во рамките на овој докторски труд е направен сеопфатен сет на експерименти за истражување на применливоста на стереолитографски гравури само за одредени избрани геометриски форми. Се препорачува да се направат дополнителни експерименти на оваа проблематика за да се проверат и да се потврдат наодите на поширок спектар од пластични модели со геометрии со различна комплексност.

Дополнително експериментирање е потребно за да се утврди дали е можно да се добијат пофини толеранции и дали сложени геометрии како површини добиени од сплајнови или други сложени криви со полиноминални функции од повисок степен може да имаат слични толеранции како рамните површини.

Ова истражување, исто така, утврди дека се потребни дополнителни евалуации за целосно да се одреди применливоста на стереолитографските гравури. Најпрво, потребни се длабински анализи за да се проучи влијанието на ефектите од деградација и абеење на гравурите врз формата и димензиите на изработените делови. Вакви анализи би требало да се направат за секој одделен фотополимер применлив во процесот за инјекционо вбризување. Се препорачува истражувањето да започне со детална анализа на материјалот на гравурата и неговите соодветни ефекти врз процесот за инјекционо вбризување.

На пример,

- Проучување на ефектите што ги има фотополимерниот материјал врз топлотните дилатации и отклонот при оптоварување на гравурата.
- Подобрено разбирање за тоа како однесувањето на фотополимерниот материјал за време на процесот на инјекционо вбризување може да го зголеми животниот век на алатот.

Втората препорачана насока за истражување се однесува на ладењето на стереолитографските гравури. Сите досегашни истражувања, како и експериментите направени во рамките на овој докторски труд, покажуваат дека доколку се искористат дополнителни стратегии за ладење, можно е да се постигне зголемување на животниот век на алатот за барем 25%.

Овие стратегии вклучуваат:

- Употреба на конвенционални канали за ладење поврзани во сериски или паралелни кола;
- Употреба на конформални канали за ладење што може да се изработат со адитивно производство и ја следат формата на пластичниот дел;
- Употреба на канали за воздушно ладење низ кои ќе циркулира воздух под притисок. Нивниот облик исто така може да биде конвенционален или конформален;
- Додавање воздушни канали за вентилација кои ќе го олеснат исфрлањето на заробенит воздух во гравурата што во спротивно ќе се компресира и ќе ги зголеми притисокот и температурните напрегања во локацијата каде што се заробува.

Имплементацијата на вакви стратегии за ладење, исто така, може да ги намали или одложи ефектите од појава на прекумерен венец, кои се вообичаени по повеќе работни циклуси на стереолитографската гравура.

Трето, во текот на ова истражување е откриено дека е неопходно да се оптимизира достапниот простор за поставување на гравурите во куќиштето на алатот за инјекционо вбригување со цел да се намали трошокот за изработка на стереолитографските гравури, што во најголем дел зависи од количината на потрошениот материјал. Всушност, ова е еден од најголемите фактори што го ограничува опсегот на истражувањата и експериментите направени во овој докторски труд.

Се препорачува да се направи студија за да се одреди минималната потребна дебелина на сидот на гравурите изработени со SLA технологијата на адитивно

производство за да се добие димензионално стабилна компонента што ќе може да одговори на сите напрегања за време на процесот на инјекционо вбризгување. Резултатите од едно вакво истражување би можеле да се искористат за да се оптимизира и минимизира количината на фотополимер потребна за изработка на гравурите, што за возврат би ги намалило времето и трошоците за производство.

На крај, во ова истражување параметрите за процесот за инјекционо вбризгување што се користат за време на експериментите се многу блиски до параметрите што би се користеле при употреба на алуминиумски или челични гравури. Силно се препорачува во идните студии да се продолжи да се истражуваат разликите во параметрите од процесот за инјекционо вбризгување за обработка помеѓу стереолитографските и конвенционалните гравури.

Во истражувањата во рамките на оваа теза е утврдено дека особено внимание треба да се обрне на фазата за пакување во која се полнат последните 5 до 10 % од гравурата на алатот. Една од главните препораки за идните понатамошни истражувања за применливоста на полимерни гравури е детално да се разгледа влијанието на параметрите што ја дефинираат фазата на пакување врз животниот век на алатот и квалитетот на изработените пластични делови.

Во оваа фаза потребно е дополнително да се дејствува со притисок врз растопениот полимерен материјал поради неколку дополнителни причини. За време на пакувањето на заробените гасови во гравурата им се дава време за да се истиснат низ отворите за вентилација. Понатаму, пакувањето им помага на молекулите на полимерниот материјал да се распределат и да ја достигнат својата најголема густина, а со тоа изработените делови добиваат најголема јакост и стабилност. Фазата на пакување завршува кога доаѓа до замрзнување на вливната порта и затоа гравурата мора да биде брзо исполнета пред да дојде до прекумерно ладење на полимерниот материјал.

За време на пакувањето дополнително се дејствува со притисок што е 50 до 80 % од максималниот притисок на вбризгување. Доколку притисокот на пакување не е доволно голем, тогаш постои ризик од формирање шуплини и воздушни празнини во гравурата. Затоа, важно е да се одржи доволен притисок за пакување за да се избегнат овие проблеми.

Во случај кога се употребуваат стереолитографски гравури за инјекционо вбризгување чии механички карактеристики се пониски од оние кај металните алати, секогаш е препорачливо да се користат колку што е можно пониски работни притисоци и температури со цел да се зголеми животниот век на гравурите. За сметка на ова, може да се добијат делови кои нема да бидат целосно пакувани и ќе имаат пониски механички карактеристики. Од таа причина, во процесот на инјекционо вбризгување треба внимателно да се калибрираат работните притисоци во временски период дефиниран од конкретниот полимерен материјал што се процесира.

Со истражување на разликите помеѓу параметрите во процесот за инјекционо вбризгување помеѓу стереолитографските и конвенционалните гравури би се дошло до оптимални вредности со кои би се зголемил животниот век на алатот и би се овозможило производство на поголем број делови по гравура без притоа да се нарушат потребните механички карактеристики на произведените делови. Оптималните процесни параметри за конкретниот фотополимер кој се користи за изработка на гравурите ќе овозможат нивна примена во повеќе работни циклуси. Со ова би се намалила индивидуалната цена на пластичните делови, што дополнително ја зголемува применливоста на ваквиот тип алати добиени со методи за адитивно производство.

7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Gebhardt and J.-S. Hoetter, "Rapid Tooling," in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 1025–1035. doi: 10.1007/978-3-642-20617-7_16751.
- [2] Stratasys, "Will 3D Printing Eliminate Injection Molding?," 2017.
- [3] Stratasys, "Precision Prototyping - THE ROLE OF 3D PRINTED MOLDS IN THE INJECTION MOLDING INDUSTRY," 2017.
- [4] Stratasys, "Manufacturing the Future Globalization with 3D Printing," 2018.
- [5] Stratasys, "3D Printing Inroads in Injection Molding," 2016.
- [6] Stratasys, "Demonstration of an Effective Design Validation Tool for 3D Printed Injection Molds (3DPIM)," 2017.
- [7] Stratasys, "Medical Prototyping - CUSTOM INJECTION MOLDER EMBRACES 3D PRINTING," 2015.
- [8] S. Rahmati and P. Dickens, "Stereolithography for injection mould tooling," *Rapid Prototyp J*, vol. 3, no. 2, pp. 53–60, Jun. 1997, doi: 10.1108/13552549710176671.
- [9] P. K. Venuvinod and W. Ma, *Rapid Prototyping*. Boston, MA: Springer US, 2004. doi: 10.1007/978-1-4757-6361-4.
- [10] I. Ilyas, C. Taylor, K. Dalgarno, and J. Gosden, "Design and manufacture of injection mould tool inserts produced using indirect SLS and machining processes," *Rapid Prototyp J*, vol. 16, no. 6, pp. 429–440, Oct. 2010, doi: 10.1108/13552541011083353.
- [11] FormLabs, "FormLabs High Temp Resin Material Datasheet." 2018.
- [12] FormLabs, "Formlabs Rigid 10k Resin Material Datasheet." 2022.
- [13] "EN ISO 527-1 Plastics - General principles for determination of tensile properties."
- [14] "EN ISO 527-2 Plastics - Test conditions for moulding and extrusion plastics."
- [15] P. D. Hilton and P. F. (Paul F. Jacobs, *Rapid tooling : technologies and industrial applications*. Marcel Dekker, 2000.
- [16] C. Crouch, J. DeMenter, B. Guenther, and L. VanEeuwen, "Additive Manufactured Molds for Functional Prototyping," *Western Michigan University*, 2011.
- [17] T. Brinkmann, *Handbuch Produktentwicklung Mit Kunststoffen*, 1st ed. München: Hanser, 2011.
- [18] J. I. Segal and R. I. Campbell, "A review of research into the effects of rapid tooling on part properties," *Rapid Prototyp J*, vol. 7, no. 2, pp. 90–98, 2001, doi: 10.1108/13552540110386718.
- [19] N. Volpato, D. M. Solis, and C. A. Costa, "An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 52, no. 1/2, p. 3, 2016, doi: 10.1504/IJMPT.2016.073616.

- [20] P. M. Dickens, "Research Developments in Rapid Prototyping," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 209, no. 4, pp. 261–266, Aug. 1995, doi: 10.1243/PIME_PROC_1995_209_082_02.
- [21] R. Harris, N. Hopkinson, H. Newlyn, R. Hague, and P. Dickens, "Layer thickness and draft angle selection for stereolithography injection mould tooling," *Int J Prod Res*, vol. 40, no. 3, pp. 719–729, Jan. 2002, doi: 10.1080/00207540110091875.
- [22] R. A. Harris, H. A. Newlyn, and P. M. Dickens, "Selection of mould design variables in direct stereolithography injection mould tooling," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 216, no. 4, pp. 499–505, Apr. 2002, doi: 10.1243/0954405021520193.
- [23] R. A. Harris, H. A. Newlyn, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, "Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, no. 9, pp. 879–887, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00080-4.
- [24] K. A. Do, P. K. Wright, and C. H. Sequin, "Latest-Generation SLA Resins Enable Direct Tooling for Injection Molding," *SME's Plastics, Composites & Coatings Community*, vol. 5, no. 3, 2006, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/246657372>
- [25] G. T. Pham and J. S. Colton, "Ejection force modeling for stereolithography injection molding tools," *Polym Eng Sci*, vol. 42, no. 4, pp. 681–693, Apr. 2002, doi: 10.1002/pen.10981.
- [26] N. Hopkinson and P. Dickens, "Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength," *Int J Prod Res*, vol. 38, no. 16, pp. 3747–3757, Nov. 2000, doi: 10.1080/00207540050175987.
- [27] A. Bagalkot, D. Pons, D. Symons, and D. Clucas, "Categorization of Failures in Polymer Rapid Tools Used for Injection Molding," *Processes*, vol. 7, no. 1, p. 17, Jan. 2019, doi: 10.3390/pr7010017.
- [28] A. E. Palmer and J. S. Colton, "Failure mechanisms in stereolithography injection molding tooling," *Polym Eng Sci*, vol. 40, no. 6, pp. 1395–1404, Jun. 2000, doi: 10.1002/pen.11269.
- [29] N. Hopkinson and P. M. Dickens, "A comparison between stereolithography and aluminium injection moulding tooling," *Rapid Prototyp J*, vol. 6, no. 4, pp. 253–258, Jan. 2000.
- [30] G. Pötsch and W. Michaeli, *Injection molding: An Introduction*. Hanser, 2008.
- [31] M. R. (Musa R. Kamal, A. I. Isayev, and S.-J. Liu, *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Hanser, 2009.
- [32] P. Gipson, P. F. Grelle, and B. Salamon, "The effects of process conditions, nominal wall thickness, and flow length on the shrinkage characteristics of injection molded polypropylene," *The Journal of injection molding technology*, vol. 3, pp. 117–125, 1999.
- [33] W. Michaeli and H. Keller, "Simulation of solidification and the resulting mechanical properties of polypropylene," *Comput Mater Sci*, vol. 7, no. 1–2, pp. 253–256, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0927-0256(96)00089-4.

- [34] M. A. McLeod and D. G. Baird, "The influence of processing variables on the mechanical properties of injection molded pregenerated microcomposites," *Compos B Eng*, vol. 30, no. 3, pp. 297–308, Apr. 1999, doi: 10.1016/S1359-8368(98)00061-4.
- [35] Georg Menges, Edmund Haberstroh, Walter Michaeli, and Ernst Schmachtenberg, *Plastics Materials Science*. Hanser Verlag, 2002.
- [36] Charles E. Carraher Jr., *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry*, 6th ed. CRC Press, 2003.
- [37] W. Michaeli and F. Lindner, "Influence of Mould Materials on the Morphological and Mechanical Properties of Injection-Moulded Prototypes," 2001.
- [38] R. A. Harris, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, "Crystallinity control in parts produced from stereolithography injection mould tooling," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 217, no. 4, pp. 269–276, Oct. 2003, doi: 10.1177/146442070321700402.
- [39] R. A. Harris, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, "The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 44, no. 1, pp. 59–64, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.007.
- [40] R. A. Harris, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, "Thermal conditions in stereolithography injection mould tooling and their use for polyether-ether-ketone moulding," *Int J Prod Res*, vol. 42, no. 1, pp. 119–129, Jan. 2004, doi: 10.1080/0020754032000123623.
- [41] A. S. Pouzada, "Hybrid moulds: A case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 4, no. 4, pp. 195–202, Dec. 2009, doi: 10.1080/17452750903438676.
- [42] P. Gonçalves Martinho, P. Jorge Bártolo, and A. Sérgio Pouzada, "Hybrid moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties," *Rapid Prototyp J*, vol. 15, no. 1, pp. 71–82, Jan. 2009, doi: 10.1108/13552540910925081.
- [43] A. D. C. Fernandes, A. F. De Souza, and J. L. L. Howarth, "Mechanical and dimensional characterisation of polypropylene injection moulded parts in epoxy resin/aluminium inserts for rapid tooling," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 52, no. 1/2, p. 37, 2016, doi: 10.1504/IJMPT.2016.073618.
- [44] T. Tábi, N. K. Kovács, I. E. Sajó, T. Czigány, S. Hajba, and J. G. Kovács, "Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epoxy-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold," *J Therm Anal Calorim*, vol. 123, no. 1, pp. 349–361, Jan. 2016, doi: 10.1007/s10973-015-4997-y.
- [45] A. Gebhardt, "Rapid tooling," *Kunststoffe Plastics Europe*, vol. 88, no. 11, pp. 1992–2000, 1998.
- [46] E. Radstok, "Rapid tooling," *Rapid Prototyp J*, vol. 5, no. 4, pp. 164–168, 1999.
- [47] N. P. Karapatis, J.-P. S. van Griethuysen, and R. Glardon, "Injection molds behavior and lifetime characterization," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Tx, Jul. 1997, pp. 317–323.

- [48] P. Stierlen, K. H. Dusel, and P. Eyerer, "Materials for rapid tooling techniques," in *Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, Jul. 1997, pp. 267–274.
- [49] S. Willis, "Rapid tooling for injection moulds: composite tooling/machine tooling comparison," in *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing*, Dearborn, MI, 1997.
- [50] S. Rahmati and P. Dickens, "Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 47, no. 5, pp. 740–747, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.022.
- [51] E. K. Dawson and J. D. Muzzy, "The effect of rapid tooling on mechanical polystyrene properties," in *Proceedings of the Time Compression Technologies Conference*, Nottingham, Oct. 1999, pp. 205–207.
- [52] K. H. Dusel, J. Eschl, P. Eyerer, and T. LuÈ ck, "Rapid tooling ± simulation and applications of the injection moulding process," in *Proceedings of the 7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Aachen, Jul. 1998.
- [53] Isaac, "STL files," <https://www.hwlibre.com/en/stl/>.
- [54] J. P. Kruth, "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," *CIRP Annals*, vol. 40, no. 2, pp. 603–614, 1991, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61136-6.
- [55] P. J. Bartolo and G. Mitchell, "Stereo-thermal-lithography: a new principle for rapid prototyping," *Rapid Prototyp J*, vol. 9, no. 3, pp. 150–156, Aug. 2003, doi: 10.1108/13552540310477454.
- [56] Charles W. Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography," 1986
- [57] FormLabs, "Precise and Versatile 3D Printing for Professionals Across Industries," <https://formlabs.com/industries/>.
- [58] "Stereolithography," <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [59] P. F. Jacobs, *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*, First Edition. SME, 1992.
- [60] FormLabs, "Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing," <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>.
- [61] K. Salonitis, "Stereolithography," in *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, 2014, pp. 19–67. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3.
- [62] FormLabs, "The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing," Mar. 2017.
- [63] Z. Zguris, "How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing," 2016.
- [64] J. Shah, B. Snider, T. Clarke, S. Kozutsky, M. Lacki, and A. Hosseini, "Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 9–12, pp. 3679–3693, Oct. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04074-6.

- [65] FormLabs, "How supports work in SLA printing," https://support.formlabs.com/s/article/How-supports-work-in-SLA-printing?language=en_US.
- [66] Aulus Roberto Romão Bineli, Ana Paula Gimenez Peres, André Luiz Jardini, and Rubens Maciel Filho, "Direct Metal Laser Sintering (DMLs): Technology for Design and Construction of Microreactors," in *6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering*, 2011.
- [67] K. Zeng, N. Patil, H. Gu, H. Gong, and D. Pal, "Layer by Layer Validation of Geometrical Accuracy in Additive Manufacturing Processes," in *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2013, pp. 76–87.
- [68] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
- [69] P. Schaeffer, A. Bertsch, S. Corbel, J. Y. Jézéquel, and J. C. André, "Industrial photochemistry XXIV. Relations between light flux and polymerized depth in laser stereolithography," *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 107, no. 1–3, pp. 283–290, Jul. 1997, doi: 10.1016/S1010-6030(97)00062-2.
- [70] T. Mueller, "Truly Functional Testing; Selecting Rapid Prototyping Materials so that Prototypes Predict the Performance of Injection Molded Plastic Parts," *Proceedings of the Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Society of Manufacturing Engineers*, 2004.
- [71] T. Mueller, "Truly Functional Testing; Selecting Rapid Prototyping Materials so that Prototypes Predict the Performance of Injection Molded Plastic Parts," *Proceedings of the Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Society of Manufacturing Engineers*, 2004.
- [72] "3D Systems," <https://www.3dsystems.com/>.
- [73] 3D Systems, "Accura® Materials Selection Guide for Stereolithography – SLA," 2021. [Online]. Available: www.3dsystems.com
- [74] "RenShape SL® V1 Stereolithography Material For use on Solid State Laser SLA® Data Sheet," 2010. [Online]. Available: www.huntsman.com/advanced_materials
- [75] "RenShape SL® 7820 Data Sheet," 2006. [Online]. Available: www.huntsman.com/advanced_materials
- [76] "RenShape SL® 7545 Data Sheet."
- [77] "RenShape SL® 7870 Data Sheet," 2007. [Online]. Available: www.huntsman.com/advanced_materials
- [78] 3D Systems, "Accura® 25 Material Data Sheet," 2020.
- [79] 3D Systems, "Accura® 55 Material Data Sheet," 2020.
- [80] 3D Systems, "Accura® 60 Material Data Sheet," 2020.
- [81] 3D Systems, "Accura® ClearVue Data Sheet," 2020. [Online]. Available: www.3dsystems.com

- [82] 3D Systems, “Accura® CastPro Material Data Sheet,” 2020.
- [83] 3D Systems, “Accura® Sapphire Material Data Sheet,” 2020.
- [84] 3D Systems, “Accura® Amethyst Material Data Sheet,” 2003. [Online]. Available: www.3dsystems.com
- [85] DSM Somos, “DSM Somos® Material Selection Guide.” DSM Somos, 2016.
- [86] “Stratasys - Industrial 3D Printing Manufacturers,” <https://www.stratasys.com/en/>.
- [87] DSM Somos, “DSM Somos NanoTool™ Material Datasheet.” 2012. [Online]. Available: www.dsmsomos.com
- [88] DSM Somos, “DSM Somos NanoForm™ 15120 Material Datasheet.” 2012.
- [89] 3D Systems, “3D Systems Accura Bluestone Material Datasheet.” 2020.
- [90] FormLabs, “FormLabs Materials Datasheet Library,” 2022.
- [91] Stratasys, “Digital Materials Data Sheet.” 2017.
- [92] Stratasys, “PolyJet Materials Data Sheet.” 2016.
- [93] Stratasys, “PolyJet 3D Printers Systems and Materials.” 2018.
- [94] Stratasys, “PolyJet 3D Printers.” 2017.
- [95] Stratasys, “PolyJet™ Materials Reference Guide .” Aug. 06, 2020.
- [96] Stratasys, “Tango™ Material Data Sheet,” 2017. [Online]. Available: www.tritech3d.co.uk
- [97] Stratasys, “Vero™ for Stratasys J55 Material Data Sheet,” 2020.
- [98] Stratasys, “Digital ABS Plus™ Material Data Sheet,” 2021.
- [99] FormLabs, “Flexible and Elastic Resins,” <https://formlabs.com/materials/flexible-elastic/>.
- [100] Q. Ji *et al.*, “A Modular Microfluidic Device via Multimaterial 3D Printing for Emulsion Generation,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 4791, Mar. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-22756-1.
- [101] K. C. Bhargava, B. Thompson, and N. Malmstadt, “Discrete elements for 3D microfluidics,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 42, pp. 15013–15018, Oct. 2014, doi: 10.1073/pnas.1414764111.
- [102] PR. Selvakannan, M. Mazur, and X. Sun, “Material Extrusion and Vat Photopolymerization—Principles, Opportunities and Challenges,” in *Additive Manufacturing for Chemical Sciences and Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 53–76. doi: 10.1007/978-981-19-2293-0_3.
- [103] S. Jayanthi, B. Bokuf, R. Mcconnell, R. J. Speer, and P. S. Fussell, “Stereolithographic Injection Molds for Direct Tooling,” in *Solid Freeform Fabrication SYMPOSIUM*, Austin, Texas, 1997.
- [104] Reports and Data, “Injection Molding Machine Market Size, Share, Trends, By Material (Plastic, Metal), By Technology (Hydraulic, Electric, Hybrid), By Application (Automotive,

- Consumer Goods, Packaging, Electronics, Others), and By Region Forecast to 2030,” Jun. 2022.
- [105] Grand View Research, “Injection Molding Machine Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Plastic, Metal), By Technology (Hydraulic, Electric, Hybrid), By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030,” 2022.
- [106] Terry Wohlers, “Wohlers Report 2006 Rapid prototyping and Manufacturing State of the Industry,” 2006.
- [107] The Technology House, “What’s the Difference Between Soft and Hard Tooling?,” <https://www.tth.com/blog/whats-the-difference-between-soft-and-hard-tooling>.
- [108] Scott AM Technologies, “Vacuum Casting,” <https://www.scott-am.com/products/vacuum-casting/>.
- [109] G. N. Levy, R. Schindel, and J. P. Kruth, “Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives,” *CIRP Annals*, vol. 52, no. 2, pp. 589–609, 2003, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60206-6.
- [110] S. Rahmati, “Direct Rapid Tooling,” in *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, 2014, pp. 303–344. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01013-X.
- [111] N. Zaimovic-Uzunovic and S. Lemes, “Applications of Rapid Tooling Techniques for Injection Moulding,” in *Proceedings of the International Conference of MECHANIKA, Kaunas, Lithuania*, pp. 21–24.
- [112] A. D. Venus and S. J. van de Crommert, “Direct SLS Nylon Injection Tooling,” in *2nd National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research*, Buckinghamshire College: UK, 1996.
- [113] EOS, “3D Printing Solutions for Tooling and Mold-Making,” <https://www.eos.info/en/innovations/all-3d-printing-applications/production-and-industry/tooling-diecast-molding>.
- [114] Винета Сребренкоска and Димко Димески, *Дизајн и анализа на експерименти*. Штип, 2014.
- [115] V. TRAJKOVSKI, “HOW TO SELECT APPROPRIATE STATISTICAL TEST IN SCIENTIFIC ARTICLES,” *Journal of Special Education and Rehabilitation*, vol. 3–4, no. 17, pp. 5–5, Jan. 2016, doi: 10.19057/jser.2016.7.
- [116] Dassault Systemes, “Solidworks (Version 2019) [CAD Software].” 2019.
- [117] Dassault Systemes, “Solidworks Plastics (Version 2019) [Simulation Software].” Dassault Systemes, 2019.
- [118] “Minitab (Version 19.1.1) [Data Analysis Software].” 2019.
- [119] Microsoft, “Excel (Version 2016) [Spreadsheet software].” 2016.
- [120] FormLabs, “PreForm (Version 3.28.1) [SLA Slicing Software].” 2023.
- [121] The Imaging Source, “IC Measure (Version 2.0.0.286) [Image Acquisition and Measurement Software].” 2022.
- [122] Shimadzu, “TrapeziumX (Version 1.1.5) [Universal Testing Software].” 2009.

- [123] FormLabs, “Form 3 Tech Specs.”
- [124] FormLabs, “Rigid resin family,” <https://formlabs.com/materials/rigid/>.
- [125] Formlabs, “Form Cure time and temperature settings,” <https://support.formlabs.com/s/article/Form-Cure-Time-and-Temperature-Settings>.
- [126] Formlabs, “Form Wash/Form Wash L time settings,” <https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-Time-Settings>.
- [127] I. Gibson, G. Goenka, R. Narasimhan, and N. Bhat, “Design Rules for Additive Manufacture,” in *2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, Aug. 2010, pp. 705–716.
- [128] Meusburger, “Mould Making catalog,” <https://ecom.meusburger.com/e/index.asp?id=129&rnd=28827>.
- [129] Meusburger, “Change Mould,” <https://www.meusburger.com/EN/IN/injection-moulding/fw-change-mould>.
- [130] Bayer Material Science, “Part and Mold Design Engineering,” 2000. [Online]. Available: www.bayer.com/polymers-usa:
- [131] D. v. Rosato, D. v. Rosato, and M. G. Rosato, Eds., *Injection Molding Handbook*. Boston, MA: Springer US, 2000. doi: 10.1007/978-1-4615-4597-2.
- [132] FormLabs, “Rigid 10k Resin Safety Data Sheet,” 2020.
- [133] FormLabs, “High Temp V2 Resin Safety Data Sheet,” 2020. [Online]. Available: www.GSMSDS.com
- [134] “Tecves Materials Selection Guide,” <http://materials.tecves.com/en/262/abs-50>.
- [135] 3D Systems, “Accura® 25 Material Safety Data Sheet,” 2015.
- [136] 3D Systems, “Accura® 55 Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [137] 3D Systems, “Accura® 60 Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [138] 3D Systems, “Accura® ClearVue Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [139] 3D Systems, “Accura® CastPro Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [140] 3D Systems, “Accura® Amethyst Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [141] 3D Systems, “Accura® Sapphire Material Safety Data Sheet,” 2014.
- [142] 3D Systems, “Accura® Bluestone Material Safety Data Sheet,” 2023.
- [143] DSM Somos, “Somos® NanoTool Material Safety Data Sheet,” 2006.
- [144] DSM Somos, “Somos® NanoForm Material Safety Data Sheet,” 2018.
- [145] Stratasys, “Stratasys® TANGOBLACK FLX973 Material Safety Data Sheet,” 2013. [Online]. Available: www.stratasys.com
- [146] Stratasys, “Stratasys® VeroWhitePlus, RGD835 Material Safety Data Sheet,” 2019.
- [147] Stratasys, “Stratasys® DIGITAL ABS RGD531 Material Safety Data Sheet,” 2016.

8. ПРИЛОЗИ

8.1. Прилог А: Технички спецификации на разгледуваните материјали

Табела 8.1: Состав на фотополимерот Rigid 10k на Formlabs (Извор: [132])

Комерцијално име: Rigid 10k			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 72869-86-4 EC number: 276-957-5	Urethane Dimethacrylate	Skin Sens. 1; H317 Aquatic Chronic 2; H411	15-25
CAS number: 7534-94-3 EC number: 231-403-1	Isobornyl Methacrylate	Skin Irrit. 2; H315 STOT SE 3 (RI); H335	7-10
CAS number: 7631-86-9 EC number: 231	Filler	Aquatic Chronic 3; H412 Eye Irrit. 2; H319	55-75

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.2: Состав на фотополимерот High Temp на Formlabs (Извор: [133])

Комерцијално име: High Temp			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 40220-08-4 EC number: 254-843-6	(2,4,6-tri oxo-1,3,5-triazine-1,3,5(2H,4H,6H)-triy)tri-2,1-ethanediyl triacrylate	Eye Dam. 1; H318	5-25
CAS number: Trade Secret EC number: Trade Secret	Acrylate Monomer(s)	Skin Irrit. 2; H315 Eye Irrit. 2; H319 STOT SE 3 (RI); H335	40-60
CAS number: 72869-86-4 EC number: 276-957-5	Urethane Dimethacrylate	Aquatic Chronic 2; H411	25-45

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.3: Карактеристики на фотополимерот Rigid 10k на Formlabs (Извор: [12, 90])

	Нетретиран („Зелен“)	УВ стврднување	УВ стврднување + термичко третирање	УВ стврднување + пескарење	Метод на тестирање
Механички карактеристики					
Максимална јачина на истегнување	55 МПа	65 МПа	53 МПа	88 МПа	ASTM D638-14
Модул на еластичност	7,5 GPa	10 GPa	10 GPa	11 GPa	ASTM D638-14
Издолжување при лом	2%	1%	1%	1,7%	ASTM D638-14
Јакост на свиткување	84 МПа	126 МПа	103 МПа	158 МПа	ASTM D790-15
Модул на свиткување	6 GPa	9 GPa	10 GPa	9,9 GPa	ASTM D790-15
Жилавост по Izod со жлеб	16 J/m	16 J/m	18 J/m	20 J/m	ASTM D256-10
Жилавост по Izod без жлеб	41 J/m	47 J/m	41 J/m	130 J/m	ASTM D4812-11
Термички карактеристики					
Температура на извиткување под оптеретување на 0,45 МПа	65 °C	163 °C	218 °C	238 °C	ASTM D638-16
Температура на извиткување под оптеретување на 1,8 МПа	56 °C	82 °C	110 °C	92 °C	ASTM D638-16
Термичко ширење 0-150 °C	48 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	47 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	46 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	41 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	ASTM E831-13

Табела 8.4: Карактеристики на фотополимерот HighTemp на Formlabs (Извор: [11, 90])

	Нетретиран („Зелен“)	УВ стврднување	УВ стврднување + термичко третирање	Метод на тестирање
Механички карактеристики				
Максимална јачина на истегнување	20,9 МПа	58,3 МПа	51,1 МПа	ASTM D638-14
Модул на еластичност	0,75 GPa	2,75 GPa	2,9 GPa	ASTM D638-14
Издолжување при лом	14%	3,3%	2,4%	ASTM D638-14
Јакост на свиткување	24,1 МПа	94,5 МПа	93,8 МПа	ASTM D790-15
Модул на свиткување	0,69 GPa	2,62 GPa	2,62 GPa	ASTM D790-15
Жилавост по Izod со жлеб	32,8 J/m	18,2 J/m	24,2 J/m	ASTM D256-10
Термички карактеристики				
Температура на извиткување под оптеретување на 0,45 МПа	43,6 °C	99,2 °C	101 °C	ASTM D638-16
Температура на извиткување под оптеретување на 1,8 МПа	49,3 °C	142 °C	238 °C	ASTM D638-16
Термичко ширење 0-150 °C	118,1 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	79,6 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	74 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$	ASTM E831-13

Табела 8.5: Карактеристики на материјалот ABS-50 користен за инјекционо вбригување
(Извор: [134])

Општи карактеристики				
Име на производ	ABS-50			
Производител	Ghaed Basir Petrochemical			
Категоризација	Полимер, термопластика, Acrylonitrile Butadiene Styrene			
Примена	Бела техника, канцелариска опрема, автомобилски делови, електроника			
Карактеристики	Добро течење, добра крутост и отпорност на удар			
Физички карактеристики				
	Вредност	Единица	Услови на тестирање	Метод на тестирање
MFI (melt flow index)	35	g/10min	на оптоварување од 10 kg, 220 °C	ASTM D1238
Термичко собирање	0,4 - 0,7	%		ASTM D955
Specific Gravity	1,04		на +23 °C	ASTM D792
Механички карактеристики				
	Вредност	Единица	Услови на тестирање	Метод на тестирање
Модул на свиткување	2157	MPa	на 23 °C, 2.8 mm/min	ASTM D790
Јакост на свиткување	63,7	MPa	на 23 °C, 2.8 mm/min	ASTM D790
Тврдина, Rockwell R	95 - 115			ASTM D785
Жилавост (Izod Impact, Notched)	23	kJ/m ²	6.4 mm	ASTM D256
Издолжување при лом	20	%	на 23 °C, 50 mm/min	ASTM D638
Јакост на издолжување при лом	44,6	MPa	на 23 °C, 50 mm/min	ASTM D638
Термички карактеристики				
	Вредност	Единица	Услови на тестирање	Метод на тестирање
Температура на извиткување под оптеретување (HDT)	85	°C	на 1.82 MPa	ASTM D648
Vicat температура на омекнување	95	°C	5kg/50°C	ASTM D1525

Табела 8.6: Состав на фотополимерот Accura 25 на 3D Systems (Извор: [135])

Комерцијално име: Accura 25			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 2386-87-0 EC number: 219-207-4	3,4- Епохусцлoхeхylmethyl 3',4'- епохусцлoхeхane carboxylate	Eye Irrit. 2, H319; Skin Irrit.2,H 315; Skin Sens.1,H 317; Aqu. Chron. 3, H 412	30-50
CAS number: 16096-31-4 EC number: 240-260-4	1,6-bis(2,3- епохyпроxy)hexane	Eye Irrit. 2, H319; Skin Irrit.2,H 315; Skin Sens.1,H 317; Aqu. Chron. 3,H 412;	15-30
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	2-4

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.7: Состав на фотополимерот Accura 55 на 3D Systems (Извор: [136])

Комерцијално име: Accura 55			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 2386-87-0 EC number: 219-207-4	3,4- Епохусцлoхeхylmethyl 3',4'- епохусцлoхeхane carboxylate	Eye Irrit. 2, H319; Skin Irrit.2,H 315; Skin Sens.1,H 317; Aqu. Chron. 3, H 412	35-35
CAS number: 144086-02-2 EC number: 604-394-0	Ethoxylated pentaerythritol tetraacrylate	Eye Irrit. 2, H319 Aqu. Chron. 2, H 411	15-25
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	2-7

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.8: Состав на фотополимерот Accura 60 на 3D Systems (Извор: [137])

Комерцијално име: Accura 60			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 2386-87-0 EC number: 219-207-4	3,4-Епохусилохексилметил 3',4'-епохусилохексан карбоксилат	Eye Irrit. 2, H319; Skin Irrit.2, H 315; Skin Sens.1, H 317; Aqu. Chron. 3, H 412	40-60
CAS number: 144086-02-2 EC number: 604-394-0	Ethoxylated pentaerythritol tetraacrylate	Eye Irrit. 2, H319 Aqu. Chron. 2, H 411	12-22
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	2-7

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.9: Состав на фотополимерот Accura ClearVue на 3D Systems (Извор: [138])

Комерцијално име: Accura ClearVue			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 30583-72-3 EC number: 500-070-7	4,4'.Isopropylidenedicyclohexano l, oligomeric reaction products with 1-chloro-2,3-epoxypropane	Skin Sens 1, H317, Aqu. Chron. 3, H 412	40-65
CAS number: 3047-32-3 EC number: 221-254-0	3-ethyl-3-hydroxymethyl-oxetane	Eye Irrit. 2, H319	10-20
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	1-10

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.10: Состав на фотополимерот Accura CastPro на 3D Systems (Извор: [139])

Комерцијално име: Accura CastPro			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 30583-72-3 EC number: 500-070-7	4,4'.Isopropylidenedicyclohexanol, oligomeric reaction products with 1-chloro-2,3-epoxypropane	Skin Sens 1, H317, Aqu. Chron. 3, H 412	40-65
CAS number: 3047-32-3 EC number: 221-254-0	3-ethyl-3-hydroxymethyl-oxetane	Eye Irrit. 2, H319	10-20
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	1-10

*(ЕС) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.11: Состав на фотополимерот Accura Amethyst на 3D Systems (Извор: [140])

Комерцијално име: Accura Amethyst			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 2386-87-0 EC number: 219-207-4	3,4- Епохусцyclohexylmethyl 3',4'- епохусцyclohexane carboxylate	Eye Irrit. 2, H319 Skin Irrit.2,H 315 Skin Sens.1,H 317 Aqu. Chron. 3, H 412	50-70
CAS number: 3454-29-3 EC number: 222-384-0	1-(2,3-Епохупропоxy)-2,2-bis[(2,3- епохупропоxy)methyl]butane	Eye Irrit. 2, H319 Skin Irrit.2,H 315 Skin Sens.1,H 317 Aqu. Chron. 3, H 412	5-10
CAS number: 108-32-7, 71449-78-0, 89452-37-9 EC number: 203-572-1, 403-500-0	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% Propylene Carbonate 50% Mixed triarylsulfonium salts	Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens 1, H317; Aqu. Acute 1, H400; Aqu. Chron.1, H410;	1-10

*(ЕС) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.12: Состав на фотополимерот Accura Sapphire на 3D Systems (Извор: [141])

Комерцијално име: Accura Sapphire			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 30583-72-3 EC number: 500-070-7	4,4'.Isopropylidenedicyclohexanol , oligomeric reaction products with 1-chloro-2,3-epoxypropane	Skin Sens 1, H317, Aqu. Chron. 3, H 412	35-55
CAS number: 3047-32-3 EC number: 221-254-0	3-ethyl-3-hydroxymethyl-oxetane	Eye Irrit. 2, H319	15-25
CAS number: 109037-77-6 EC number: 403-490-8	Mixture containing triarylsulfonium salt: 50% propylene carbonate, 50% mixed triarylsulfonium hexafluorophosphate salts	Eye Irrit. 2, H319 Skin Sens 1, H317 Aqu. Acute 1, H400 Aqu. Chron.1, H410	2-6

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.13: Состав на фотополимерот Accura Bluestone на 3D Systems (Извор: [142])

Комерцијално име: Accura Bluestone			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: 2386-87-0 EC number: 219-207-4	3,4 Ерохусциклохексилметил 3,4 Ерохусциклохексан карбоксилат	Skin Sens. 1 (H317)	30-40
CAS number: - EC number: -	Nonhazardous Components	Eye Irrit. 2, H319	40-50
CAS number: 89452-37-9 EC number: 931-161-3	Sulfanediyl(dibenzene-4,1-diyl)bis(diphenylsulfonium) bis(hexafluoroantimonate)	Acute Tox. 4 (H302) Aquatic Chronic 2 (H411)	0,92
CAS number: 108-32-7 EC number: 203-572-1	Propylene Carbonate	Eye Irrit. 2 (H319)	1-10
CAS number: 13463-67-7 (PROPRIETARY) EC number: -	Titanium Dioxide as liquid	No data available	0,00216

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.14: Состав на фотополимерот NanoTool на DSM Somos (Извор: [143])

Комерцијално име: NanoTool		
Хемиско име	CAS (Chemical Abstracts Service) број	Масен удел [%]
Епоxy(s)		10-40
Acrylate(s)		1-20
Photoinitiator(s)		1-10
Inorganic Filler(s)		20-70
Additive(s)		0.01-10
Amorphous Silica	7631-86-9	48,
Amorphous Nanosilica	7631-86-9	14,
Antimony Compounds	7440-36-0	<1.9
Methyl ether of hydroquinone (MEHQ)	150-76-5	0,02
Epoxy Residual		0,00008

Табела 8.15: Состав на фотополимерот NanoForm на DSM Somos (Извор: [144])

Комерцијално име: NanoForm		
Хемиско име	CAS (Chemical Abstracts Service) број	Масен удел [%]
Епоxy	-	10-25
Епоxy	-	5-10
Multifunctional Acrylate	-	1-5
Additive	-	1-5
Multifunctional Acrylate	-	1-5
antimony compounds	-	0,1-1
antimony compounds	-	0,1-1
Multifunctional Acrylate	-	0,1-1

Табела 8.16: Состав на фотополимерот TangoBlack на Stratasys (Извор: [145])

Комерцијално име: ОБЈЕТ TANGOBLOCK			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) No. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: - EC number: -	Acrylic oligomer	Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2	<30
CAS number: 5888-33-5 EC number: 227-561-6	2-Propenoic acid, 1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]hept-2-yl ester, exo-	Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3 Aquatic Chronic 2	<25
CAS number: - EC number: -	Photo initiator	Repr. 2	<2
CAS number: 108-32-7 EC number: 203-572-1	Xylenes (o-, m-, p- isomers)	Flam. Liq. 3 Acute Tox. 4 (Dermal) Acute Inh. Tox. 4 Skin Irrit. 2 Note(s): C	0,1-1
CAS number: 100-51-6 EC number: 202-859-9	Benzyl alcohol	Acute Tox. 4 (Oral) Acute Inh. Tox. 4	<0,5
CAS number: 52408-84-1 EC number: 500-114-5	Acrylic acid ester	Eye Irrit. 2 Skin Sens. 1	<0,3
CAS number: 123-86-4 EC number: 204-658-1	n-Butyl acetate	Flam. Liq. 3 STOT SE 3 EU Repeat Skin EU	<0,1
CAS number: 106-24-1 EC number: 203-377-1	Geraniol	Skin Irrit. 2 Eye Dam. 1 Skin Sens. 1	<0,01
CAS number: 123-92-2 EC number: 204-662-3	Isoamyl acetate	Flam. Liq. 3 EU Repeat Skin EU Note(s): C	<0,01
CAS number: 128-37-0 EC number: 204-881-4	2,6-Di-tert-butyl-p-cresol	Aquatic Chronic 1	<0,01
CAS number: 138-86-3 EC number: 205-341-0	Dipentene	Flam. Liq. 3 Skin Irrit. 2 Skin Sens. 1 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1 Note(s): C	<0,1
CAS number: 100-41-4 EC number: 202-849-4	Ethylbenzene	Flam. Liq. 2 Acute Inh. Tox. 4	<0,1
CAS number: 5392-40-5 EC number: 226-394-6	Citral	Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 Skin Sens. 1	<0,01
CAS number: 1333-86-4 EC number: 215-609-9	Carbon black		<0,1
CAS number: 108-65-6 EC number: 203-603-9	Propylene glycol monomethyl ether acetate	Flam. Liq. 3	<0,1

*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.17: Состав на фотополимерот VeroWhitePlus на Stratasys (Извор: [146])

Комерцијално име: VeroWhitePlus			
	Хемиско име	Класификација според регулатива (ЕС*) Но. 1272/2008 (CLP**)	Масен удел [%]
CAS number: - EC number: Listed	Proprietary	Skin Irrit. 2 (H315) Eye Irrit. 2 (H319) Skin Sens. 1B (H317) STOT SE 3 (H335) Aquatic Acute 1 (H400) Aquatic Chronic 1 (H410)	10-30
CAS number: - EC number: Listed	Proprietary	Acute Tox. 4 (H302) Eye Dam. 1 (H318) Skin Sens. 1 (H317) STOT RE 2 (H373)	10-30
CAS number: - EC number: Listed	Proprietary	Skin Sens. 1B (H317)	10-30
CAS number: - EC number: Not Listed	Proprietary	Skin Sens. 1 (H317)	10-30
CAS number: - EC number: Listed	Proprietary	Skin Sens. 1B (H317) Aquatic Chronic 2 (H411)	10-30
CAS number: - EC number: Listed	Proprietary	Repr. 2 (H361f) Skin Sens. 1 (H317) Aquatic Chronic 2 (H411)	1-3
CAS number: 13463-67-7 EC number: 236-675-5	Titanium dioxide	Not classified	0,3-1
CAS number: 79-92-5 EC number: 201-234-8	camphene	Flam. Sol. 2 (H228) Eye Irrit. 2 (H319) Aquatic Acute 1 (H400) Aquatic Chronic 1 (H410)	0,1-0,3
CAS number: 28961-43-5 EC number: -	Ethoxylated Trimethylolpropane Triacrylate	Skin Sens. 1B (H317) Eye Irrit. 2 (H319)	0,1 - 0,3
CAS number: 79-10-7 EC number: 201-177-9	Acrylic acid	Flam. Liq. 3 (H226) Acute Tox. 4 (H302) Acute Tox. 4 (H312) Acute Tox. 4 (H332) Skin Corr. 1A (H314) Eye Dam. 1 (H318) STOT SE 3 (H335) Aquatic Acute 1 (H400) Aquatic Chronic 2 (H411)	0,1 - 0,3
CAS number: 52408-84-1 EC number: 500-114-5	Glycerol, propoxylated, esters with acrylic acid	Skin Sens. 1 (H317) Eye Irrit. 2 (H319)	0,1 - 0,3
CAS number: - EC number: -	1,7,7- Trimethyltricyclo [2.2.1.02,6]heptane	Eye Irrit. 2 (H319) Aquatic Acute 1 (H400) Aquatic Chronic 1 (H410)	0,1 - 0,3
CAS number: 21645-51-2 EC number: -	Aluminium Hydroxide	Not classified	<0,1
CAS number: 150-76-5 EC number: 205-769-8	4-Methoxyphenol	Acute Tox. 4 (H302) Eye Irrit. 2 (H319) Skin Sens. 1 (H317) Repr. 2 (H361d) Aquatic Chronic 3 (H412)	<0,1
CAS number: 108-65-6 EC number: 203-603-9	2-methoxy-1-methylethyl acetate	Flam. Liq. 3 (H226) STOT SE 3 (H336)	<0,1
CAS number: 122-60-1 EC number: 204-557-2	2,3-Epoxypropyl phenyl ether	Acute Tox. 4 (H332) Skin Irrit. 2 (H315) Skin Sens. 1 (H317) Muta. 2 (H341) Carc. 1B (H350) STOT SE 3 (H335) Aquatic Chronic 3 (H412)	<0,1
CAS number: 7664-38-2 EC number: 231-633-2	Phosphoric acid	Skin Corr. 1B (H314) Eye Dam. 1 (H318)	<0,1

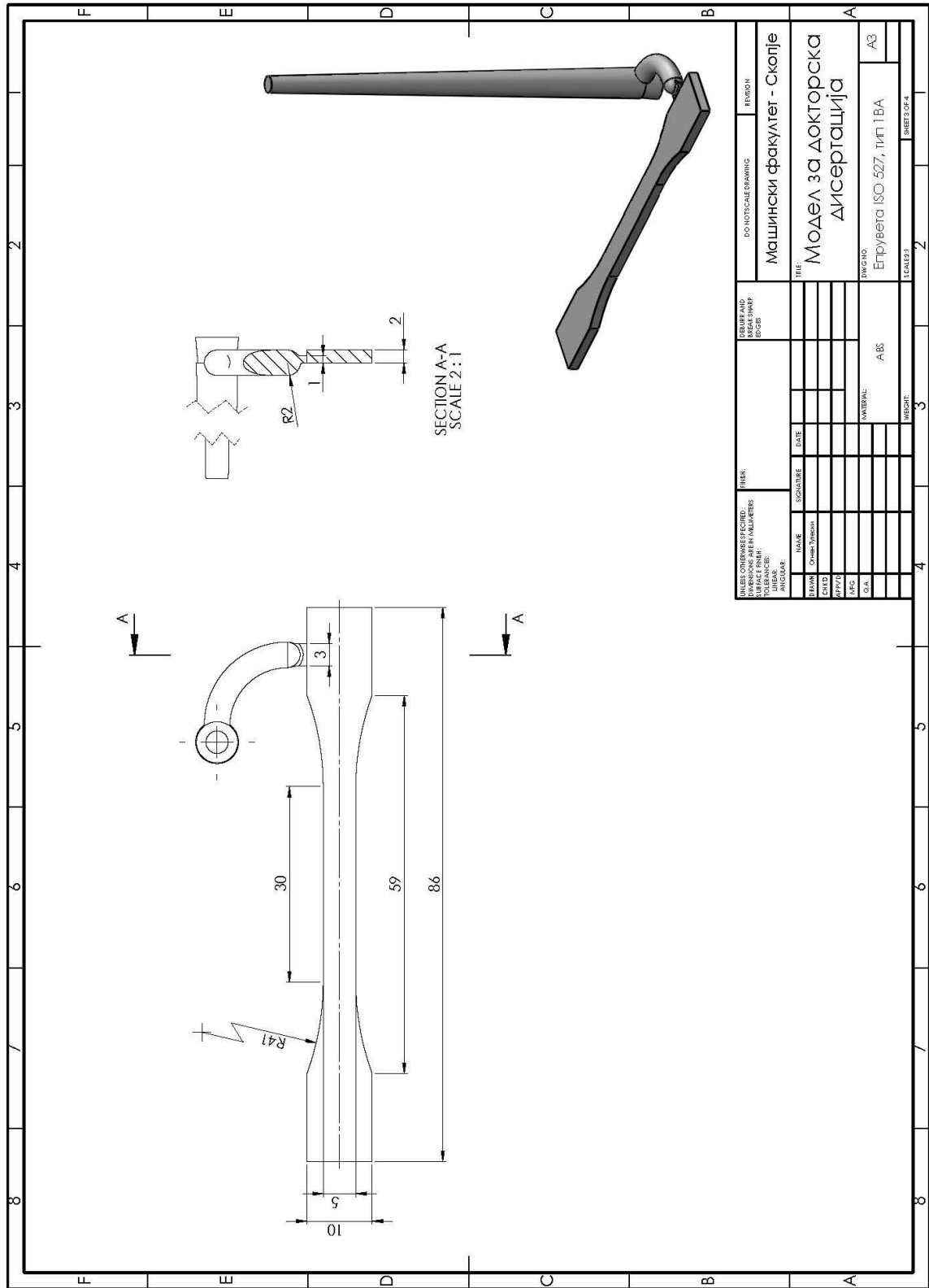
*(EC) European Commission

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

Табела 8.18: Состав на фотополимерот Digital ABS на Stratasys (Извор: [147])

Комерцијално име: DIGITAL ABS RGD531		
	Хемиско име	Масен удел [%]
CAS number: -	TRICYCLODECANE DIMETHANOL DIACRYLATE	20 - 30
CAS number: Proprietary	Proprietary	20 - 30
CAS number: Proprietary	Proprietary	10 - 20
CAS number: Proprietary	Proprietary	10 - 20
CAS number: -	Exo-1,7,7-trimethylbicyclo [2.2.1]hept-2-yl acrylate	5 - 10
CAS number: -	ISOBORNYL METHACRYLATE	5 - 10
CAS number: -	Tripropylene glycol diacrylate	1 - 5
CAS number: Proprietary	Proprietary	1 - 5
CAS number: -	Titaniumdioxide	0,1 - 1
CAS number: Proprietary	Proprietary	0,1 - 1
CAS number: Proprietary	Proprietary	<0,1
CAS number: Proprietary	Proprietary	<0,1
CAS number: Proprietary	Proprietary	<0,1
CAS number: -	2-methoxy-1-methylethyl acetate	<0,1
CAS number: -	phosphoric acid	<0,1

**(CLP) Classification, Labelling and Packaging

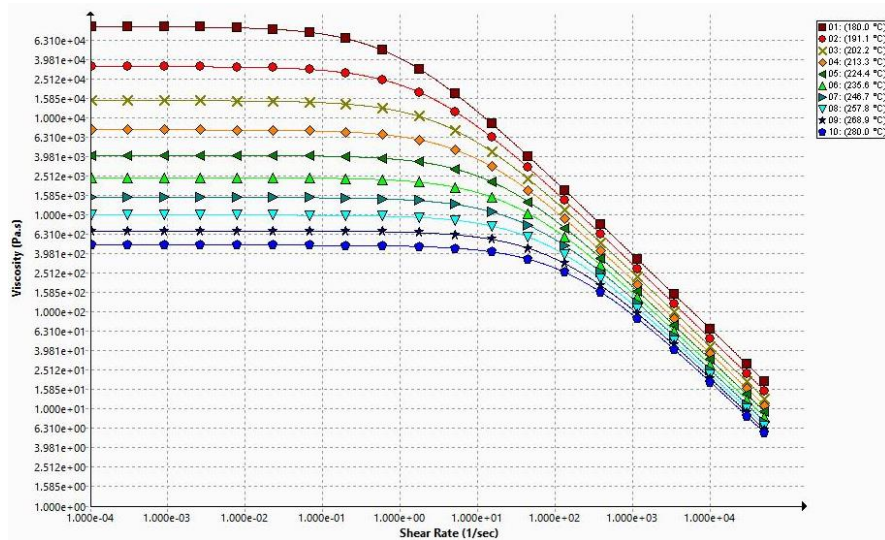


Слика 8.3: Технички цртеж за моделот за гравура 1 (Извор: [116])

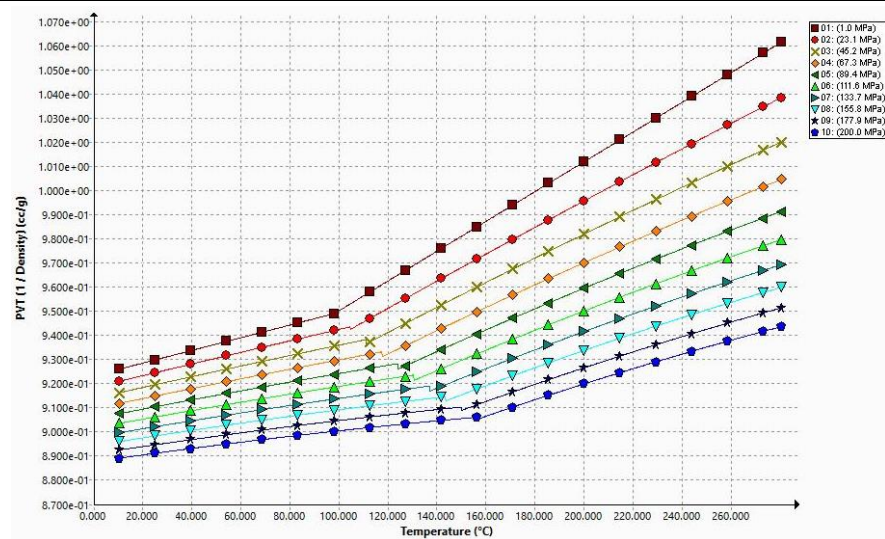
8.3. Прилог С: Резултати од симулациите на инјекционо вбризгување со методот на конечни елементи

Табела 8.19: Карактеристики за моделот на материјалот што се користи во симулациите (Извор: [117])

Материјал	ABS
Температура на топење	230.00 °C
Температура на алат	50.00 °C
Температура на исфрлање	90.00 °C
Температура на стаклена транзиција	100.00 °C
Специфична топлина	2.4e+03 J/(g·K)
Термичка спроводливост	4.302e-04 cal/(sec·cm·K)
Јунгов модул на еластичност	2.25e+03 МПа
Поасонов коефициент	3.9e-01


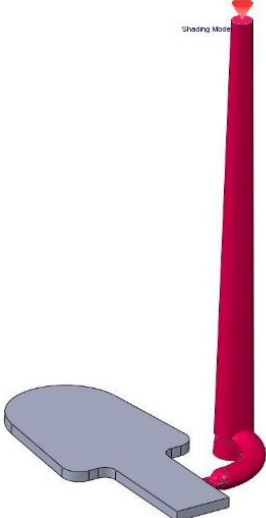


Дијаграм за вискозоста на материјалот во симулацијата

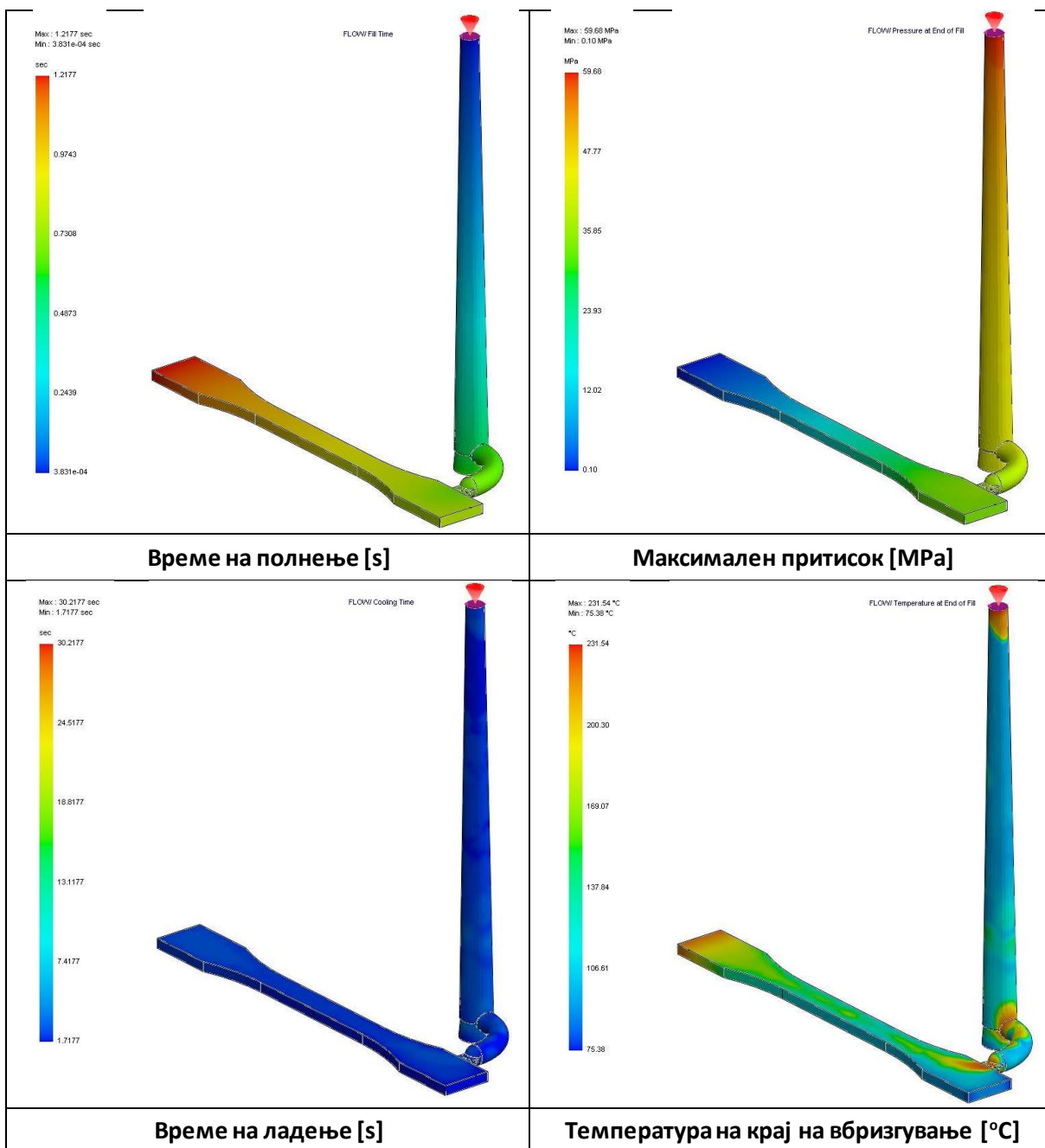


PVT дијаграм за математичкиот модел на материјалот во симулацијата

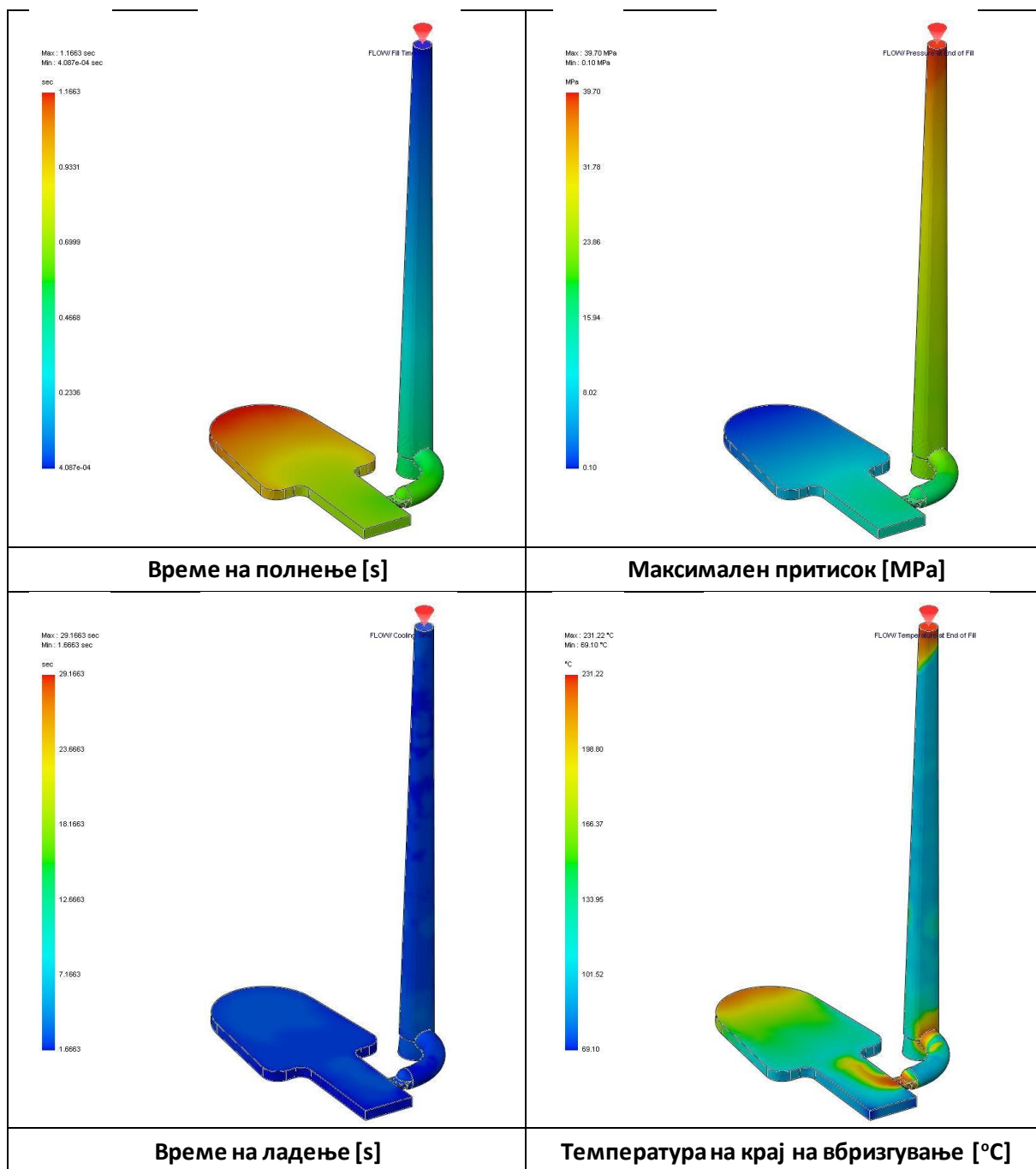
Табела 8.20: Сумарни резултати од симулациите за инјекционо вбризување за експерименталните модели (Извор: [117])

Референтен модел	Карактеристики за симулација
 <p>Примерок 1</p>	<p>Волумен на дел 3.30 (cm³) Маса на дел 3.64 (g) Број на елементи 68194 Број на јазли 20953 Притисок за вбризување 59.68 MPa Сила на притегање 3.16 Tonne Максимална температура 231.69 °C Максимално напрегање од смолкнување 1.1 MPa Максимален степен на смолкнување 4434.978 1/sec Проектиран циклус 43.54 sec 1. Време на полнење 1.22 sec 2. Време на пакување 6.52 sec 3. Време на ладење 30.80 sec 4. Време за отворање на алат 5.00 sec</p>
 <p>Примерок 2</p>	<p>Волумен на дел 3.70 (cm³) Маса на дел 4.08 (g) Број на елементи 62964 Број на јазли 19466 Притисок за вбризување 39.70 MPa Сила на притегање 2.54 Tonne Максимална температура 231.37 °C Максимално напрегање од смолкнување 1.06 MPa Максимален степен на смолкнување 3832.62 1/sec Проектиран циклус 43.49 sec 1. Време на полнење 1.17 sec 2. Време на пакување 6.52 sec 3. Време на ладење 30.80 sec 4. Време за отворање на алат 5.00 sec</p>

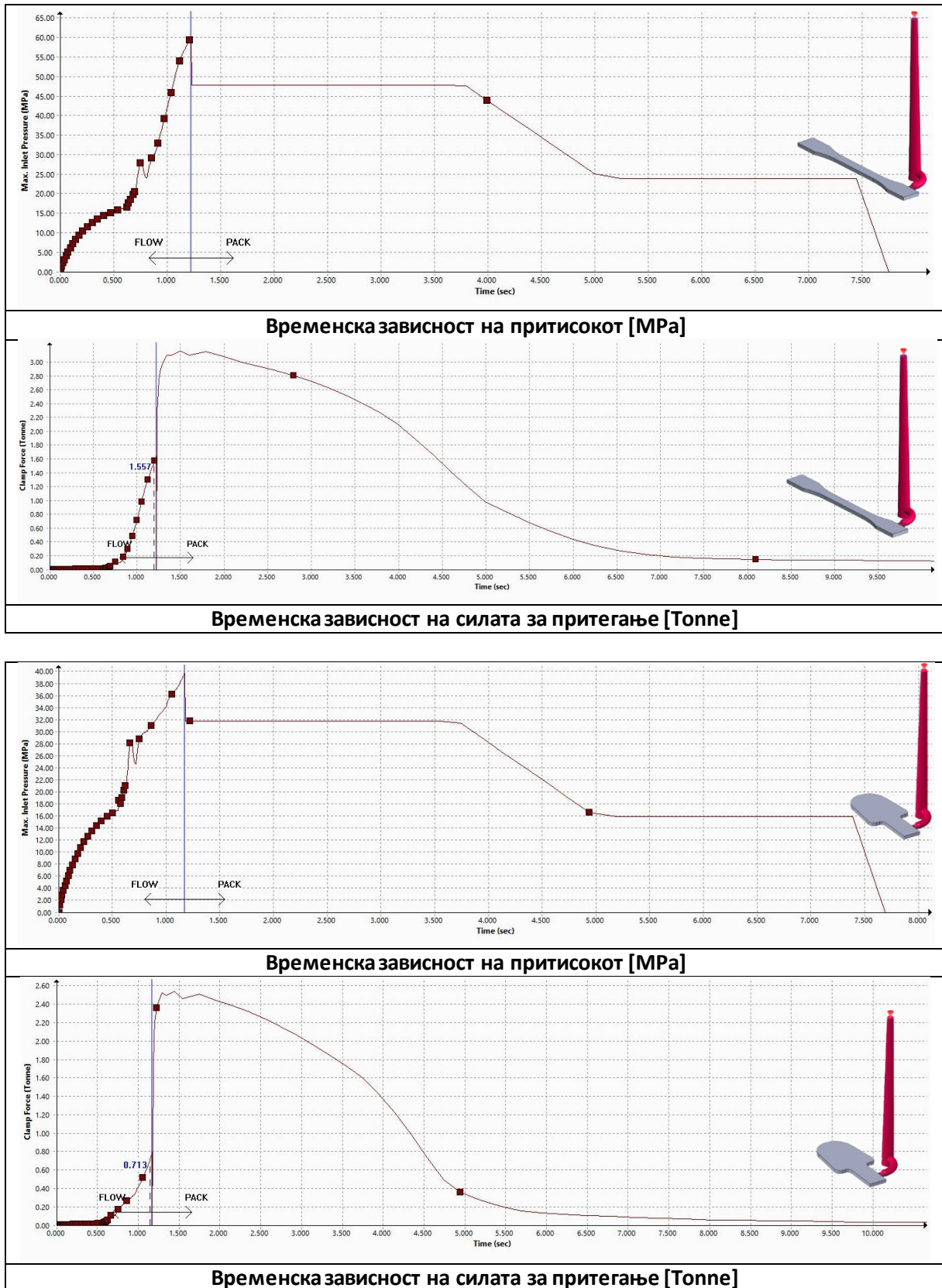
Табела 8.21: Графикони од симулациите за инјекционо вбризување за примерок 1 (Извор: [117])



Табела 8.22: Графикони од симулациите за инјекционо вбригување за примерок 2 (Извор: [117])



Табела 8.23: Графикони од симулациите за инјекционо вбризгување за примерок 1 и 2 (Извор: [117])



8.4. Прилог D: Податоци од мерења на 3Д печатените примероци

Табела 8.24: Сумарни резултати за примероците изработени од материјалот High Temp

Материјал: High Temp (ознака: HT)									
Cure	Агол на наклон [°]	Ориентација	Примерок бр.	σ_m [MPa]	$\bar{\sigma}_m$ [MPa]	Станд. девијација	ε_m [%]	$\bar{\varepsilon}_m$ [%]	Станд. девијација
„Зелени“ (ознака: G)	0°	Рамно	HT-G-0-R-1	8,41	9,07	0,93	21,51	27,94	8,09
			HT-G-0-R-2	9,73			32,96		
			HT-G-0-R-3	9,05			29,36		
		Бочно	HT-G-0-B-1	9,73	9,84	0,86	32,96	32,92	1,53
			HT-G-0-B-2	10,94			35,12		
			HT-G-0-B-3	8,87			30,68		
	45°	Рамно	HT-G-45-R-1	13,85	12,55	1,84	25,52	30,91	8,39
			HT-G-45-R-2	11,24			37,39		
			HT-G-45-R-3	12,55			29,80		
		Бочно	HT-G-45-B-1	10,87	9,70	1,66	30,14	25,53	6,73
			HT-G-45-B-2	8,52			20,62		
			HT-G-45-B-3	9,71			25,82		
	90°	Рамно	HT-G-90-R-1	14,67	14,58	0,05	30,48	34,88	5,88
			HT-G-90-R-2	14,60			38,80		
			HT-G-90-R-3	14,48			35,36		
		Бочно	HT-G-90-B-1	15,11	15,02	0,10	31,39	35,93	4,31
			HT-G-90-B-2	15,04			39,96		
			HT-G-90-B-3	14,91			36,42		
Пост-стврдување (ознака: U)	0°	Рамно	HT-U-0-R-1	39,00	39,19	0,33	4,56	4,63	0,19
			HT-U-0-R-2	39,57			4,84		
			HT-U-0-R-3	39,00			4,48		
		Бочно	HT-U-0-B-1	36,09	39,67	3,15	4,48	5,15	0,86
			HT-U-0-B-2	40,96			4,84		
			HT-U-0-B-3	41,97			6,12		
	45°	Рамно	HT-U-45-R-1	58,95	56,90	1,84	8,80	8,67	0,14
			HT-U-45-R-2	55,39			8,52		
			HT-U-45-R-3	56,37			8,68		
		Бочно	HT-U-45-B-1	33,60	39,09	8,68	4,24	5,17	1,41
			HT-U-45-B-2	34,57			4,48		
			HT-U-45-B-3	49,09			6,80		
	90°	Рамно	HT-U-90-R-1	49,45	50,22	1,00	8,44	8,55	0,33
			HT-U-90-R-2	51,35			8,92		
			HT-U-90-R-3	49,87			8,28		
		Бочно	HT-U-90-B-1	50,93	51,73	1,03	8,69	8,80	0,34
			HT-U-90-B-2	52,89			9,19		
			HT-U-90-B-3	51,37			8,53		
Термички третман (ознака: T)	0°	Рамно	HT-T-0-R-1	28,77	25,24	4,34	2,80	4,63	0,19
			HT-T-0-R-2	26,55			2,93		
			HT-T-0-R-3	20,39			2,42		
		Бочно	HT-T-0-B-1	33,02	33,70	2,01	3,94	5,15	0,86
			HT-T-0-B-2	35,96			4,22		
			HT-T-0-B-3	32,12			3,73		
	45°	Рамно	HT-T-45-R-1	58,95	56,90	1,84	8,80	3,29	0,46
			HT-T-45-R-2	55,39			8,52		
			HT-T-45-R-3	56,37			8,68		
		Бочно	HT-T-45-B-1	33,60	39,09	8,68	4,24	3,96	1,50
			HT-T-45-B-2	34,57			4,48		
			HT-T-45-B-3	49,09			6,80		
	90°	Рамно	HT-T-90-R-1	49,45	50,22	1,00	8,44	8,55	0,33
			HT-T-90-R-2	51,35			8,92		
			HT-T-90-R-3	49,87			8,28		
		Бочно	HT-T-90-B-1	25,55	28,03	3,28	3,11	3,33	0,36
			HT-T-90-B-2	26,79			3,14		
			HT-T-90-B-3	31,75			3,75		

Табела 8.25: Сумарни резултати за примероците изработени од материјалот Rigid 10k

Материјал: Rigid 10k (ознака: R)									
Cure	Агол на наклон [°]	Ориентација	Примерок бр.	σ_m [MPa]	$\bar{\sigma}_m$ [MPa]	Станд. девијација	ε_m [%]	$\bar{\varepsilon}_m$ [%]	Станд. девијација
„Зелени“ (ознака: G)	0°	Рамно	R-G-0-R-1	51,24	51,85	0,62	5,16	4,92	0,23
			R-G-0-R-2	52,47			4,70		
			R-G-0-R-3	51,85			4,90		
		Бочно	R-G-0-B-1	55,12	52,82	2,27	3,42	3,19	
			R-G-0-B-2	50,57			2,98		
			R-G-0-B-3	52,77			3,16		
	45°	Рамно	R-G-45-R-1	53,76	49,42	5,21	3,64	3,19	0,52
			R-G-45-R-2	50,86			3,30		
			R-G-45-R-3	43,64			2,62		
		Бочно	R-G-45-B-1	54,85	54,08	0,83	3,57	3,49	
			R-G-45-B-2	53,20			3,40		
			R-G-45-B-3	54,18			3,50		
	90°	Рамно	R-G-90-R-1	54,38	57,70	3,26	3,34	3,55	0,21
			R-G-90-R-2	60,90			3,77		
			R-G-90-R-3	57,81			3,54		
		Бочно	R-G-90-B-1	56,01	59,43	3,36	3,44	3,66	
			R-G-90-B-2	62,73			3,88		
			R-G-90-B-3	59,54			3,65		
Пост-стврдување (ознака: U)	0°	Рамно	R-U-0-R-1	55,91	69,96	15,00	2,00	2,65	1,06
			R-U-0-R-2	85,75			3,88		
			R-U-0-R-3	68,22			2,09		
		Бочно	R-U-0-B-1	81,79	80,11	1,69	3,45	3,18	
			R-U-0-B-2	78,40			2,92		
			R-U-0-B-3	80,13			3,18		
	45°	Рамно	R-U-45-R-1	94,84	97,44	3,86	3,47	3,95	0,51
			R-U-45-R-2	95,60			4,48		
			R-U-45-R-3	101,88			3,91		
		Бочно	R-U-45-B-1	88,85	95,84	6,51	3,22	3,60	
			R-U-45-B-2	96,95			3,70		
			R-U-45-B-3	101,72			3,90		
	90°	Рамно	R-U-90-R-1	84,04	80,11	3,86	3,21	3,03	0,18
			R-U-90-R-2	76,34			2,84		
			R-U-90-R-3	79,96			3,03		
		Бочно	R-U-90-B-1	86,56	82,52	3,97	3,31	3,12	
			R-U-90-B-2	78,63			2,93		
			R-U-90-B-3	82,36			3,12		
Термички третман (ознака: T)	0°	Рамно	R-T-0-R-1	58,19	58,44	0,22	1,88	1,89	0,02
			R-T-0-R-2	58,60			1,92		
			R-T-0-R-3	58,52			1,89		
		Бочно	R-T-0-B-1	75,45	78,16	45,21	2,63	2,78	
			R-T-0-B-2	80,87			2,94		
			R-T-0-B-3	78,16			2,78		
	45°	Рамно	R-T-45-R-1	48,70	62,74	12,40	1,71	2,10	0,36
			R-T-45-R-2	67,30			2,18		
			R-T-45-R-3	72,21			2,42		
		Бочно	R-T-45-B-1	90,28	85,43	4,33	3,11	2,97	
			R-T-45-B-2	84,03			2,96		
			R-T-45-B-3	81,97			2,84		
	90°	Рамно	R-T-90-R-1	73,25	73,79	42,61	2,64	2,59	1,49
			R-T-90-R-2	74,32			2,54		
			R-T-90-R-3	73,79			2,59		
		Бочно	R-T-90-B-1	75,45	76,00	0,55	2,72	2,67	
			R-T-90-B-2	76,55			2,62		
			R-T-90-B-3	76,00			2,67		

Табела 8.26: Сумарни резултати од мерењата на димензии на примероците изработени од материјалот High Temp

Site	Ориентација	Примерок бр.	Должина [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Широчина мерно подрачје [mm]			Просек	Ст. дев	Широчина глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
									4,91	4,92	4,91					
Материјал: High Temp (ознака: HT)	Хоризонтално -рамно	HT-G-A1	75,05	75	0,08	2,06	2,05	0,01	4,91	9,97	9,92	9,95	9,93	0,02	9,92	0,02
		HT-G-A2	74,9	75	0,08	2,04	2,05	0,01	4,92	9,94	9,92	9,95	9,93	0,02	9,92	0,02
		HT-G-A3	75,04	75	0,08	2,04	2,05	0,01	4,91	9,94	9,92	9,95	9,93	9,93	0,02	9,92
	Хоризонтално -бочно	HT-G-C-1	74,57	74,54	0,03	1,95	1,99	0,04	5,06	10,09	10,08	10,13	10,11	0,04	10,08	0,03
		HT-G-C-2	74,52	74,54	0,03	2,03	1,99	0,04	5,11	10,13	10,11	10,13	10,11	0,04	10,11	0,03
		HT-G-C-3	74,52	74,54	0,03	1,99	1,99	0,04	5,06	10,17	10,13	10,13	10,13	0,04	10,13	0,03
	Вертикално	HT-G-E-1	74,99	74,95	0,05	1,91	1,95	0,06	4,93	9,91	9,98	9,96	9,96	0,03	9,98	0,03
		HT-G-E-2	74,95	74,95	0,05	1,92	1,95	0,06	4,91	9,92	9,97	9,97	9,96	0,03	9,97	0,03
		HT-G-E-3	74,9	74,9	0,05	2,02	1,95	0,06	4,9	9,86	9,93	9,93	9,93	0,03	9,93	0,03
	45° -рамно	HT-G-G-1	74,96	74,99	0,04	1,9	1,94	0,05	4,88	9,98	9,81	9,88	9,89	0,06	9,81	0,14
		HT-G-G-2	75,04	74,99	0,04	1,93	1,94	0,05	4,88	9,91	9,8	9,89	9,89	0,06	9,8	0,14
		HT-G-G-3	74,97	74,99	0,04	1,99	1,94	0,05	5,05	10,03	10,05	10,05	10,05	0,06	10,05	0,14
	45° -бочно	HT-G-H-1	75,21	75,15	0,18	1,91	1,97	0,1	4,85	9,87	9,89	9,91	9,87	0,1	9,89	0,01
		HT-G-H-2	75,29	75,15	0,18	1,92	1,97	0,1	4,88	9,83	9,87	9,91	9,87	0,1	9,87	0,01
		HT-G-H-3	74,95	75,15	0,18	2,08	1,97	0,1	4,9	10,02	9,88	9,91	9,88	0,1	9,88	0,01
Пост-стрднување "ознака: С)	Хоризонтално -рамно	HT-SA-1	74,49	74,44	0,05	2,15	2,16	0,02	4,98	9,91	9,95	9,85	9,88	0,07	9,95	0,07
		HT-SA-2	74,44	74,44	0,05	2,15	2,16	0,02	4,92	9,78	9,81	9,85	9,88	0,07	9,81	0,07
		HT-SA-3	74,39	74,44	0,05	2,18	2,16	0,02	4,87	9,87	9,87	9,85	9,88	0,07	9,87	0,07
	Хоризонтално -бочно	HT-SC-1	74,5	74,47	0,03	1,95	1,99	0,04	5,05	10,08	10,07	10,12	10,1	0,04	10,07	0,03
		HT-SC-2	74,45	74,47	0,03	2,03	1,99	0,04	5,1	10,12	10,1	10,12	10,1	0,04	10,1	0,03
		HT-SC-3	74,45	74,47	0,03	1,99	1,99	0,04	5,05	10,16	10,12	10,12	10,12	0,04	10,12	0,03
	Вертикално	HT-CE-1	74,61	75,02	0,35	2,02	2,05	0,03	5,11	10,05	10,11	10,13	10,1	0,02	10,11	0,11
		HT-CE-2	75,22	75,02	0,35	2,07	2,05	0,03	5,01	10,09	10,09	10,08	10,3	0,02	10,3	0,11
		HT-CE-3	75,22	75,02	0,35	2,07	2,05	0,03	5,01	10,09	10,09	10,08	10,3	0,02	10,3	0,11
	45° -рамно	HT-CG-1	74,95	75	0,05	2,02	1,98	0,04	4,82	9,88	9,86	9,88	9,87	0,02	9,86	0,01
		HT-CG-2	75,02	75	0,05	1,98	1,98	0,04	4,87	9,86	9,88	9,88	9,87	0,02	9,88	0,01
		HT-CG-3	75,04	75	0,05	1,95	1,98	0,04	4,88	9,89	9,89	9,88	9,87	0,02	9,86	0,01
	45° -бочно	HT-CH-1	74,98	75,02	0,05	1,85	1,85	0,01	4,84	9,85	9,83	9,86	9,86	0,01	9,83	0,04
		HT-CH-2	75,02	75,02	0,05	1,84	1,85	0,01	4,89	9,86	9,85	9,86	9,86	0,01	9,85	0,04
		HT-CH-3	75,07	75,02	0,05	1,86	1,85	0,01	4,87	9,86	9,85	9,86	9,86	0,01	9,85	0,04
Термички третман (ознака: Т)	Хоризонтално -рамно	HT-TA-1	74,78	74,81	0,03	2,1	2,03	0,06	4,95	9,94	9,97	9,97	9,98	0,01	9,97	0,01
		HT-TA-2	74,82	74,81	0,03	1,98	2,03	0,06	4,95	10,02	9,99	9,98	9,98	0,01	9,99	0,01
		HT-TA-3	74,84	74,81	0,03	2,02	2,03	0,06	4,94	9,95	9,97	9,97	9,98	0,01	9,97	0,01
	Хоризонтално -бочно	HT-TC-1	74,78	74,68	0,09	1,96	1,94	0,02	5,05	9,97	10,02	10,02	10,02	0,01	10,02	0,01
		HT-TC-2	74,64	74,68	0,09	1,95	1,94	0,02	5,09	10,03	10,02	10,02	10,02	0,01	10,02	0,01
		HT-TC-3	74,62	74,68	0,09	1,92	1,94	0,02	5,07	9,99	10,03	10,03	10,03	0,01	10,03	0,01
	Вертикално	HT-TE-1	74,8	74,8	0,01	2,01	2,02	0,01	4,93	9,87	9,84	9,88	9,87	0,02	9,84	0,03
		HT-TE-2	74,8	74,8	0,01	2,03	2,02	0,01	4,92	9,88	9,9	9,88	9,87	0,02	9,9	0,03
		HT-TE-3	74,79	74,8	0,01	2,03	2,02	0,01	4,91	9,9	9,88	9,88	9,87	0,02	9,88	0,03
	45° -рамно	HT-TG-1	74,88	74,86	0,1	2	1,99	0,02	4,97	10,02	10,07	10,03	10,03	0,04	10,07	0,04
		HT-TG-2	74,75	74,86	0,1	2,01	1,99	0,02	4,96	10,05	10,07	10,03	10,03	0,04	10,07	0,04
		HT-TG-3	74,95	74,86	0,1	1,97	1,99	0,02	5,03	10,01	10,01	10,03	10,03	0,04	10,03	0,04
	45° -бочно	HT-TN-1	74,93	74,97	0,06	2,08	2,05	0,04	4,89	9,93	9,89	9,96	9,89	0,04	9,89	0,03
		HT-TN-2	75,03	74,97	0,06	2,01	2,05	0,04	4,9	9,95	9,92	9,96	9,89	0,04	9,92	0,03
		HT-TN-3	74,94	74,97	0,06	2,07	2,05	0,04	4,89	10,01	9,87	9,96	9,89	0,04	9,87	0,03

Табела 8.27: Сумарни резултати од мерењата на димензии на примероците изработени од материјалот Rigid 10k

Site	Ориентација	Примерок бр.	Должина [mm]	Продек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Продек	Ст. дев	Ширина-мерно подрачје [mm]	Продек	Ст. дев	Ширина-глава 1 [mm]			Продек	Ст. дев	Ширина-глава 2 [mm]			Продек	Ст. дев	
												Продек	Ст. дев	Продек			Ст. дев	Продек	Ст. дев			Продек
„Зелени“ (ознака: G)	Хоризонтално - рамно	R-G-A-1	75,17	75,17	0,015	2,52	2,52	5,06	10,08	10,08	0,006	10,09	10,08	10,09	10,11	10,11	10,09	10,12	10,11	10,11	10,11	0,015
		R-G-A-2	75,16	75,16	0,014	2,51	2,51	5,05	10,08	10,08	0,015	10,08	10,08	10,12	10,12	10,11	10,12	10,12	10,11	10,11	10,11	0,006
		R-G-A-3	75,19	75,19	0,014	2,54	2,54	5,03	10,07	10,07	5,05	10,07	10,07	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	0,015
	Хоризонтално - бочно	R-G-C-1	75,07	75,07	0,01	2,16	2,16	5,51	10,41	10,41	0,032	10,41	10,41	10,42	10,42	10,43	10,42	10,42	10,42	10,43	10,43	0,015
		R-G-C-2	75,14	75,14	0,035	2,14	2,14	5,45	10,45	10,45	2,15	10,45	10,45	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,43	0,017
		R-G-C-3	75,11	75,11	0,023	2,15	2,15	5,46	10,38	10,38	2,25	10,38	10,38	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	0,015
	Вертикално	R-G-E-1	75,29	75,29	0,023	2,24	2,24	5,14	10,12	10,12	2,25	10,12	10,12	10,13	10,13	10,11	10,11	10,13	10,13	10,11	10,11	0,021
		R-G-E-2	75,29	75,29	0,023	2,25	2,25	5,16	10,11	10,11	2,25	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	0,015
		R-G-E-3	75,25	75,25	0,021	2,25	2,25	5,13	10,08	10,08	2,18	10,08	10,08	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	0,021
	45° - рамно	R-G-G-1	75,25	75,25	0,021	2,21	2,21	5,11	10,18	10,18	2,26	10,18	10,18	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	10,13	10,13	10,12	0,01
		R-G-G-2	75,28	75,28	0,021	2,31	2,31	5,12	10,16	10,16	2,19	10,16	10,16	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,12	0,01
		R-G-G-3	75,29	75,29	0,021	2,27	2,27	5,09	10,15	10,15	2,18	10,15	10,15	10,16	10,16	10,11	10,11	10,16	10,16	10,11	10,11	0,021
	45° - бочно	R-G-H-1	75,21	75,21	0,021	2,19	2,19	5,17	10,23	10,23	2,18	10,23	10,23	10,26	10,26	10,27	10,26	10,26	10,27	10,27	10,25	0,021
		R-G-H-2	75,24	75,24	0,021	2,19	2,19	5,23	10,23	10,23	2,15	10,23	10,23	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,25	0,021
		R-G-H-3	75,25	75,25	0,021	2,15	2,15	5,21	10,22	10,22	2,16	10,22	10,22	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,15	0,021
Пост-тврдување (ознака: C)	Хоризонтално - рамно	R-C-A-1	74,87	74,87	0,071	2,55	2,55	5,06	10,07	10,07	2,55	10,07	10,07	10,08	10,08	10,07	10,08	10,07	10,07	10,07	10,07	0,01
		R-C-A-2	74,92	74,92	0,071	2,55	2,55	5,04	10,11	10,11	2,55	10,11	10,11	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	0,01
		R-C-A-3	75,01	75,01	0,071	2,54	2,54	5,06	10,11	10,11	2,55	10,11	10,11	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,07	0,01
	Хоризонтално - бочно	R-C-C-1	75,09	75,09	0,015	2,18	2,18	5,44	10,43	10,43	2,17	10,43	10,43	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,45	0,006
		R-C-C-2	75,06	75,06	0,015	2,16	2,16	5,42	10,42	10,42	2,17	10,42	10,42	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	0,006
		R-C-C-3	75,07	75,07	0,015	2,16	2,16	5,43	10,45	10,45	2,17	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	0,006
	Вертикално	R-C-E-1	75,2	75,2	0,015	2,17	2,17	5,07	10,06	10,06	2,17	10,06	10,06	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,08	0,015
		R-C-E-2	75,21	75,21	0,015	2,19	2,19	5,06	10,05	10,05	2,17	10,05	10,05	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	0,015
		R-C-E-3	75,18	75,18	0,015	2,16	2,16	5,07	10,08	10,08	2,17	10,08	10,08	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	0,015
	45° - рамно	R-C-G-1	75,1	75,1	0,021	2,25	2,25	5,09	10,11	10,11	2,26	10,11	10,11	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,11	0,025
		R-C-G-2	75,11	75,11	0,021	2,26	2,26	5,11	10,09	10,09	2,26	10,09	10,09	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	0,025
		R-C-G-3	75,14	75,14	0,021	2,28	2,28	5,13	10,19	10,19	2,19	10,19	10,19	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,11	0,025
	45° - бочно	R-C-H-1	75,12	75,12	0,015	2,2	2,2	5,19	10,41	10,41	2,19	10,41	10,41	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	0,017
		R-C-H-2	75,13	75,13	0,015	2,15	2,15	5,15	10,28	10,28	2,19	10,28	10,28	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,22	0,017
		R-C-H-3	75,1	75,1	0,015	2,23	2,23	5,16	10,35	10,35	2,19	10,35	10,35	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,22	0,017
Термички третман (ознака: T)	Хоризонтално - рамно	R-T-A-1	74,96	74,96	0,056	2,54	2,54	5,08	10,08	10,08	2,56	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	0,015
		R-T-A-2	74,85	74,85	0,056	2,56	2,56	5,06	10,06	10,06	2,56	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	0,015
		R-T-A-3	74,92	74,92	0,056	2,57	2,57	5,06	10,09	10,09	2,56	10,09	10,09	10,05	10,05	10,05	10,05	10,05	10,05	10,05	10,06	0,015
	Хоризонтално - бочно	R-T-C-1	75,07	75,07	0,046	2,17	2,17	5,45	10,42	10,42	2,15	10,42	10,42	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,44	10,41	0,025
		R-T-C-2	74,98	74,98	0,046	2,16	2,16	5,45	10,41	10,41	2,15	10,41	10,41	10,39	10,39	10,39	10,39	10,39	10,39	10,39	10,41	0,025
		R-T-C-3	75,04	75,04	0,046	2,12	2,12	5,43	10,45	10,45	2,15	10,45	10,45	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	0,025
	Вертикално	R-T-E-1	75,18	75,18	0,006	2,18	2,18	5,05	10,05	10,05	2,21	10,05	10,05	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	10,08	0,02
		R-T-E-2	75,19	75,19	0,006	2,23	2,23	5,16	10,11	10,11	2,21	10,11	10,11	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,08	0,02
		R-T-E-3	75,18	75,18	0,006	2,21	2,21	5,07	10,08	10,08	2,21	10,08	10,08	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,08	0,02
	45° - рамно	R-T-G-1	75,06	75,06	0,006	2,27	2,27	5,1	10,16	10,16	2,27	10,16	10,16	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,09	0,012
		R-T-G-2	75,07	75,07	0,006	2,25	2,25	5,08	10,08	10,08	2,27	10,08	10,08	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,09	0,012
		R-T-G-3	75,07	75,07	0,006	2,28	2,28	5,12	10,15	10,15	2,27	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,09	0,012
	45° - бочно	R-T-H-1	75,11	75,11	0,035	2,2	2,2	5,15	10,17	10,17	2,18	10,17	10,17	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,15	0,036
		R-T-H-2	75,14	75,14	0,035	2,19	2,19	5,14	10,18	10,18	2,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,15	0,036
		R-T-H-3	75,18	75,18	0,035	2,16	2,16	5,12	10,19	10,19	2,18	10,19	10,19	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,18	10,15	0,036

8.5. Прилог Е: Податоци од мерења на вбризгани модели

Табела 8.28: Сумарни резултати од мерењата на димензии на вбризганите модели со облик на стандардна епрувета

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Стандардна епрувета															
xx – недостапна мерка поради нецелосно исполнување на гравура															
Ред бр.	Должина [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - мерно подрачје [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 1 [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
1	86,78	86,83	0,045	2,152	2,12	0,101	5,033	5,06	0,027	10,076	10,08	0,008	10,034	10,02	0,013
	86,87			2,206			5,086			10,092			10,029		
	86,83			2,01			5,072			10,084			10,009		
2	86,85	86,92	0,064	2,155	2,12	0,112	5,07	5,06	0,040	10,073	10,07	0,001	10,032	10,02	0,010
	86,96			2,206			5,019			10,071			10,026		
	86,96			1,992			5,098			10,072			10,013		
3	86,85	86,90	0,044	2,159	2,13	0,083	5,017	5,02	0,002	10,084	10,07	0,011	10,039	10,04	0,008
	86,92			2,195			5,018			10,063			10,047		
	86,93			2,036			5,021			10,074			10,032		
4	86,88	86,92	0,045	2,173	2,15	0,068	5,017	5,04	0,029	10,056	10,06	0,007	10,043	10,03	0,012
	86,97			2,199			5,074			10,07			10,03		
	86,92			2,071			5,042			10,063			10,02		
5	86,89	86,89	0,010	2,127	2,14	0,035	5,025	5,06	0,043	10,064	10,04	0,021	9,979	10,00	0,023
	86,9			2,182			5,105			10,023			10,008		
	86,88			2,118			5,036			10,044			10,024		
6	87,01	86,94	0,075	2,137	2,13	0,074	5,083	5,06	0,041	10,069	9,99	0,078	10,019	9,98	0,041
	86,95			2,196			5,093			9,913			9,985		
	86,86			2,049			5,018			9,991			9,938		
7	86,87	86,91	0,038	2,116	2,11	0,074	5,026	5,06	0,036	10,064	10,05	0,017	10,032	10,02	0,015
	86,94			2,184			5,096			10,031			10,016		
	86,93			2,036			5,046			10,048			10,003		
8	86,89	86,91	0,025	2,147	2,10	0,120	5,035	5,04	0,032	10,07	10,05	0,024	10,011	10,00	0,010
	86,94			2,191			5,076			10,023			10,006		
	86,91			1,965			5,014			10,047			9,992		
9	86,93	86,97	0,045	2,125	2,11	0,088	5,118	5,09	0,045	10,077	10,07	0,006	10,052	10,05	0,013
	87,02			2,184			5,04			10,066			10,066		
	86,97			2,011			5,119			10,072			10,04		
10	87,03	87,01	0,067	2,16	2,12	0,091	5,061	5,07	0,032	10,08	10,09	0,006	10,056	10,05	0,018
	87,07			2,179			5,1			10,092			10,069		
	86,94			2,013			5,036			10,086			10,033		
11	xx	xx	xx	2,189	2,12	0,109	5,086	5,10	0,015	10,074	10,08	0,004	xx	xx	xx
	xx			2,175			5,114			10,082			xx		

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Стандардна епрувета															
xx – недостапна мерка поради нецелосно исполнување на гравура															
Ред бр.	Должина I [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - мерно подрачје [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 1 [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
	xx			1,994			5,09			10,078			xx		
12	xx	xx	xx	2,189	2,13	0,090	5,051	5,09	0,030	10,073	10,08	0,011	xx	xx	xx
	xx			2,167			5,101			10,095			xx		
	xx			2,024			5,104			10,084			xx		
13	xx	xx	xx	2,18	2,14	0,064	5,088	5,10	0,010	10,067	10,06	0,006	xx	xx	xx
	xx			2,175			5,1			10,056			xx		
	xx			2,067			5,107			10,062			xx		
14	xx	xx	xx	2,175	2,11	0,118	5,144	5,17	0,024	10,063	10,06	0,002	xx	xx	xx
	xx			2,181			5,174			10,062			xx		
	xx			1,974			5,192			10,065			xx		
15	xx	xx	xx	2,165	2,09	0,122	5,034	5,08	0,043	10,081	10,08	0,001	xx	xx	xx
	xx			2,157			5,116			10,083			xx		
	xx			1,949			5,1			10,082			xx		
16	xx	xx	xx	2,169	2,09	0,127	5,091	5,10	0,016	10,075	10,08	0,006	xx	xx	xx
	xx			2,151			5,118			10,086			xx		
	xx			1,941			5,09			10,081			xx		
17	87,06	87,00	0,053	2,16	2,10	0,115	5,078	5,08	0,034	10,069	10,07	0,001	10,057	10,06	0,016
	86,96			2,178			5,109			10,067			10,071		
	86,98			1,971			5,042			10,068			10,039		
18	87,02	87,05	0,025	2,153	2,09	0,130	5,163	5,12	0,034	10,072	10,08	0,003	10,043	10,06	0,016
	87,07			2,178			5,103			10,078			10,074		
	87,05			1,942			5,107			10,075			10,052		
19	86,98	87,02	0,036	2,145	2,11	0,096	5,066	5,08	0,016	10,085	10,08	0,003	10,069	10,06	0,008
	87,05			2,185			5,08			10,08			10,067		
	87,03			2,002			5,098			10,083			10,054		
20	86,98	86,99	0,015	2,135	2,10	0,105	5,087	5,10	0,009	10,087	10,08	0,007	10,069	10,07	0,006
	87,01			2,181			5,103			10,074			10,073		
	86,99			1,98			5,101			10,081			10,062		
21	87	87,02	0,040	2,131	2,10	0,099	5,107	5,11	0,003	10,075	10,07	0,004	10,063	10,06	0,008
	87,07			2,174			5,113			10,067			10,073		
	87			1,986			5,111			10,071			10,057		
22	86,94	86,99	0,044	2,14	2,09	0,130	5,073	5,07	0,041	10,079	10,08	0,005	10,07	10,07	0,004
	87,02			2,188			5,115			10,089			10,072		
	87,01			1,942			5,034			10,084			10,064		
23	86,93	86,98	0,044	2,139	2,08	0,139	5,06	5,08	0,026	10,085	10,08	0,008	10,054	10,06	0,010
	87,01			2,186			5,11			10,069			10,074		

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Стандардна епрувета															
xx – недостапна мерка поради нецелосно исполнување на гравура															
Ред бр.	Должина I [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - мерно подрачје [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 1 [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
	87			1,925			5,071			10,077			10,065		
24	87,06	87,09	0,030	2,156	2,12	0,124	5,056	5,07	0,043	10,1	10,09	0,008	10,089	10,08	0,009
	87,09			2,223			5,118			10,085			10,088		
	87,12			1,983			5,035			10,093			10,073		
25	86,98	87,00	0,020	2,147	2,11	0,126	5,104	5,09	0,031	10,133	10,11	0,023	10,083	10,08	0,008
	87,02			2,22			5,109			10,088			10,084		
	87			1,974			5,053			10,11			10,069		
26	87,01	87,01	0,020	2,137	2,11	0,124	5,058	5,08	0,036	10,102	10,09	0,013	10,091	10,08	0,015
	87,03			2,215			5,121			10,077			10,062		
	86,99			1,973			5,058			10,09			10,078		
27	86,97	87,04	0,058	2,133	2,13	0,076	5,077	5,08	0,023	10,096	10,09	0,010	10,069	10,06	0,011
	87,07			2,206			5,108			10,077			10,065		
	87,07			2,055			5,062			10,087			10,048		
28	87	87,03	0,026	2,137	2,09	0,142	5,073	5,09	0,023	10,105	10,09	0,013	10,072	10,07	0,007
	87,04			2,194			5,116			10,08			10,066		
	87,05			1,924			5,079			10,093			10,058		
29	86,86	86,86	0,025	2,13	2,12	0,083	5,101	5,08	0,033	10,096	10,09	0,010	10,077	10,06	0,022
	86,88			2,198			5,104			10,076			10,058		
	86,83			2,032			5,046			10,091			10,033		
30	86,82	86,87	0,047	2,157	2,11	0,114	5,06	5,08	0,025	10,092	10,09	0,003	10,072	10,06	0,012
	86,89			2,197			5,108			10,086			10,059		
	86,91			1,983			5,073			10,089			10,049		
31	86,87	86,96	0,076	2,137	2,10	0,132	5,111	5,11	0,012	10,09	10,07	0,019	10,073	10,06	0,008
	87,01			2,206			5,115			10,052			10,06		
	86,99			1,951			5,092			10,071			10,06		
32	87,07	87,05	0,026	2,161	2,11	0,149	5,068	5,08	0,013	10,099	10,10	0,004	10,08	10,07	0,012
	87,06			2,232			5,094			10,092			10,074		
	87,02			1,945			5,084			10,096			10,056		
33	86,96	86,99	0,036	2,131	2,09	0,145	5,167	5,13	0,038	10,096	10,07	0,031	10,079	10,06	0,020
	87,03			2,213			5,091			10,035			10,07		
	86,98			1,931			5,136			10,066			10,041		
34	86,78	86,87	0,081	2,129	2,12	0,079	5,046	5,08	0,034	10,085	10,06	0,028	10,07	10,05	0,025
	86,91			2,191			5,111			10,029			10,046		
	86,93			2,034			5,096			10,057			10,021		
35	87,08	87,03	0,056	2,141	2,10	0,123	5,149	5,12	0,031	10,099	10,09	0,005	10,077	10,08	0,001
	87,04			2,195			5,09			10,089			10,079		

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Стандардна епрувета															
xx – недостапна мерка поради нецелосно исполнување на гравура															
Ред бр.	Должина I [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - мерно подрачје [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 1 [mm]	Просек	Ст. дев	Ширина - глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
	86,97			1,96			5,133			10,094			10,078		
36	86,98	87,00	0,035	2,151	2,10	0,145	5,087	5,11	0,027	10,094	10,09	0,005	10,071	10,07	0,005
	87,04			2,205			5,109			10,085			10,067		
	86,98			1,932			5,14			10,09			10,062		
37	86,94	86,99	0,042	2,141	2,13	0,082	5,106	5,10	0,016	10,085	10,10	0,010	10,065	10,06	0,005
	87,02			2,205			5,083			10,105			10,062		
	87			2,043			5,114			10,095			10,056		
38	87	87,02	0,021	2,141	2,10	0,102	5,143	5,10	0,044	10,095	10,08	0,011	10,065	10,06	0,008
	87,04			2,173			5,114			10,074			10,057		
	87,01			1,983			5,057			10,085			10,049		
39	86,98	86,98	0,050	2,156	2,10	0,142	5,074	5,09	0,014	10,083	10,08	0,006	10,055	10,05	0,010
	87,03			2,201			5,088			10,072			10,058		
	86,93			1,936			5,101			10,078			10,04		
40	86,83	86,91	0,074	2,134	2,09	0,145	5,094	5,10	0,011	10,082	10,07	0,012	10,058	10,05	0,013
	86,97			2,201			5,103			10,058			10,056		
	86,94			1,923			5,115			10,071			10,035		
41	86,86	86,92	0,049	2,185	2,13	0,094	5,308	5,19	0,103	10,085	10,07	0,019	10,054	10,05	0,007
	86,95			2,188			5,143			10,047			10,053		
	86,94			2,023			5,12			10,066			10,041		
42	87,01	86,93	0,093	2,127	2,08	0,138	5,052	5,08	0,032	10,079	10,07	0,013	10,051	10,04	0,015
	86,83			2,189			5,113			10,053			10,047		
	86,96			1,925			5,068			10,067			10,023		
43	86,82	86,84	0,057	2,127	2,11	0,081	5,02	5,07	0,045	10,078	10,06	0,017	10,049	10,03	0,020
	86,9			2,177			5,093			10,045			10,04		
	86,79			2,018			5,102			10,062			10,011		
44	86,91	86,94	0,026	2,154	2,09	0,159	5,119	5,10	0,017	10,091	10,09	0,006	10,055	10,05	0,008
	86,96			2,207			5,085			10,079			10,057		
	86,95			1,909			5,105			10,085			10,042		
45	86,91	86,88	0,026	2,145	2,13	0,092	5,109	5,11	0,003	10,094	10,08	0,013	10,011	10,02	0,012
	86,87			2,215			5,104			10,069			10,034		
	86,86			2,033			5,105			10,082			10,027		
46	86,95	86,96	0,036	2,185	2,12	0,141	5,107	5,09	0,025	10,088	10,08	0,011	10,049	10,04	0,008
	87			2,215			5,102			10,066			10,05		
	86,93			1,958			5,061			10,077			10,035		
47	87,07	87,06	0,036	2,154	2,14	0,098	5,051	5,07	0,051	10,072	10,07	0,002	10,023	10,02	0,002
	87,02			2,234			5,125			10,068			10,019		

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Стандардна епрувета															
xx – недостапна мерка поради нецелосно исполнување на гравура															
Ред бр.	Должина I [mm]	Просек	Ст. дев	Дебелина [mm]	Просек	Ст. дев	Широчина - мерно подрачје [mm]	Просек	Ст. дев	Широчина - глава 1 [mm]	Просек	Ст. дев	Широчина - глава 2 [mm]	Просек	Ст. дев
	87,09			2,039			5,027			10,07			10,021		
48	86,94	86,94	0,015	2,152	2,12	0,128	5,09	5,08	0,026	10,085	10,07	0,014	10,019	10,02	0,003
	86,95			2,224			5,106			10,058			10,017		
	86,92			1,975			5,056			10,072			10,022		
49	86,95	86,94	0,010	2,161	2,10	0,169	5,045	5,06	0,040	10,081	10,08	0,003	10,051	10,04	0,008
	86,93			2,237			5,105			10,076			10,045		
	86,94			1,913			5,029			10,079			10,035		
50	87,02	87,02	0,006	2,147	2,09	0,151	5,084	5,07	0,037	10,085	10,07	0,018	10,025	10,02	0,005
	87,01			2,202			5,033			10,05			10,017		
	87,02			1,918			5,105			10,068			10,015		

Табела 8.29: Сумарни резултати од мерењата на димензии на вбризаните модели со облик на заоблен трапез

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Заоблен трапез									
Примерок бр.	Ширина [mm]			Дебелина [mm]			Радиуси		
	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 [mm]	Мал радиус 2 [mm]
1	10,046	10,048	0,002	2,115	2,121	0,026	10,040	2,920	2,930
	10,05			2,099					
	10,048			2,149					
2	10,07	10,079	0,009	2,079	2,052	0,033	10,120	3,090	3,200
	10,088			2,016					
	10,079			2,062					
3	10,062	10,061	0,002	2,004	2,015	0,042	10,080	3,050	3,070
	10,059			1,980					
	10,061			2,062					
4	10,063	10,065	0,002	2,093	2,026	0,061	10,090	3,050	2,980
	10,065			1,975					
	10,066			2,009					
5	10,062	10,065	0,003	2,015	1,985	0,035	9,980	2,980	3,070
	10,067			1,947					
	10,065			1,994					
6	10,068	10,058	0,010	2,066	2,007	0,056	9,920	3,100	2,990
	10,049			1,955					
	10,056			2,001					
7	10,069	10,066	0,003	2,048	1,995	0,065	9,980	3,020	2,910
	10,063			1,922					
	10,066			2,015					
8	10,073	10,075	0,002	2,095	2,058	0,034	10,060	3,040	3,000
	10,076			2,027					
	10,075			2,051					
9	10,062	10,067	0,005	2,079	2,006	0,086	10,020	2,830	2,980
	10,071			1,911					
	10,067			2,027					
10	10,079	10,076	0,004	2,082	2,022	0,055	10,020	2,930	3,010
	10,072			1,974					
	10,076			2,011					
11	10,074	10,078	0,004	2,089	2,016	0,068	10,190	2,960	3,050
	10,082			1,954					
	10,078			2,005					
12	10,072	10,075	0,003	1,987	1,959	0,025	10,100	2,850	2,990
	10,077			1,951					
	10,075			1,940					
13	10,079	10,077	0,003	2,051	2,035	0,106	10,200	2,960	3,110
	10,074			1,922					
	10,077			2,132					
14	10,069	10,073	0,004	2,057	2,023	0,079	10,010	2,900	3,060
	10,076			1,933					
	10,073			2,079					
15	10,077	10,083	0,006	2,046	2,013	0,062	10,060	2,910	3,070
	10,088			2,051					
	10,083			1,942					
16	10,074	10,078	0,004	2,104	2,014	0,115	9,950	2,850	3,010
	10,081			2,054					
	10,078			1,884					
17	10,071	10,074	0,003	2,058	1,963	0,091	9,940	3,080	3,190
	10,077			1,877					
	10,074			1,954					
18	10,092	10,085	0,008	2,077	2,046	0,121	9,930	3,230	3,070
	10,077			1,913					

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Заоблен трапез									
Примерок бр.	Ширина [mm]			Дебелина [mm]			Радиуси		
	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 [mm]	Мал радиус 2 [mm]
	10,085			2,149					
19	10,071	10,076	0,005	2,055	1,985	0,127	10,050	3,020	3,030
	10,081			1,839					
	10,076			2,062					
	10,09			2,045					
20	10,078	10,084	0,006	1,910	1,976	0,068	10,020	2,930	3,000
	10,084			1,974					
	10,072			2,069					
21	10,078	10,075	0,003	1,873	1,952	0,103	10,050	3,050	3,040
	10,075			1,915					
	10,073			2,056					
22	10,07	10,075	0,006	1,926	1,989	0,065	10,010	3,030	2,900
	10,082			1,984					
	10,081			2,035					
23	10,086	10,085	0,004	1,953	2,007	0,047	9,990	3,010	2,980
	10,089			2,034					
	10,074			2,071					
24	10,069	10,073	0,003	1,955	2,018	0,059	10,040	2,920	2,930
	10,075			2,028					
	10,068			2,088					
25	10,075	10,072	0,004	1,937	1,999	0,079	10,000	2,970	2,920
	10,072			1,973					
	10,07			2,086					
26	10,092	10,081	0,011	2,024	2,016	0,074	10,010	3,010	2,970
	10,082			1,939					
	10,074			2,092					
27	10,082	10,078	0,004	1,939	2,015	0,077	9,990	2,870	2,880
	10,078			2,014					
	10,071			2,031					
28	10,079	10,075	0,004	1,901	1,962	0,065	10,040	2,940	2,940
	10,075			1,953					
	10,086			2,075					
29	10,075	10,081	0,006	1,944	1,995	0,070	10,040	2,980	2,970
	10,082			1,967					
	10,096			2,087					
30	10,089	10,093	0,004	1,964	1,996	0,080	9,930	3,030	2,960
	10,093			1,936					
	10,078			2,049					
31	10,089	10,084	0,006	1,964	1,968	0,079	10,050	3,200	3,090
	10,084			1,892					
	10,097			2,009					
32	10,09	10,094	0,004	1,991	1,970	0,052	9,960	3,060	3,120
	10,094			1,911					
	10,082			2,098					
33	10,079	10,081	0,002	2,063	2,015	0,114	10,050	3,020	2,970
	10,081			1,885					
	10,081			2,011					
34	10,075	10,078	0,003	1,902	1,965	0,056	10,090	3,190	3,090
	10,078			1,982					
	10,08			1,990					
35	10,092	10,086	0,006	1,957	1,952	0,041	10,010	3,100	2,990
	10,086			1,908					
	10,079			2,013					
36	10,091	10,085	0,006	2,002	2,021	0,025	10,020	2,840	2,810
	10,085			2,049					
	10,076			2,020					
37	10,094	10,085	0,009	1,961	1,975	0,040	10,130	3,040	3,060

Материјал на гравура: Rigid 10k (ознака: R); Облик на гравура: Заоблен трапез									
Примерок бр.	Ширина [mm]			Дебелина [mm]			Радиуси		
	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Измерени вредности	Просек	Ст. дев	Голем радиус [mm]	Мал радиус 1 [mm]	Мал радиус 2 [mm]
	10,085			1,944					
38	10,086	10,084	0,003	2,032	1,960	0,065	10,170	3,060	3,090
	10,081			1,907					
	10,084			1,941					
	10,085			2,012					
39	10,081	10,083	0,002	2,038	2,019	0,016	10,130	3,150	3,150
	10,083			2,008					
	10,08			2,035					
40	10,078	10,081	0,004	2,078	2,007	0,089	10,090	3,040	2,940
	10,085			1,907					
	10,087			2,022					
41	10,095	10,091	0,004	2,075	2,010	0,072	9,960	3,060	3,050
	10,091			1,932					
	10,096			2,000					
42	10,081	10,089	0,008	1,892	1,986	0,087	10,090	2,910	3,000
	10,089			2,065					
	10,081			2,066					
43	10,086	10,084	0,003	1,922	2,000	0,073	10,070	3,090	3,060
	10,084			2,011					
	10,09			2,047					
44	10,101	10,096	0,006	1,953	2,021	0,059	10,030	3,000	2,940
	10,096			2,062					
	10,083			2,086					
45	10,08	10,082	0,002	1,910	1,976	0,096	10,020	3,050	3,030
	10,082			1,933					
	10,082			2,053					
46	10,087	10,085	0,003	1,911	1,969	0,075	10,010	3,190	3,100
	10,085			1,942					
	10,082			2,049					
47	10,086	10,085	0,002	1,980	1,974	0,079	9,950	3,140	2,960
	10,086			1,892					
	10,131			2,126					
48	10,088	10,110	0,022	1,966	2,052	0,081	9,970	2,920	2,840
	10,11			2,065					
	10,092			2,088					
49	10,098	10,095	0,003	2,013	2,055	0,038	10,040	3,100	2,970
	10,095			2,064					
	10,108			2,055					
50	10,12	10,114	0,006	2,011	2,043	0,028	10,050	3,400	3,130
	10,114			2,063					