



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Марко М. Делић

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПРИМЕНЕ АДИТИВНО
ПРОИЗВЕДЕНОГ И ТОПОЛОШКИ
ОПТИМИЗОВАНОГ АЛАТА ЗА
САВИЈАЊЕ ЛИМА ПРАЋЕНО
ЕЛАСТИЧНОМ ПОВРАТНОШЋУ**

докторска дисертација

Крагујевац, 2025



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING

Marko M. Delić

**INVESTIGATION OF THE APPLICATION OF
AN ADDITIVELY MANUFACTURED AND
TOPOLOGICALLY OPTIMIZED DIE FOR
SHEET METAL BENDING FOLLOWED BY
ELASTIC RECOVERY**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2025

Аутор	
Име и презиме: Марко Делић	
Датум и место рођења: 29.01.1990., Крагујевац	
Садашње запослење: Асистент, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу	
Докторска дисертација	
Наслов: Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу	
Број страница: 259	
Број слика: 246	
Број библиографских података: 138	
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу	
Научна област (УДК): Машинско инжењерство	
Ментор: др Весна Мандић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу	
Број и датум одлуке Већа универзитета о прихватању теме докторске дисертације:	
IV-04-559/10, 10.07.2024.	

ЗАХВАЛНИЦА

Најискреније захваљујем свом ментору, проф. др Весни Мандић, на непроцењивој подршци, стручном вођству и стрпљењу током свих фаза израде ове дисертације. Њена посвећеност, знање и подстицаји били су кључни за мој академски развој.

Захваљујем и својим колегама и сарадницима са Факултета инжењерских наука на драгоценим саветима, дискусијама и помоћи током истраживачког рада. Посебно хвала проф. др Србиславу Александровићу који је својим знањем и саветима значајно помогао у реализацији експеримената.

Захваљујем компанији Елвод из Крагујевца на омогућавању приступа ресурсима, подацима и логистичкој подршци у реализацији студије случаја и валидацији методологије замене металних алата адитивно произведеним у индустријским условима која је предмет ове дисертације.

Највећу захвалност дугујем својој породици која ми је током израде дисертације пружала неизмерну подршку, разумевање и стрпљење у свим изазовима које је овај процес носио. Без њих израда ове дисертације не би била могућа те стога ову дисертацију посвећујем мојој породици.

*У Крагујевцу,
2025. године*

Марко Делић

Резиме

Израда алата за обликовање лима применом адитивних технологија добија све више на значају, не само у области науке и истраживања већ и у савременој индустрији а чија успешна примена захтева познавање различитих метода и техника. Применом полимерних адитивно произведених алата постиже се скраћење времена израде а у неким случајевима и смањење цене израде.

У овој докторској дисертацији разматрана је могућност коришћења адитивно произведених полимерних алата за савијање лима. С обзиром да алати током процеса обликовања трпе напрезања битан параметар су механичке карактеристике материјала. У првом делу дисертације анализиране су механичке карактеристике два полимерна материјала, ABS-а и Оникса. Утицај параметара *FDM* технологије на механичке карактеристике одређен је тестовима једноосног затезања и притискивања. На основу резултата експеримената за материјал алата изабран је *ABS* и дефинисани су оптимални параметри адитивне производње радних компоненти алата.

Због тога што полимерни материјали имају знатно слабије механичке карактеристике од метала при пројектовању процеса обликовања са полимерним алатима потребно је смањити оптерећење које алат трпи. Поред оптерећења проблем који постоји при обликовању лимова је еластична повратност. Дефинисање геометрије алата је урађено коришћењем методе коначних елемената да би проблеми превеликог оптерећења алата и појаве еластичне повратности били отклоњени. На основу резултата нумеричких експеримената редизајниране су радне компоненте алата за једноугаоно савијање уз компензацију угла еластичне повратности и утврђене границе деформационе силе за добијање дела од лима са прецизно дефинисаним углом савијања. Поред доказивања хипотезе да је могуће користити полимерне алате за обликовање челичног лима, следећи научни изазов је био показати да је тополошка оптимизација адитивно произведених алата оправдана и применљива. На основу нумеричких експеримената полимерни адитивно произведени алати су оптимизовани методом тополошке оптимизације узимајући у обзир правила конструисања за адитивну производњу (*DFAM - Design for additive manufacturing*).

Експерименти једноугаоног савијања лима са адитивно произведеним и тополошки оптимизованим алатима урађени су у лабораторијским и индустријским условима. У лабораторијским условима коришћена је савремена машина за испитивање материјала док је у индустријским условима кроз студију случаја коришћена апкант преса. После експерименталног дела алати и савијени делови су дигитализовани посредством *3D* скенера за прецизно мерење облика дела и угла савијања. Резултати експеримента су потврдили све полазне хипотезе, с обзиром да је добро поклапање угла савијања делова добијених нумеричком симулацијом, експериментима са металним и полимерним алатима, као и тополошки оптимизованих, а на крају и полимерних алата монтираних на индустријску апкант пресу. При томе су оптерећења на полимерним алатима била у дозвољеним границама без икаквих трајних пластичних деформација и површинских оштећења.

Кључне речи: адитивна производња, *FDM*, нумеричке симулације, еластична повратност, *3D* скенирање, тополошка оптимизација, *ABS*, Оникс

Abstract

The production of sheet metal forming dies using additive technologies is gaining increasing importance, not only in the field of science and research, but also in modern industry, and the successful application requires knowledge of various methods and techniques. The use of polymer additively manufactured dies reduces production time and, in some cases, reduces production costs.

This doctoral dissertation examines the possibility of using additively manufactured polymer dies for sheet metal bending. Since dies are subjected to stress during the forming process, an important parameter is the mechanical properties of the material. In the first part of the dissertation, the mechanical properties of two polymer materials, ABS and Onyx, were analyzed. The influence of FDM technology parameters on the mechanical properties was determined by uniaxial tensile and compression tests. Based on the results of the experiments, ABS was selected as the die material and the optimal parameters for additive manufacturing of the die components were defined.

Because polymer materials have significantly weaker mechanical properties than metals, when designing the forming process with polymer dies, it is necessary to reduce the load that the die undergoes. In addition to the load, an existing problem in sheet metal forming is elastic recovery. The definition of the die geometry was done using the finite element method in order to eliminate the problems of excessive die loading and the occurrence of elastic recovery. Based on the results of numerical experiments, the die components for free air bending were redesigned with compensation for the elastic recovery angle and the forming load limits were determined to obtain a sheet metal part with a precisely defined bending angle. In addition to proving the hypothesis that it is possible to use polymer dies for forming steel sheet metal, the next scientific challenge was to show that the topological optimization of additively manufactured dies is justified and applicable. Based on numerical experiments, polymer additively manufactured dies were optimized using the topological optimization method, taking into account the design rules for additive manufacturing (DFAM - Design for additive manufacturing).

Experiments on free air sheet metal bending with additively manufactured and topologically optimized dies were performed in laboratory and industrial conditions. In laboratory conditions, a modern material testing machine was used, while in industrial conditions, a press brake was used through a case study. After the experimental part, the dies and bent parts were digitized using a 3D scanner for precise measurement of the part shape and bending angle. The experimental results confirmed all initial hypotheses, given that the bending angle of the sheet metal parts obtained by numerical simulation, experiments with metal and polymer dies, as well as topologically optimized, and finally polymer dies mounted on an industrial press brake was in good agreement. In this case, the loads on the polymer dies were within permissible limits without any permanent plastic strain and surface damage.

Keywords: additive manufacturing, FDM, numerical simulations, elastic recovery, 3D scanning, topology optimization, ABS, Onyx

Садржај

1. Увод.....	1
2. Преглед истраживања	5
2.1 Испитивање механичких карактеристика 3D штампаних полимерних материјала	5
2.2 Примена адитивне производње у процесима обраде деформисањем	14
2.3 Анализа процеса обраде лима методом коначних елемената	19
2.4 Оптичко 3D скенирање за контролу делова и алата	22
2.5 Тополошка оптимизација	24
3. Еластична повратност код угаоног савијања лимова и принципи њене компензације уз примену напредних технологија виртуелног инжењеринга	29
3.1 Угаоно савијање лима	29
3.2 Процена еластичне повратности и методе њене компензације	42
3.3 Примена нумеричких метода у процени еластичне повратности	50
3.3.1 Метода коначних елемената	51
3.3.2 Солвери уграђени у <i>Simufact.forming</i>	63
3.3.3 Коришћени коначни елементи у софтверу <i>Simufact.forming</i>	67
4. Принципи и примена адитивне производње и тополошке оптимизације у изради компоненти алата.....	69
4.1 Основе адитивних технологија	69
4.1.1 Технологије адитивне производње.....	71
4.1.2 Системи за FDM адитивну производњу.....	78
4.1.3 Преглед материјала за адитивну производњу	79
4.1.4 Технике постпроцесирања.....	83
4.2 Пројектовање за адитивну производњу	85
4.3 Примена адитивних технологија за брзу израду алата.....	88
4.4 Тополошка оптимизација	92
4.4.1 Принципи тополошке оптимизације	92
4.4.2 Методе тополошке оптимизације	98
4.4.3 Примери тополошке оптимизације компоненти алата	102
5. Испитивање карактеристика полимерних материјала адитивно третираних применом FDM технологије.....	105
5.1 Избор материјала и АП технологије	105
5.2 Стандарди за испитивање полимерних материјала	109
5.3 Припрема узорака и експериментална опрема.....	110
5.4 Избор утицајних параметара адитивне производње.....	113

5.4.1 Тумачење утицајних параметара	114
5.5 План експерименталних истраживања.....	119
5.5.1 План експеримената за испитивање узорака од ABS-а (M1)	119
5.5.2 План експеримената за испитивање узорака од Оникса (M2).....	121
5.6 Резултати експеримената.....	124
5.6.1 Резултати M1 експеримената - испитивање узорака од ABS-а.....	124
5.6.2 Експеримент M2 - испитивање узорака од Оникса.....	137
5.6.3 Експеримент M3 - испитивање узорака од Оникса ојачаног стакленим влакнима – испитивање затезањем	147
5.7 Упоредна анализа експерименталних резултата.....	150
5.7.1 Анализа резултата експеримента M1	150
5.7.2 Анализа резултата експеримента M2	154
5.7.3 Анализа резултата експеримента M3	157
5.7.4 Закључци анализе.....	158
5.7.5 Статистичка анализа резултата	160
6. Експериментално-нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања лима за процену еластичне повратности	166
6.1 Испитивање карактеристика материјала лима тестом затезања и одређивање криве течења	166
6.2 Модел једноугаоног савијања лима са приказом алата	171
6.2.1 Конструкција алата	172
6.3 Експерименти једноугаоног савијања лима	178
6.3.1 3D скенирање савијених делова.....	179
6.4 Нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања лима	181
6.4.1 2D нумеричке симулације са крутим алатима.....	182
6.4.2 2D нумеричка симулација са деформабилним алатима	183
6.4.3 3D нумеричка симулација са деформабилним алатима	186
6.5 Процена компензације угла савијања методом коначних елемената	189
6.6 Експериментална верификација нумеричког модела за компензацију угла савијања	191
7. Експериментално-нумеричко истраживање процеса једноугаоног савијања лима применом адитивно произведених и тополошки оптимизованих компоненти алата.....	195
7.1 Нумерички експерименти једноугаоног савијања лима са адитивно произведеним алатима	195
7.1.1 Улазни подаци за нумеричку анализу.....	195
7.1.2 Резултати нумеричких експеримената са алатом од ABS-а.....	197
7.1.3 Резултати нумеричких експеримената са алатом од Оникса.....	201

7.2 Тополошка оптимизација радних компоненти алата за једноугаоно савијање на основу нумеричког модела.....	205
7.2.1 Дефинисање оптерећења алата.....	206
7.2.2 Параметри тополошке оптимизације.....	207
7.2.3 Тополошка оптимизација обликача.....	209
7.2.4 Тополошка оптимизација матрице.....	211
7.3 Адитивна производња радних компоненти алата за једноугаоно савијање лима ...	213
7.3.1 Адитивна производња компоненти алата од ABS-а.....	213
7.3.2 Адитивна производња компоненти алата од Оникса ојачаног стакленим влакнима.....	215
7.3.3 Адитивна производња тополошки оптимизованих компоненти од ABS-а.....	216
7.3.4 Провера тачности адитивно произведених алата применом 3D скенера.....	217
7.4 Експерименти једноугаоног савијања лима применом адитивно произведених алата	217
7.4.1 Резултати експеримената са радним елементима алата од ABS-а.....	217
7.4.2 Резултати експеримената са алатом од Оникса ојачаног стакленим влакнима	220
7.4.3 Експериментално-нумеричка анализа процеса једноугаоног савијања лима применом тополошки оптимизованих радних делова алата	222
7.4.4 Упоредна анализа примењених алата за једноугаоно савијање лима.....	227
8. Студија случаја: примена адитивно произведеног и тополошки оптимизованог полимерног алата у индустрији	231
8.1 Одређивање криве течења материјала DX51DZ200	232
8.2 Конструкција алата	233
8.3 Анализа процеса применом методе коначних елемената	234
8.4 Тополошка оптимизација алата	238
8.5 Адитивна производња радних елемената алата	241
8.6 Савијање профила носача на апкант преси	242
8.7 Контрола квалитета савијених носача на адитивно произведеним алатима.....	244
9. Закључак.....	246
Литература	251

Списак слика

Слика 2.1	Изглед испитиваних узорака
Слика 2.2	Дијаграм рибље кости са утицајним параметрима
Слика 2.3	Положај почетне тачке ојачавајућих влакана: а) ван зоне б) на средини и в) у зони затезања
Слика 2.4	Резултати за узорке од белог <i>PLA</i> при различитим температурама млазнице: а) напон на граници течења и б) степен кристалности
Слика 2.5	Минетолин тест: а) <i>CAD</i> модел дела б) изглед детаља дела израђеног на <i>Ultimaker 2</i> в) изглед детаља дела израђеног на <i>EOS formiga velosis</i> г) изглед детаља дела израђеног на <i>Arburg freeformer</i> и д) поређење вредности грешака
Слика 2.6	Геометријски параметри штампања: а) визуелни приказ и б) њихов утицај на хабање
Слика 2.7	Дијаграми затезања при различитим температурама млазнице за узорке од материјала: а) <i>PLA</i> б) <i>PETG</i> в) <i>ABS</i>
Слика 2.8	Испитивање узорка притискивањем при деформацији од 30%: а) Т-8-0.645 б) Т-8-1.29 в) Т-8-1.935
Слика 2.9	Делови израђени од термопластике (<i>FDM</i> технологија): а) алати за дубоко извлачење и део од лима и б) узорци за испитивањ епритискивањем (<i>ASTM D695</i>)
Слика 2.10	Алат за савијање на апкант преси: а) <i>CAD</i> модел алата б) алат на радном столу в) приказ монтираног алата и г) алат и савијени делови лима
Слика 2.11	Алат за <i>V</i> савијање: а) монтиран хибридни алат б) метална основа и в) <i>3D</i> штампани полимерни уметак
Слика 2.12	Резултати: а) за вредност угла еластичног исправљања (плави правоугаоник - A1100-H14, зелени - A5052-H32 и наранџасти – челик затезне чврстоће 440 МПа и б) стања површине радног комада за различите материјале алата
Слика 2.13	Полимерни алати: а) процес ојачања током процеса штампања и б) после завршетка штампања
Слика 2.14	Деформације делова од <i>DC04</i> и <i>S355MC</i>
Слика 2.15	Алат за савијање: а) припремљен за експеримент и б) његов нумерички модел
Слика 2.16	Разматрани елементи
Слика 2.17	Шема теста савијања
Слика 2.18	Провера тачности делова добијених дубоким извлачењем
Слика 2.19	Коришћени уређај: а) део система за депоновање материјала и б) део за скенирање
Слика 2.20	Цилиндрични део направљен од <i>Ti6Al4V</i> : а) димензије после израде и б) одступање његових димензија од <i>CAD</i> модела
Слика 2.21	Тополошки оптимизован алат са коефицијентом: а) 0,8 и б) 0,7
Слика 2.22	Тополошки оптимизован држач лима: а) током оптимизације у софтверу и б) после израде
Слика 2.23	Испитани делови: а) пун б) структура са штаповима в) структура променљиве дебљине и г) микроструктура
Слика 2.24	Греда оптимизована коришћењем: а) првог приступа и б) другог приступа
Слика 2.25	Ток процеса оптимизације танкозидних структура
Слика 3.1	Основни начини угаоног савијања

Слика 3.2	Различите могућности односа полупречника заобљења обликача и полупречника савијања: а) $r_p < r_u$ б) $r_p = r_u$ в) $r_p > r_u$
Слика 3.3	Могући односи угла обликача и матрице: а) $\alpha_s = \alpha_m$ б) $\alpha_s < \alpha_m$
Слика 3.4	Положај неутралног слоја и деформационе зоне током савијања
Слика 3.5	Једноугаоно савијање
Слика 3.6	Угао савијања и угао савијене зоне
Слика 3.7	Елементарни исечак
Слика 3.8	Расподела нормалних напона по дебљини савијеног лима: а) чисто еластично савијање б) еластично пластично савијање в) чисто пластично савијање г) еластично-пластично савијање са ојачањем д) чисто пластично савијање са ојачањем
Слика 3.9	Шема деловања напона у савијеној зони
Слика 3.10	Шема деловања сила при савијању у затвореном алату
Слика 3.11	Сила савијања при једноугаоном савијању
Слика 3.12	Димензије конструктивних елемената алата за једноугаоно савијање
Слика 3.13	Промена угла савијања због еластичне повратности
Слика 3.14	Дијаграм за читавање фактора еластичног исправљања K
Слика 3.15	Дијаграми за одређивање угла повратности: а) за нискоугљеничне челике ($\check{C}0146$) б) за угљеничне челике са затезном чврстоћом 400-600 МПа (пример $\check{C}0460$)
Слика 3.16	Метод компензације угла при двоугаоном савијању
Слика 3.17	Алат за једноугаоно савијање са једнаким крацима
Слика 3.18	Универзални алати за савијање
Слика 3.19	Одређивање позиција тачака при компензацији
Слика 3.20	Конструкција компензационе криве
Слика 3.21	Домен еластичног континуума
Слика 3.22	Коначни елемент са K спољашњих и R унутрашњих чворова
Слика 3.23	Коначни елемент
Слика 3.24	Локални и глобални координатни систем
Слика 3.25	Поасонов ефекат
Слика 3.26	Зависност силе од померања: а) линеарна зависност и б) нелинеарна зависност
Слика 3.27	Шема образовања матрице крутости
Слика 3.28	Коначни елементи: а) тип елемента 11 б) тип елемента 7 в) тип елемента 157 г) тип елемента 185 д) тип елемента 134
Слика 4.1	Ланац процеса адитивне производње
Слика 4.2	Шематски приказ фотополимеризације
Слика 4.3	Шематски приказ рада технологије директне 3D штампе
Слика 4.4	Шематски приказ рада технологије прашкастог супстрата
Слика 4.5	Шема FDM штампача
Слика 4.6	Депоноване материјала са циљем: а) веће прецизности и б) бољих механичких карактеристика
Слика 4.7	Шематски приказ израде дела технологијом фузије прашкастог супстрата
Слика 4.8	Шематски приказ технологије ламинације фолија
Слика 4.9	Шематски приказ DED технологије
Слика 4.10	Шема FDM процеса
Слика 4.11	Типови ојачања влакнима
Слика 4.12	Настанак лома, ткз. крокодилске чељусти
Слика 4.13	Делови направљени са решеткастом структуром

Слика 4.14	Одређивање могућег угла препуста
Слика 4.15	Модел лопатице (лево), калупи (у средини) и изливени модели од воска (десно)
Слика 4.16	Поступак <i>3D Keltool</i>
Слика 4.17	Конструисан алат (лево) и израда алата на уређају <i>Markforged Onyx Pro</i>
Слика 4.18	Ливење пластике (лево), део у алату (середина) и готов део (десно)
Слика 4.19	Алат направљен <i>AIM</i> поступком
Слика 4.20	Пример тополошке оптимизације: а) део са оптерећењима и ослонцима б) део након тополошке оптимизације
Слика 4.21	Примери употребе <i>ТО</i> у индустрији: а) носач носа авиона б) пилон авиона
Слика 4.22	Примери тополошки оптимизованих делова који су направљени <i>АП</i> технологијом: а) носач каблова б) носач антене
Слика 4.23	Пример тополошке оптимизације
Слика 4.24	Оптимизација носача
Слика 4.25	Примери тополошки оптимизованих делова: а) тополошки оптимизована греда са шестоугаоном испуном, б) оптимизован носач мотора са решеткастом испуном и в) оптимизована структура моста
Слика 4.26	Тополошка оптимизација дела: а) без ограничења максималног распона б) са ограничењем максималног распона
Слика 4.27	Пример тополошке оптимизације: а) без ограничења повезаности б) са ограничењима повезаности и в) <i>3D</i> штампани модел
Слика 4.28	Иновативне потпорне структуре: а) тополошки оптимизоване б) потпорне структуре у облику дрвета
Слика 4.29	Облик оптимизованог дела: а) који захтева потпорну структуру и б) који не захтева (<i>self-support</i>)
Слика 4.30	Концепције тополошки оптимизованог алата: а) у зависности од ограничења запремине и б) зависност деформације алата за сваку од концепција
Слика 4.31	Тополошки оптимизовани алат за двоугаоно савијање
Слика 4.32	Тополошки оптимизован алат за просецање
Слика 4.33	Део корачног алата направљен применом адитивне технологије
Слика 5.1	Молекуларна структура <i>ABS</i> -а
Слика 5.2	Упоредне карактеристике материјала који се користе у <i>FDM</i> технологији
Слика 5.3	Упоредни дијаграми напон-деформација за ојачавајућа влакна
Слика 5.4	Облик и димензије узорака за: а) тест затезања <i>T</i> б) тест притискивања са цилиндричним узорком <i>C1</i> в) тест притискивања са узорком у облику квадрата <i>C2</i>
Слика 5.5	Коришћени <i>3D</i> штампачи: а) <i>Makerbot replicator 2X</i> и б) <i>Markforged Onyx Pro</i>
Слика 5.6	Универзална машина за испитивање <i>Zwick/Roell Z100</i>
Слика 5.7	Узорци на радном столу штампача направљени од: а) <i>ABS</i> -а и б) <i>Оникса</i>
Слика 5.8	Узорци од <i>ABS</i> -а за: а) тест затезања б) тест притискивања и в) током мерења масе узорка пре тестирања
Слика 5.9	Узорци на машини непосредно после теста затезања од материјала: а) <i>ABS</i> и б) <i>Оникс</i>
Слика 5.10	Параметар угао штампања: а) <i>U1</i> б) <i>U2</i> в) <i>U3</i> г) <i>U4</i>
Слика 5.11	Положај узорака при штампању
Слика 5.12	Коришћени облици испуне: а) троугаони б) квадратни в) шестоугаони г) таласести и д) потпуна испуна

Слика 5.13	Шестоугаони облик испуне са густином испуне: а) 20% б) 60%
Слика 5.14	Дебљина слоја
Слика 5.15	Ојачање стакленим влакнима: а) 2 концентрична прстена ($R2Lx$) б) 4 концентрична прстена ($R4Lx$) в) 3D приказ ојачаних слојева ($R2L2$) г) 3D приказ ојачаних слојева ($R4L6$)
Слика 5.16	Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом $U1$ ($0^\circ/90^\circ$) за дебљину слоја 0,1 mm (M1-1), 0,2 mm (M1-2) и 0,3 mm (M1-3)
Слика 5.17	Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом $U3$ ($30^\circ/-60^\circ$) за дебљину слоја 0,1 mm (M1 - 4), 0,2 mm (M1 - 5) и 0,3 mm (M1 - 6)
Слика 5.18	Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом $U4$ ($45^\circ/-45^\circ$) за дебљину слоја 0,1 mm (M1 - 7), 0,2 mm (M1 - 8) и 0,3 mm (M1 - 9)
Слика 5.19	Дијаграми затезања за узорке израђене различитим брзинама штампања 20 mm/s (M1 – 10), 55 mm/s (M1 – 11) и 90 mm/s (M1 – 12)
Слика 5.20	Дијаграми затезања за узорке са квадратном испуном са густином испуне 10% (M1 – 13), 40% (M1 – 14) и 70% (M1 – 15)
Слика 5.21	Дијаграми затезања за узорке са шестоугаоном испуном са густином испуне 10% (M1 - 16), 40% (M1 - 17) и 70% (M1 - 18)
Слика 5.22	Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O1I5P4S1 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 19) и 90 mm/s (M1 - 20)
Слика 5.23	Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O1I5P4S2 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 21) и 90 mm/s (M1 - 22)
Слика 5.24	Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S1 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 23) и 90 mm/s (M1 - 24)
Слика 5.25	Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S2 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 25) и 90 mm/s (M1 - 26)
Слика 5.26	Дијаграми притискивања за узорке са квадратном испуном са густином испуне 10% (M1 - 27), 40% (M1 - 28) и 70% (M1 - 29)
Слика 5.27	Дијаграми притискивања за шестоугаони облик испуне са густином испуне 10% (M1 - 30), 40% (M1 - 31) и 70% (M1 - 32)
Слика 5.28	Дијаграми затезања за узорке са углом штампања $0^\circ/90^\circ$ (M2 - 1), $15^\circ/-75^\circ$ (M2 - 2), $30^\circ/-60^\circ$ (M2 - 3) и $45^\circ/-45^\circ$ (M2 - 4)
Слика 5.29	Узорци од Оникса: а) после разарања на машини и б) после завршетка испитивања
Слика 5.30	Дијаграми затезања за троугаону испуну са минималном (M2 - 5) и препорученом густином испуне (M2 - 6)
Слика 5.31	5.31 Дијаграми затезања узорака са квадратним обликом испуне, са минималном (M2 - 7) и препорученом (M2 - 8) густином испуне
Слика 5.32	Дијаграми затезања за шестоугаони облик испуне са минималном (M2 - 9) и препорученом густином испуне (M2 - 10)
Слика 5.33	Дијаграми затезања за таласаста облик испуне са минималном (M2 - 11) и препорученом густином испуне (M2 - 12)
Слика 5.34	Дијаграми притискивања за узорке са троугаоном испуном за минималну (M2 - 13), препоручену (M2 - 14) и максималну (M2 - 15) густину испуне
Слика 5.35	Дијаграми притискивања за узорке са шестоугаоном испуном за минималну (M2 - 16), препоручену (M2 - 17) и максималну густину испуне (M2 - 18)
Слика 5.36	Дијаграми притискивања за узорке са шестоугаоном испуном за минималну (M2 - 19), препоручену (M2 - 20) и максималну густину испуне (M2 - 21)
Слика 5.37	Дијаграм притискивања за пун цилиндрични узорак

Слика 5.38	Дијаграми затезања за узорке са два концентрична прстена и 2 (МЗ - 1), 4 (МЗ - 2) и 6 (МЗ - 3) слојева ојачаних стакленим влакнима
Слика 5.39	Дијаграми затезања за узорке са четири концентрична прстена и 2 (МЗ - 4), 4 (МЗ - 5) и 6 (МЗ - 6) слојева ојачаних стакленим влакнима
Слика 5.40	Вредност затезне чврстоће у зависности од вредности угла штампања
Слика 5.41	Упоредни приказ средње вредности затезне чврстоће у зависности од: а) угла штампања б) дебљине слоја штампања
Слика 5.42	Зависност од брзине штампања: а) затезне чврстоће и б) издужења
Слика 5.43	Вредности а) напона на граници течења и б) затезне чврстоће - у зависности од облика и густине испуне
Слика 5.44	Вредност за различите облике испуне и различите густине испуне: а) издужења и б) односа S/W
Слика 5.45	Вредност напона у зависности од дебљине слоја и брзине штампања за: а) положај штампања О1 (положен) и б) положај штампања О2 (усправан)
Слика 5.46	Вредност: а) напона и б) односа затезне чврстоће и масе у зависности од густине и облика испуне
Слика 5.47	Вредности: а) напона течења и б) затезне чврстоће за М2 експерименте и промену угла штампања
Слика 5.48	Вредност затезне чврстоће у зависности од облика и процента испуне
Слика 5.49	Однос S/W за различите облике и густине испуне
Слика 5.50	Вредност напона у зависности од облика и густине испуне
Слика 5.51	Вредност односа S/W у зависности од облика и густине испуне
Слика 5.52	Приказ средњих вредности напона (R_p , R_m) у зависности од броја ојачаних слојева: а) са два концентрична прстена и б) са четири концентрична прстена
Слика 5.53	Утицај удела ојачавајућих стаклених влакана на механичке карактеристике Оникса
Слика 5.54	Интерактивни приказ вредности одзива S/N из софтвера <i>Minitab</i>
Слика 5.55	Припремљени узорци: а) цела серија б) означени узорци исте серије
Слика 5.56	Вредности S/N одзива у зависности од фактора и нивоа
Слика 5.57	Вредности S/N одзива приказане са интерактивним утицајем параметара
Слика 6.1	Узорак од лима: а) цртеж узорка б) правци исецања узорака и в) узорци спремни за испитивање
Слика 6.2	Машина за испитивање (лево) и узорак са екстензометром (десно)
Слика 6.3	Дијаграми затезања за челик DC04 (Č0148)
Слика 6.4	Узорци припремљени за одређивање r фактора
Слика 6.5	Крива ојачања и аналитичка апроксимација за челик DC04 (Č0148)
Слика 6.6	Димензије савијеног дела
Слика 6.7	Склоп алата за једноугаоно савијање: а) шема алата са набројаним позицијама и б) CAD модел алата
Слика 6.8	Горња и доња плоча алата
Слика 6.9	Носач обликача (лево) и носач матрице (десно)
Слика 6.10	Обликач
Слика 6.11	Матрица
Слика 6.12	Стуб за вођење
Слика 6.13	Чаура за вођење
Слика 6.14	Горњи подсклоп алата
Слика 6.15	Доњи подсклоп алата

Слика 6.16	Мултифункционални алат за савијање монтиран на машину <i>Zwick/Roell Z100</i>
Слика 6.17	3D скенер <i>David SLS-2</i>
Слика 6.18	Скенирање савијеног дела од лима
Слика 6.19	Мерење угла савијања на основу облака тачака добијених 3D скенирањем
Слика 6.20	Нумеричка симулација процеса савијања: а) модел процеса и б) ефективна пластична деформација на лиму
Слика 6.21	Дефинисање правца ваљања
Слика 6.22	Дијаграми деформациона сила – радни ход добијени експериментално и нумерички са ограничењем деформационе силе: а) 600N б) 1000N в) 1500N г) 2000N
Слика 6.23	Уситњена мрежа (Refinement boxes) на: а) обликачу и б) матрици
Слика 6.24	Дијаграм деформациона сила – радни ход – симулација са деформабилним алатима
Слика 6.25	Дистрибуција резултата на матрици: а) ефективни напон б) контактни притисак в) еластична деформација
Слика 6.26	Дистрибуција резултата на обликачу: а) ефективни напон б) контактни притисак в) еластична деформација
Слика 6.27	Дијаграм деформациона сила – радни ход – 3D симулација са деформабилним алатима
Слика 6.28	Поређење вредности угла савијања дела након растеређења у експериментима и нумеричкој 3D симулацији при различитим максималним силама
Слика 6.29	Дистрибуција ефективног напона у 3D симулацији са деформабилним алатима на: а) обликачу и б) матрици
Слика 6.30	Димензије: а) матрице и б) обликача
Слика 6.31	Мерење угла савијања на виртелном обратку у софтверу <i>Geomagic design X</i>
Слика 6.32	Упоредни дијаграми деформациона сила – ход добијени у нумеричким експериментима (конфигурације 2.1 и 2.2)
Слика 6.33	Положај радних елемената алата при достизању силе од 600 N
Слика 6.34	Дијаграми сила – ход настали услед трења између вођице и чауре
Слика 6.35	Дијаграм деформациона сила - радни ход за савијање челичним алатом
Слика 6.36	Приказ одступања вредности угла у односу на нумеричку симулацију
Слика 6.37	Упоредни дијаграм деформациона сила – радни ход добијен експериментално и нумерички
Слика 7.1	Крива течења узорака израђених од ABS-а
Слика 7.2	Крива течења узорака израђених од Оникса
Слика 7.3	Савијање лима алатима од ABS-а: а) модел процеса б) ефективна пластична деформација в) ефективни напон и г) увећана зона савијања лима
Слика 7.4	Деформације на обликачу од ABS-а: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација
Слика 7.5	Напрезања на обликачу од ABS-а: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон
Слика 7.6	Дистрибуција деформација у матрици од ABS-а: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична

	деформација г) еластична деформација
Слика 7.7	Напрезања на матрици од ABS-а: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон
Слика 7.8	Резултати нумеричке симулације процеса савијања алатима од Оникса: а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон
Слика 7.9	Дистрибуција деформација у обликачу од Оникса а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација
Слика 7.10	Напрезања на обликачу: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон
Слика 7.11	Дистрибуција деформација у матрици: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација
Слика 7.12	Напрезања на матрици: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон
Слика 7.13	Методологија тополошке оптимизације алата
Слика 7.14	Контактни притисци на: а) обликачу и б) матрици
Слика 7.15	Вектор контактеног притиска на: а) обликачу б) матрици
Слика 7.16	Дефинисање граничних услова на обликачу (лево) и оптерећења (десно)
Слика 7.17	Резултат тополошке оптимизације обликача за различите вредности ограничења запремине: а) 0,3 б) 0,4 в) 0,5
Слика 7.18	Тополошки оптимизован обликач са додатком за монтирање у горњу плочу
Слика 7.19	Ограничене и оптерећене површине на матрици
Слика 7.20	Мрежа коначних елемената на матрици у софтверу <i>nTopology</i> (лево) и непокретни и оптерећени чворови (десно)
Слика 7.21	Силе које делују на матрицу
Слика 7.22	Тополошки оптимизована матрица
Слика 7.23	Матрица и обликач приказани у софтверу <i>Makerware</i>
Слика 7.24	Матрица и обликач направљени од ABS-а
Слика 7.25	Положај обликача и матрице на радном столу штампача <i>Markforged Onyx Pro</i> у софтверу <i>Eiger</i>
Слика 7.26	Алати од Оникса са приказом ојачаних слојева у софтверу <i>Eiger</i>
Слика 7.27	Тополошки оптимизовани радни елементи алата
Слика 7.28	Упоређење CAD модела алата и облака тачака добијеног 3D скенирањем за: а) матрицу од ABS-а б) обликач од ABS-а в) матрицу од Оникса ојачану стакленим влакнима и г) обликач од Оникса ојачан стакленим влакнима
Слика 7.29	Алат од ABS-а на почетку и током процеса савијања
Слика 7.30	Дијаграми деформациона сила – радни ход у процесу једноугаоног савијања у алату са радним компонентама адитивно произведеним од ABS-а
Слика 7.31	Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход у процесима једноугаоног савијања лима применом металних и адитивно произведених алата од ABS-а
Слика 7.32	Поређење добијених вредности угла
Слика 7.33	Алат од Оникса
Слика 7.34	Дијаграми деформациона сила – радни ход за експеримент савијања са алатом од Оникса

Слика 7.35	Упоредни дијаграми деформационе силе– радни ход за савијање алатом од челика и алатом од Оникса
Слика 7.36	Поређење добијених вредности углова (алати од челика и Оникса)
Слика 7.37	Мрежа коначних елемената на обликачу и матрици
Слика 7.38	Припремљени нумерички модел процеса (лево) и модел на крају симулације обликовања (десно)
Слика 7.39	Дистрибуција резултата на обликачу: а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон
Слика 7.40	Дистрибуција резултата на матрици а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон
Слика 7.41	Изглед тополошки оптимизованих радних елемената алата од ABS-а после монтаже
Слика 7.42	Процес савијања лима коришћењем тополошки оптимизованог алата адитивно произведеног од ABS-а
Слика 7.43	Дијаграми деформациона сила – радни ход за савијање тополошки оптимизованим алатом од ABS-а
Слика 7.44	Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход процесима једноугаоног савијања лима применом алата од различитих материјала
Слика 7.45	Коришћени радни делови алата за једноугаоно савијање лима: а) челични б) полимерни – ABS в) полимерни – Оникс г) тополошки оптимизован алат
Слика 7.46	Упоређење средњих вредности измерених углова савијања лима
Слика 7.47	Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход добијени коришћењем алата од различитих материјала (челик, ABS, Оникс, тополошки оптимизован)
Слика 7.48	Упоредни дијаграми деформационе силе добијени нумеричком симулацијом са деформабилним алатима од различитих материјала
Слика 8.1	Цртеж носача
Слика 8.2	Дијаграм затезања материјала <i>DX51DZ200</i>
Слика 8.3	Крива течења материјала <i>DX51DZ200</i>
Слика 8.4	Цртежи радних елемената алата за савијање на апкант преси: а) матрица, б) обликач за прву операцију и в) обликач за другу операцију
Слика 8.5	Нумерички модели обратка у операцијама савијања профила од лима за израду носача: а) прва б) друга в) трећа и г) четврта операција
Слика 8.6	Мерење виртуелног обратка у софтверу <i>Geomagic design X</i>
Слика 8.7	Резултати нумеричке симулације за савијени део: а) ефективна пластична деформација дела и б) ефективни напон
Слика 8.8	Резултати нумеричке симулације: а) ефективни напон на делу матрице за савијање радијуса б) ефективни напон на обликачу за радијус в) ефективни напон на делу матрице за савијање под углом од 90° г) ефективни напон на обликачу за савијање под углом од 90° д) увећан врх обликача за савијање под углом од 90°
Слика 8.9	Дијаграми деформациона сила – радни ход за савијање на апкант преси добијени нумеричким симулацијама
Слика 8.10	Дефинисање ограничења на матрици: а) ограничени и оптерећени чворови б) стране неопходне за монтажу алата в) деловање сила на делу матрице за савијање радијуса и г) деловање сила на делу матрице за савијање до правог угла
Слика 8.11	Вектор контактеног притиска: а) у тренутку највећег оптерећења матрице на делу за савијање радијуса и б) на делу за савијање под правим углом

Слика 8.12	Матрица: а) тополошки оптимизирана и б) тополошки оптимизирана матрица после постпроцесирања
Слика 8.13	Адитивна производња радних компоненти алата за савијање на апкант преси: а) обликача б) матрице в) тополошки оптимизоване матрице и г) алати након постпроцесирања
Слика 8.14	Монтирање алата на радни сто апкант пресе
Слика 8.15	Савијање радијуса (прва и друга операција) са: а) оригиналном матрицом и б) са тополошки оптимизованом матрицом
Слика 8.16	Савијање лима (трећа и четврта операција) на: а) матрици оригиналне конструкције и б) тополошки оптимизованој матрици
Слика 8.17	Делови после савијања: а) обе серије експеримената б) мерење димензија помичним мерилом в) мерење угла коришћењем механичког угломера и г) контрола на 3D скенеру <i>Matter and form V1</i>
Слика 8.18	Приказ одступања између <i>CAD</i> модела носача и облака тачака добијеног скенирањем

Списак табела

Табела 3.1	Препоруке за фактор c
Табела 3.2	Препоруке за дефинисање геометријских вредности
Табела 3.3	Препоручене вредности полупречника заобљења матрице и дужине b на матрици
Табела 3.4	Дозвољена одступања угла савијања
Табела 3.5	Дозвољена одступања полупречника савијања
Табела 3.6	Величина угла еластичне повратности
Табела 4.1	Утицајни параметри у FDM штампи
Табела 4.2	Утицајни фактори на процес депоновања материјала
Табела 4.3	Предности и мане метода адитивне производње
Табела 4.4	Материјали у адитивној производњи
Табела 4.5	Особине материјала који се користе у FDM технологији
Табела 4.6	Стандарди за испитивање карактеристика полимерних материјала (користе се и за АП материјале)
Табела 4.7	Храпавост површина делова у зависности од примењене АМ технологије
Табела 4.8	Правила за конструисање делова за адитивну производњу ($DFAM$)
Табела 4.9	Класификација поступака адитивне производње алата
Табела 5.1	Карактеристике материјала ABS
Табела 5.2	Карактеристике материјала Оникс и стаклених влакана
Табела 5.3	Карактеристике коришћених $3D$ штампача
Табела 5.4	Карактеристике машине $Zwick/Roell Z100$
Табела 5.5	Утицајни параметри адитивне FDM производње
Табела 5.6	План М1 експеримената - одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја – испитивање затезањем
Табела 5.7	План М1 експеримената - одређивање утицаја брзине штампања – испитивање затезањем
Табела 5.8	План М1 експеримената - одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање затезањем
Табела 5.9	План М1 експеримената - одређивање утицаја положаја, дебљине слоја и брзине штампања – испитивање притискивањем
Табела 5.10	План М1 експеримената - одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање притискивањем
Табела 5.11	План М2 експеримената – одређивање утицаја угла штампања
Табела 5.12	План М2 експеримената – одређивање утицаја облика и густине испуне – тест затезања
Табела 5.13	План М2 експеримената – одређивање утицаја облика и густине испуне на притисне карактеристике – тест притискивања
Табела 5.14	План М3 експеримената – одређивање утицаја концентричним ојачањем стакленим влакнима – тест затезања
Табела 5.15	Резултати М1 експеримената за угао штампања $U1$
Табела 5.16	Резултати М1 експеримената за угао штампања $U3$
Табела 5.17	Резултати М1 експеримената за угао штампања $U4$
Табела 5.18	Резултати М1 експеримената са различитим брзинама штампања
Табела 5.19	Резултати М1 експеримената за квадратну испуну
Табела 5.20	Резултати М1 експеримената за шестоугаону испуну
Табела 5.21	Резултати М1 експеримената са променљивом брзином штампања – тест притискивања

Табела 5.22	Резултати M1 експеримената за узорке са константним параметрима O1I5P4S2
Табела 5.23	Резултати M1 експеримената за узорке са константним параметрима O2I5P4S1 – тест притискивања
Табела 5.24	Резултати испитивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S2
Табела 5.25	Притисне карактеристике узорака са квадратном испуном
Табела 5.26	Притисне карактеристике узорака са шестоугаоном испуном
Табела 5.27	Резултати M2 експеримента – утицај угла штампања
Табела 5.28	Резултати M2 експеримената за троугаону испуну
Табела 5.29	Резултати M2 експеримената за квадратну испуну
Табела 5.30	Резултати M2 експеримената за шестоугаону испуну
Табела 5.31	Резултати M2 експеримената за таласасту испуну
Табела 5.32	Притисне карактеристике узорака са троугаоном испуном
Табела 5.33	Притисне карактеристике узорака са шестоугаоном испуном
Табела 5.34	Притисне карактеристике узорака са таласастом испуном
Табела 5.35	Притисне карактеристике пуних узорака
Табела 5.36	Резултати M3 експеримента – утицај ојачавајућих влакана у 2 концентрична прстена
Табела 5.37	Резултати M3 експеримента – утицај ојачавајућих влакана у 4 концентрична прстена
Табела 5.38	Однос затезне чврстоће и масе
Табела 5.39	Однос S/W за карактеристике материјала Оникс добијене притискивањем
Табела 5.40	Резултати експеримента M1 – материјал ABS
Табела 5.41	Резултати експеримента M2 – материјал Оникс
Табела 5.42	План експеримента и резултати односа S/N
Табела 5.43	Одзив S/N по факторима и нивоима
Табела 5.44	Резултати експеримената
Табела 5.45	Резултати анализе утицајности фактора
Табела 6.1	Резултати испитивања затезањем узорака од челика DC04 ($\check{C}0148$)
Табела 6.2	Резултати мерења узорака за одређивање γ фактора
Табела 6.3	Прорачун вредности
Табела 6.4	Карактеристике скенера David SLS 2
Табела 6.5	Резултати мерења угла савијања
Табела 6.6	Параметри нумеричке симулације
Табела 6.7	Измерене и процењене вредности угла савијања
Табела 6.8	План нумеричких експеримената за процену компензације угла савијања
Табела 6.9	Резултати нумеричких експеримената
Табела 6.10	Измерени углови савијања у експериментима са модификованим алатом уз компензацију углова матрице и обликача
Табела 7.1	Улазни подаци за нумеричке експерименте
Табела 7.2	Параметри тополошке оптимизације матрице и обликача
Табела 7.3	Потрошња и време израде радних делова алата на штампачу Makerbot replicator 2X (MBM1TU4O1I5P4B1S2)
Табела 7.4	Потрошња материјала и време израде алата на Markforged – у када се користе ојачавајућа влакна
Табела 7.5	Потрошња материјала и време израде тополошки оптимизованих радних елемената алата
Табела 7.6	Резултати експеримената једноугаоног савијања са полимерним радним елементима алата од ABS-а

Табела 7.7	Измерени углови савијања у експерименту са полимерним алатом од Оникса
Табела 7.8	Углови савијања у експерименту са тополошки оптимизованим полимерним алатом од ABS-а
Табела 7.9	Техно-економска анализа израде алата у зависности од коришћеног материјала
Табела 8.1	Резултати испитивања затезањем материјала лима <i>DX51D Z200</i>
Табела 8.2	Параметри штампе радних елемената алата за савијање на апкант преси
Табела 8.3	Потрошња материјала и време израде алата за савијање на апкант преси
Табела 8.4	Измерене димензије носача

Списак скраћеница

ABS	Акрилонитрил бутадиен стирен
FDM	енгл. <i>Fused deposition modelling</i>
DFAM	енгл. <i>Design for additive manufacturing</i>
SIMP	енгл. <i>Solid isotropic material with penalisation</i>
DIC	енгл. <i>Digital Image Correlation</i>
PLA	енгл. <i>Polylactic acid</i>
CFR	енгл. <i>Carbon fiber reinforced</i>
CEM	Скенирајући електронски микроскоп
SLS	енгл. <i>Selective laser sintering</i>
DSD	енгл. <i>Definitive screening design</i>
SWR	енгл. <i>Specific wear rate</i>
PETG	енгл. <i>Polyethylene terephthalate glycol</i>
MKE	Метода коначних елемената
АП	Адитивна производња
NURBS	енгл. <i>Non-uniform rational basis spline</i>
stl	енгл. <i>Stereolithography file</i>
PBF	енгл. <i>Powder Bed Fusion</i>
IGA-SIMP	енгл. <i>Isogeometric analysis (IGA)-SIMP</i>
CAD	енгл. <i>Computer aided design</i>
CAE	енгл. <i>Computer aided engineering</i>
SLA	енгл. <i>Stereolithography</i>
WRML	енгл. <i>Web Resource Modeling Language</i>
3MF	енгл. <i>3D Manufacturing Format</i>
OBJ	енгл. <i>Object file</i>
AMF	енгл. <i>Additive Manufacturing File</i>
FFF	енгл. <i>Fused filament fabrication</i>
SLM	енгл. <i>Selective laser melting</i>
SLS	енгл. <i>Selective laser sintering</i>
UAM	енгл. <i>Ultrasonic additive manufacturing</i>
LOM	енгл. <i>Laminated object manufacturing</i>
DED	енгл. <i>Direct energy deposition</i>
DMLS	енгл. <i>Direct metal laser sintering</i>
MJF	енгл. <i>Multi jet fusion</i>
BJ	енгл. <i>Binder Jetting</i>
MEX	енгл. <i>Material extrusion additive manufacturing</i>
VPP	енгл. <i>Vat photopolymerization</i>
MJT	енгл. <i>Material jetting</i>
PBF	енгл. <i>Powder bed fusion</i>
SHL	енгл. <i>Sheet lamination</i>
HIPS	енгл. <i>High impact Polystyrene</i>
SIMP	енгл. <i>Solid isotropic material with penalization</i>
RAMP	енгл. <i>Rational Approximation of Material Properties</i>
S/N	енгл. <i>Signal/noise</i>

1. Увод

Истраживање и примена различитих техника адитивне производње, не само у брзом развоју прототипова и производа, већ и у развоју прототипова алата, креће се и у правцу директне израде компоненти алата, како од метала тако и од полимерних материјала. Израда модела и готових компоненти слој по слој на основу виртуелног 3D модела, што је основна карактеристика ове врсте савремене производње, за разлику од класичног супстрактивног приступа, омогућава највиши ниво комплексности геометрије и примену тополошке оптимизације. То омогућава добијање прототипова и готових компоненти у вишеструко краћем времену и са минималним трошковима, а што је значајно за компаније али и истраживаче, јер добијају брзе одговоре током развоја и експериментисања на питања „шта-ако“. Све то резултира једном новом парадигмом која покреће иновације.

Циљ докторске дисертације је да се истражи и докаже могућност замене металних радних компоненти алата за процес угаоног савијања лима адитивно произведеним од полимерног материјала, под тачно одређеним и оптималним условима штампе, као и прецизно утврђеним углом еластичног исправљања нумеричким симулацијама на бази методе коначних елемената. Поред тога, за утврђену геометрију радних делова алата који у обради дају прецизан обрадак спроведена је тополошка оптимизација алата са циљем уштеде материјала и времена адитивне производње уз услов да резултати процеса савијања буду еквивалентни претходним.

При изради плана истраживања дефинисане су три основне хипотезе. Прва претпоставка је да је могуће користити полимерне 3D штампане алате у одређеним процесима обликовања лимова. Друга претпоставка је да је на основу познавања карактеристика материјала и резултата нумеричке симулације на бази методе коначних елемената могуће прецизно одредити угао компензације еластичног исправљања код једноугаоног савијања лима како применом металних тако и применом полимерних радних делова алата. Трећа претпоставка је да се излазно поље напона на радним елементима алата добијено нумеричком симулацијом процеса угаоног савијања лима на полимерним алатима може применити за тополошку оптимизацију алата са циљем уштеде материјала и времена њихове адитивне производње.

Бројна истраживања су реализована у области адитивне производње и њене примене не само у машинству, већ и у области медицине, грађевине, уметности итд. Логичан след њене примене је и за тзв. брзу израду алата (*rapid tooling*). Полазећи од чињенице да се применом адитивне производње смањују трошкови и главно време израде најсложенијих компоненти алата, посебно тополошки оптимизованих, отвара се питање да ли је могуће применити адитивно произведене радне компоненте алата од полимерних материјала, неком од АП технологија (*FDM, PolyJet* и слично) и извршити замену металних компоненти у склопу алата, а да при томе алат задржи своју функцију и даје захтевану прецизност у изради делова.

Управо је такав изазов био предмет истраживања у овој докторској дисертацији везано за процес једноугаоног савијања лима, при мањим силама савијања, које неизоставно доводе до појаве еластичне повратности, а тиме и нетачности угла савијања. У таквим условима једноугаоног савијања, када се у зони савијања остварују

еластично-пластичне деформације, након растерећења алата се еластична компонента деформације ослобађа и долази до повећања угла савијања. Постојала је реална потреба да се прво изврши процена еластичне повратности у процесу савијања лима применом поузданих софтверских алата на бази методе коначних елемената, кроз серију нумеричких експеримената, прво са металним алатима а онда и са полимерним. Верификација нумерички процењених вредности углова компензације еластичне повратности код обликача и матрице, као основних радних елемената алата, реализована је серијом лабораторијских експеримената. Тиме су утврђене тачне вредности компензационих углова који омогућавају да се након процеса савијања и еластичног исправљања лима добију прецизни делови.

За адитивну производњу полимерних компоненти алата примењена је *FDM* (*Fused Deposition Modeling*) технологија, и то на два различита *3D* штампача (*MakerBot replicator 2X*, *Markforged Onyx Pro*) применом различитих улазних полимерних материјала (*ABS* – акрилонитрил бутадиен стирен; Оникс – *Onyx*, најлон са кратким угљеничним влакнима са или без ојачања стакленим влакнима). На механичке карактеристике адитивно произведених радних компоненти алата од полимерног материјала значајан утицај осим улазног материјала имају параметри *3D* штампе, па су по веома детаљном плану експерименталних испитивања утврђени појединачни и спрегнути утицаји следећих параметара на квалитет материјала и његове карактеристике: угао штампања, облик испуне, густина испуне, оријентација штампе, брзина штампе и количина ојачања стакленим влакнима. Узорци добијени адитивном производњом уз варирање наведених параметара су испитивани тестовима затезања и притискивања, у складу са одговарајућим стандардом за полимерне материјале, за сваки појединачни експеримент у плану, и то по три узорка због понављања резултата теста. У првој групи експеримената (*M1*) испитан је утицај наведених параметара штампе на затезне и притисне карактеристике *ABS*-а, у другој групи (*M2*) утицај параметара на затезне и притисне карактеристике Оникса. У трећој групи експеримената (*M3*) узорци су штампани од Оникса и ојачавани стакленим влакнима и одређен је утицај количине и распореда стаклених влакана на механичке карактеристике адитивно произведеног узорка.

Кроз оваква експериментална испитивања за све припремљене узорке су одређени напон на граници течења, затезна чврстоћа, модул еластичности, деформација при кидању, однос S/W (чврстоћа/маса, специфична чврстоћа) и криве течења. Циљ је да се упоредном анализом и дискусијом резултата добију оптималне вредности утицајних параметара адитивне производње за добијање најбољих излазних перформанси за адитивну производњу радних компоненти алата за савијање. Са тако одређеним параметрима приступљено је самој адитивној производњи матрице и обликача за планиране експерименте једноугаоног савијања лима са лимитираном максималном деформационом силом од 600 N.

Резултати нумеричких симулација процеса обраде деформисањем, укључујући и угаоно савијање лима, веома зависе од улазних података којима се описује понашање материјала, односно математичког модела криве течења материјала. За одређивање криве течења материјала лима *DC04* примењен је тест затезања, а регресиона анализа за одређивање математичке формулације криве течења која са високим корелационим фактором репрезентује експериментално одређену криву течења.

Први експерименти једноугаоног савијања лима урађени су на металним алатима без компензације угла, и то при избору четири нивоа максималне деформационе силе (600 N, 1000 N, 1500 N и 2000 N). Примена већих оптерећења има

за циљ да се утврди утицај калибрације угла савијања и пораста напона у зони савијања изнад напона на граници течења, до достигања услова за чисто пластично савијање, када се теоретски гледано може умањити ефекат еластичног исправљања лима. Са друге стране, потребно је експериментално одредити угао за компензацију угла савијања, односно матричног угла при најмањој вредности максималне деформационе силе, која се поуздано може применити са полимерним радним елементима алата.

Редизајнирана геометрија алата уз компензацију матричног угла услед еластичног исправљања одређена је серијом нумеричких експеримената и потврђена лабораторијским експериментима. У ту сврху коришћен је софтвер *Simufact.forming* базиран на примени методе коначних елемената. Регресионом анализом су дефинисане криве течења у математичком експоненцијалном облику за све материјале, лим и адитивно третиране полимерне материјале од којих се израђују радне компоненте алата. За челични алат урађене су две врсте нумеричких симулација, када су алати крути и када су деформабилни. Исти принцип примењен је и у нумеричким експериментима са полимерним алатима. Упоредном анализом виртуелних процеса једноугаоног савијања лима одређен је прецизно угао матрице који узима у обзир компензацију еластичног исправљања, и који омогућава добијање савијене зоне лима са тачно дефинисаним углом од 90° .

Након израде адитивно произведених алата од ABS-а и Оникса урађена је серија лабораторијских експеримената једноугаоног савијања лима. За прецизно мерење обрадака од лима коришћени су 3D скенери *DAVID SLS 2* и *Artec Eva Lite*. 3D дигитализацијом обратка добија се облак тачака и *stl* модел, на коме су прецизно мерени углови савијања. Паралелно са тим, из *Simufact.forming* софтвера су експортирани виртуелни обрадци од лима, и упоређени са експериментално добијеним на полимерним алатима.

Након задовољавајуће упоредне анализе и верификације угла компензације, као и доказане хипотезе да је могућа замена металних компоненти алата са адитивно произведеним полимерним компонентама, приступљено је тополошкој оптимизацији геометрије матрице и обликача. На основу резултата нумеричке симулације дефинисано је гранично оптерећење које алати трпе током процеса једноугаоног савијања и то оптерећење представља основу за тополошку оптимизацију алата. Тополошка оптимизација је урађена коришћењем *SIMP* методе на којој се заснива софтвер *nTopology*. Анализом функционисања алата дефинисане су површине које су неопходне за функционисање као и региони које је могуће оптимизовати. Поред геометријских дефинисани су и гранични услови као и циљ оптимизације, смањивање масе радних елемената алата уз задржавање њихове крутости. После оптимизације, адитивном производњом су израђени оптимизовани радни делови алата и експеримент је поновљен са њима. За извођење експеримената коришћена је универзална машина за испитивање материјала *Zwick/Roell Z100*.

После потврђивања претпоставке да је могуће користити тополошки оптимизоване алате за савијање, експеримент је поновљен у индустријским условима. Разматран је носач од лима који се производи на апкант преси (према нем. *Abkantpresse*) и према коришћеном алату конструисан је нови који је прилагођен адитивној производњи. На основу резултата нумеричке симулације урађена је тополошка оптимизација матрице и затим је експеримент изведен коришћењем оба алата. Анализом добијених резултата претпоставке о могућности коришћења адитивно произведених и тополошки оптимизованих алата су доказане.

У другом поглављу дат је преглед истраживања која су значајна за области којима се дисертација бави. У трећем и четвртом поглављу приказане су теоријске основе обраде савијањем и адитивне производње. Пето поглавље описује испитивање механичких карактеристика полимерних материјала. У шестом, седмом и осмом поглављу приказана су експериментално-нумеричка истраживања урађена са челичним и адитивно произведеним алатима. Закључци су приказани у деветом поглављу. Списак коришћене литературе наведен је у десетом поглављу.

Експериментална испитивања механичких карактеристика адитивно произведених полимерних материјала спроведена су коришћењем тестова једноосног затезања и притискивања према стандардима *ASTM D638* и *ASTM D695*, уз варирање пет утицајних параметара, са три понављања. Механичке карактеристике челичног лима испитане су тестом једноосног затезања према стандарду *ISO 6892-1*.

За нумеричке симулације процеса једноугаоног савијања лима на металним и полимерним алатима примењена је метода коначних елемената како би се прецизно утврдили углови компензације еластичног исправљања обратка од лима, као и поља напона и контактних притисака на деформабилним алатима за даљу тополошку оптимизацију.

Метода *SIMP* (*Solid isotropic material with penalisation*) коришћена је за тополошку оптимизацију алата, са унапред дефинисаним граничним оптерећењима (напони и притисци на контактним површинама радних елемената алата добијени нумеричким експериментима) и циљним функцијама оптимизације.

2. Преглед истраживања

Адитивна производња, нумеричке симулације процеса деформисања, оптичко 3D скенирање и тополошка оптимизација теме су бројних истраживања. У овом поглављу дат је преглед научних истраживања која су релевантна за тему дисертације. Поглавље је подељено на пет одељака и у сваком су представљени радови из једне области.

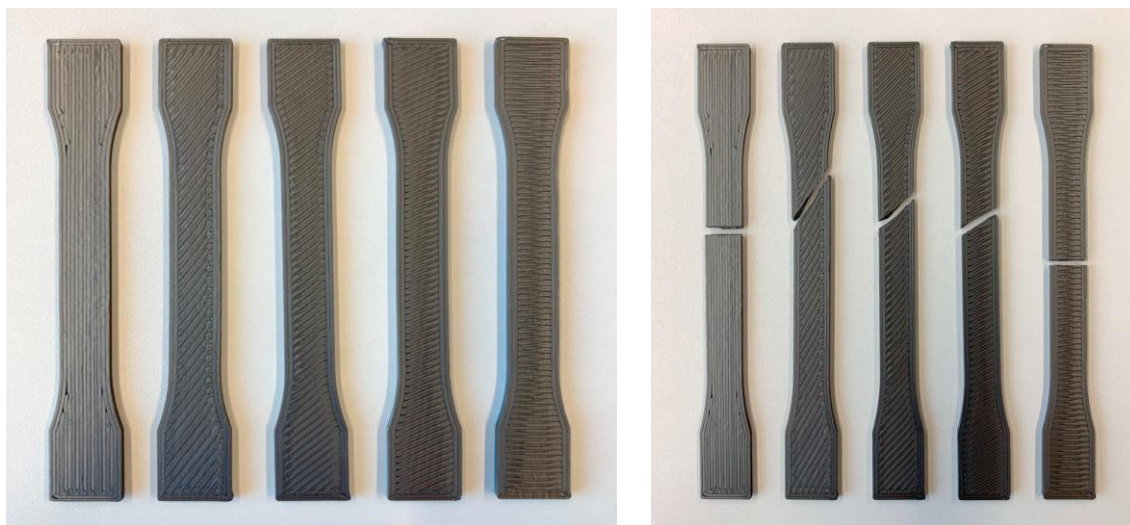
2.1 Испитивање механичких карактеристика 3D штампаних полимерних материјала

Адитивна производња спада у нове технологије и интензивно се развија па због тога долази до развоја нових материјала. С обзиром да се у овој дисертацији користи *FDM (Fused deposition modelling)* технологија преглед истраживања је усмерен на најчешће коришћене материјале у овој технологији. У овом одељку анализирани су радови у којима је истраживан утицај параметара адитивне производње попут угла штампања, дебљине слоја, облика и густине испуне на механичке карактеристике адитивно произведених делова.

Тема рада [Ayatollahi, 2020] је одређивање утицаја угла штампања (*raster angle*) на затезну чврстоћу и жилавост лома. Израђене су епрувете за испитивање затезањем и испитивање жилавости лома помоћу теста три тачке. Испитиван је материјал *PLA* при различитим вредностима угла штампања ($0/90^\circ$, $15/-75^\circ$, $30/-60^\circ$ и $45/-45^\circ$). Брзина штампања је била 55 mm/s, дебљина слоја 0,2 mm и узорци су се хладиле на радном столу да би било избегнуто кривљење. Брзина затезања је била 0,5 mm/min и мерења су вршена *DIC (Digital image correlation)* техником. Резултати су показали да вредност угла штампања има утицај на механичке карактеристике, односно да код делова израђених *FDM* технологијом од *PLA* материјала постоји анизотропија. Најбољи резултати постигнути су за угао $45^\circ/-45^\circ$. Узорак са углом $0^\circ/90^\circ$ има најмању вредност издужења при кидању тако да је изведен закључак да је део израђен са овим углом штампања веома крт. Вредности модула еластичности, Поасоновог коефицијента и напона течења разликују се за највише 19% док је вредност пластичне деформације чак дванаест пута већа за вредност угла $45/-45^\circ$ него $0/90^\circ$. Оптерећење при којем долази до жилавог лома најниже је за $0^\circ/90^\circ$ и износи просечно 446 N, а највише за угао $45^\circ/-45^\circ$ и има вредност 865 N. На основу максималног оптерећења коришћењем методе коначних елемената израчуната је вредност J_C (J/m^2).

У раду [Khosravani, 2020] испитивани су утицај угла и брзине штампања на механичке карактеристике. Епрувете (слика 2.1) су израђене од материјала *PLA* према стандарду *ASTM D638* при угловима штампања 0° , 30° , 45° , 60° и 90° и брзини штампања од 20 mm/s и 80 mm/s. Највећа вредност затезне чврстоће постигнута је за вредност угла штампања 0° а најмања за угао 90° . Закључено је да већим вредностима угла штампања одговарају мање вредности затезне чврстоће. Утицај правца штампања је велики, највећа добијена вредност затезне чврстоће је скоро двоструко већа од

најмање. Испитивање је показало да затезна чврстоћа и модул еластичности имају нешто већу вредност, за око 5%, при мањој брзини штампања (20 mm/s).



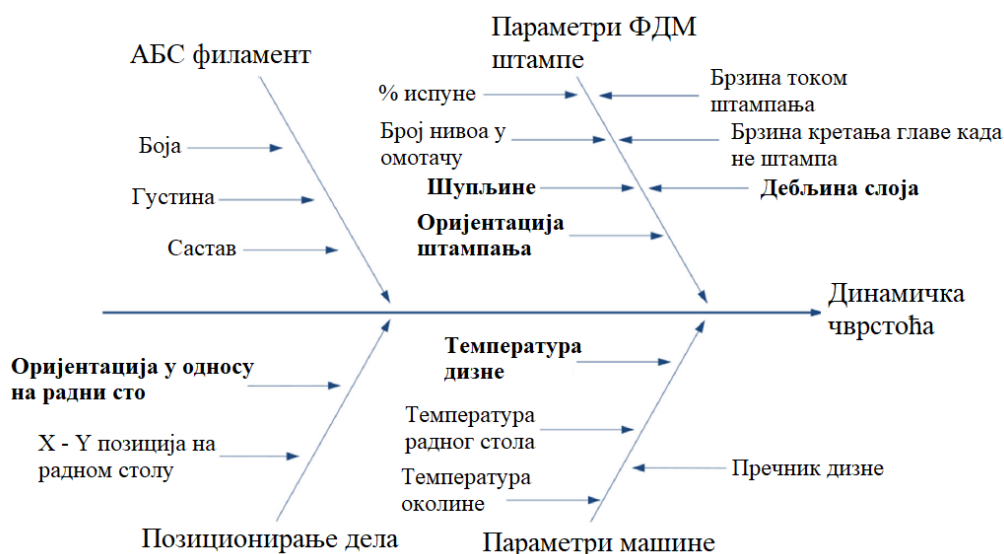
Слика 2.1 Изглед испитиваних узорка [Khosravani, 2020]

У раду [Guajardo-Trevino, 2022] разматран је утицај стратегија депоновања материјала односно насталих шупљина (*infill voids*) на притисну чврстоћу решеткастих структура (*isogrid structures*). Епрувете димензија 58,5x38,4x25,4 mm направљене су *FDM* технологијом од материјала *Onyx*. Разлог за истраживање је недостатак који је примећен код програма за дефинисање путање депоновања материјала (*slicing*) где се избор стратегије врши на основу времена потребног за адитивну производњу док се притом механичке карактеристике материјала занемарују. Узорци су израђени са различитим дебљинама унутрашњих зидова (*internal wall thickness*; 0,5-0,8-1-1,5 mm) да би се добиле различите празнине на штампаним узорцима. Експериментално испитивање и нумеричка анализа су показали да код узорка са празнинама долази до лома при знатно мањим вредностима силе притискивања, односно празнине имају значајан негативан утицај на притисну чврстоћу штампаних делова.

Утицај дебљине слоја и угла штампања (*raster angle*) на триболошке карактеристике 3D штампаних делова испитиван је у раду [Amirruddin, 2022]. Узорци су израђени *FDM* технологијом од материјала *ABS* и *PLA*. Варирани су углови штампања (0°; 45°; 90°) и дебљине слојева (0,127 mm; 0,254 mm; 0,33 mm). Испитивање је урађено на трибометру (*pin on disc*) без подмазивања при сили 10 N и 300 о/мин. Резултати су показали да *ABS* има боље триболошке карактеристике него *PLA* и да већим дебљинама слоја одговарају мање вредности силе трења и количина продуката хабања. Најбоље триболошке карактеристике постигнуте су за угао штампања од 45°.

Истраживање ефеката који угао штампања има на затезну и динамичку чврстоћу делова штампаних *FDM* технологијом од материјала *ABS* приказан је у раду [Jap, 2019]. Епрувете су израђене у две оријентације -45°/45° и 0°/90° и испитиване на замор при фреквенцији 5 Hz и вредности горњег напона од 40%, 60%, 80% и 90% вредности затезне чврстоће. Аутори су направили дијаграм рибље кости (слика 2.2) на којем су представљени сви параметри 3D штампе који могу имати утицај на заморну чврстоћу попут оријентације дела на радном столу, шупљина које настају, температуре млазнице и дебљине слоја. Епрувете су израђене према стандарду ISO 527-2 и испитане тестом затезања при брзини од 1 mm/min. Резултати експеримента су показали да је вредност затезне чврстоће већа за угао -45°/45° (23 MPa) него за 0°/90° (20 MPa). Закључено је да

оријентација штампе има велики утицај на динамичку издржљивост, при оптерећењу од 16 МПа узорак са правцем $-45^{\circ}/45^{\circ}$ је издржао двоструко више циклуса него узорак штампан са углом од $0^{\circ}/90^{\circ}$.



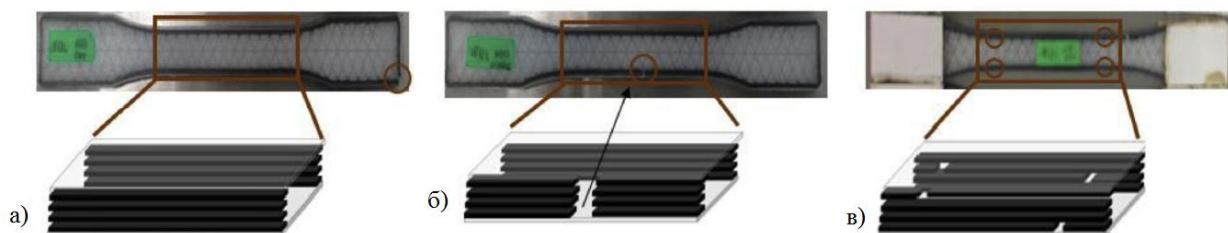
Слика 2.2 Дијаграм рибље кости са утицајним параметрима [Јар, 2019]

Тема рада [Ezeh, 2019] је одређивање оријентације штампања на динамичку чврстоћу делова од материјала *PLA*. Уочена су три механизма лома *PLA* услед замора: праволинијски лом филамента, одвајање суседних филамената или одвајање слојева. На основу експеримената изведен је закључак да утицај оријентације штампања може бити занемарен и да *PLA* може бити посматран као хомоген односно изотропан материјал.

Оптимизација параметара процеса као што су температура екструдирања, брзина екструдирања и дебљина слоја са циљем повећања тачности штампаних делова тема је у раду [Nath, 2020]. *FDM* процес је симулиран применом методе коначних елемената помоћу два модела, термалног модела за анализу трансфера топлоте и механичког модела за анализу деформације структуре. Штампани су делови од *ABS*-а и на основу експерименталних резултата кориговани су нумерички модели развијени у софтверу *Abaqus*. Закључак истраживања је да је примена методе коначних елемената у симулацији процеса адитивне производње потпуно оправдана и да је могуће добити веома корисне резултате.

Испитивање утицаја геометрије и параметара адитивне производње на карактеристике *3D* штампаних композита ојачаних континуалним или кратким влакнима приказано је у раду [Naranjo-Lozada, 2019]. Варирани су густина испуне и облик испуне код узорака ојачаних кратким влакнима, а код узорака ојачаних континуалним влакнима варирана је запремина влакана и облик ојачања, концентрични или линеарни. Тестирана су три различита материјала: најлон (ПА6), Оникс (*Onyx* - најлон са кратким угљеничним влакнима) и *CFR* композитни материјал (најлон ојачан континуалним угљеничним влакнима). Узорци су израђени према стандарду *ASTM D638* (слика 2.3). У првом делу експеримента упоређене су затезне карактеристике Оникса и најлона при густини испуне 10% и 70%, и правоугаоном и троугаоном облику испуне. У другом делу одређен је утицај континуалног концентричног ојачања на затезне карактеристике и вариран је број концентричних прстенова ојачања и број ојачаних слојева. На основу резултата првог експеримента види се да Оникс има знатно

боље особине од најлона, да са повећањем густине испуне долази до раста модула еластичности и затезне чврстоће. Други закључак експеримента је да се коришћењем троугаоне испуне постижу значајно боље вредности затезних карактеристика него при коришћењу квадратне испуне. Резултати су показали да повећањем запреминског удела влакана долази до побољшања затезних карактеристика. Препоручено је да треба избегавати постављање свих почетних тачака влакана у једну тачку. Правилним распоредом почетка ојачања влакнима могуће је значајно побољшати чврстоћу дела. На узорку са једним концентричним ојачаним кругом у 12 нивоа највећа вредност модула еластичности постигнута је за почетне тачке распоређене у затезном делу (4320 МПа), затим на крају (3980 МПа) и у средини (3300 МПа).

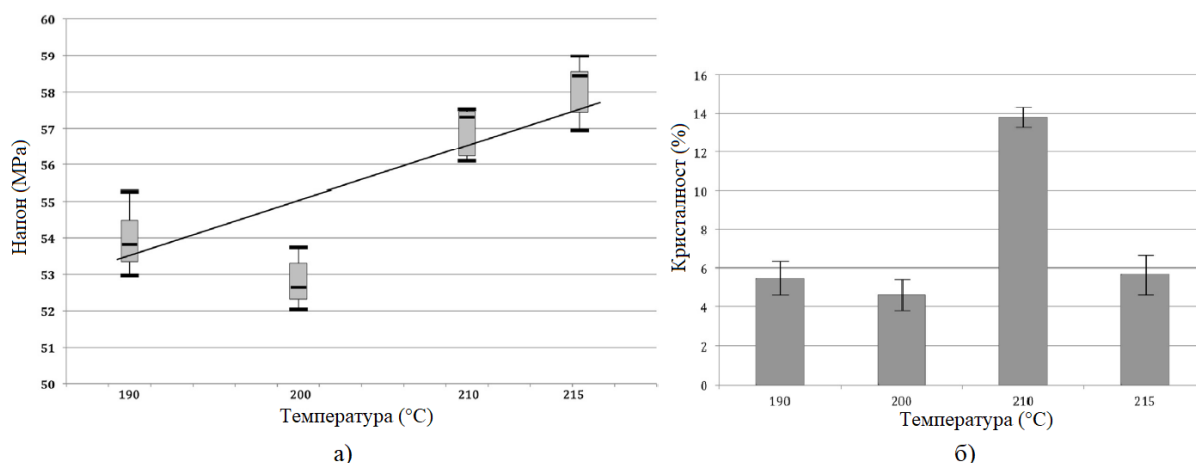


Слика 2.3 Положај почетне тачке ојачавајућих влакана: а) ван зоне б) на средини и в) у зони затезања [Naranjo-Lozada, 2019]

Претпоставка да боја материјала има утицај на механичке карактеристике адитивно произведених делова доказана је у истраживању аутора рада [Wittbrodt, 2015]. Узорци су израђени од материјала *PLA* у пет различитих боја (бела, црна, плава, сива, природни *PLA*) и тестирани затезањем према стандарду *ASTM D638*. Узорци су штампани са следећим параметрима: густина испуне 100%, температура радног стола 60°C, температура млазнице 190°C-215°C, угао штампања 0°/90°. Резултати су показали да степен кристалности зависи од боје материјала. Природни *PLA* има најмањи проценат кристалности 0,93% а при примени других боја има вредност од 2,6% до 5%. Највећа вредност напона на граници течења и затезне чврстоће постигнута је за природни *PLA*. Вредност затезне чврстоће је 57 МПа а за материјале у боји се креће од 50 МПа до 54 МПа. Утицај температуре млазнице је испитиван за четири вредности (190°C, 200°C, 210°C и 215°C) и резултати су показали да напон на граници течења опада при порасту температуре са 190°C на 200°C а при повећању на 210°C и 215°C расте. Степен кристализације белог *PLA* је највиши за 210°C (слика 2.4). Закључак је да порастом температуре млазнице затезна чврстоћа има већу вредност док модул еластичности има прилично константну вредност 2,78 GPa. Узорци су посматрани на СЕМ-у и утврђено је да шупљине обухватају 10,8% пресека док при повећању температуре тај проценат се смањује на 3% што даје објашњење зашто при већим температурама млазнице напон течења и затезна чврстоћа имају већу вредност.

У раду [Wang, 2021] анализиран је утицај брзине штампања и дебљине слоја на механичке карактеристике 3D штампаних узорака. Карактеристике су одређене за две врсте полипропилена квазистатичким тестом притискивања (*PP/EPDM* и *PP/EPR*). Посебно је истакнут утицај шупљина на погоршање механичких карактеристика. За обе врсте материјала закључено је да мање вредности дебљине слоја и веће вредности температуре штампања доводе до смањења шупљина. Резултати за модул притискивања и притисну чврстоћу су исти за оба материјала, док се смањењем дебљине слоја и повећањем температуре млазнице повећавају вредности механичких карактеристика. Поред одређивања утицаја температуре и дебљине слоја одређен је

утицај брзине деформације на механичке карактеристике. Разматрана су два случаја, за вредност брзине деформације $\dot{\epsilon}_t = 3000 \text{ s}^{-1}$ и $\dot{\epsilon}_t = 0,005 \text{ s}^{-1}$ и на основу добијених резултата види се да су вредности модула притискивања и притисне чврстоће значајно веће за динамичко притискивање (око 40 МПа за $\dot{\epsilon}_t = 0,005 \text{ s}^{-1}$ и око 90 МПа за $\dot{\epsilon}_t = 3000 \text{ s}^{-1}$). После разарања, узорци су посматрани електронским микроскопом да би био одређен начин настајања пукотине. Код узорака од материјала *PP/EPR* нису уочена оштећења ни при квазистатичком ни динамичком испитивању. Код узорака израђених од *PP/EPDM/talc* оштећења не постоје при квазистатичком испитивању али се јављају при динамичком. Шупљине на 3D штампаном узорку могу да изазову концентрацију напона и да због тога дође до појаве пукотине. Код узорака са већом порозношћу уочавају се већа оштећења него код узорака са мањим шупљинама.

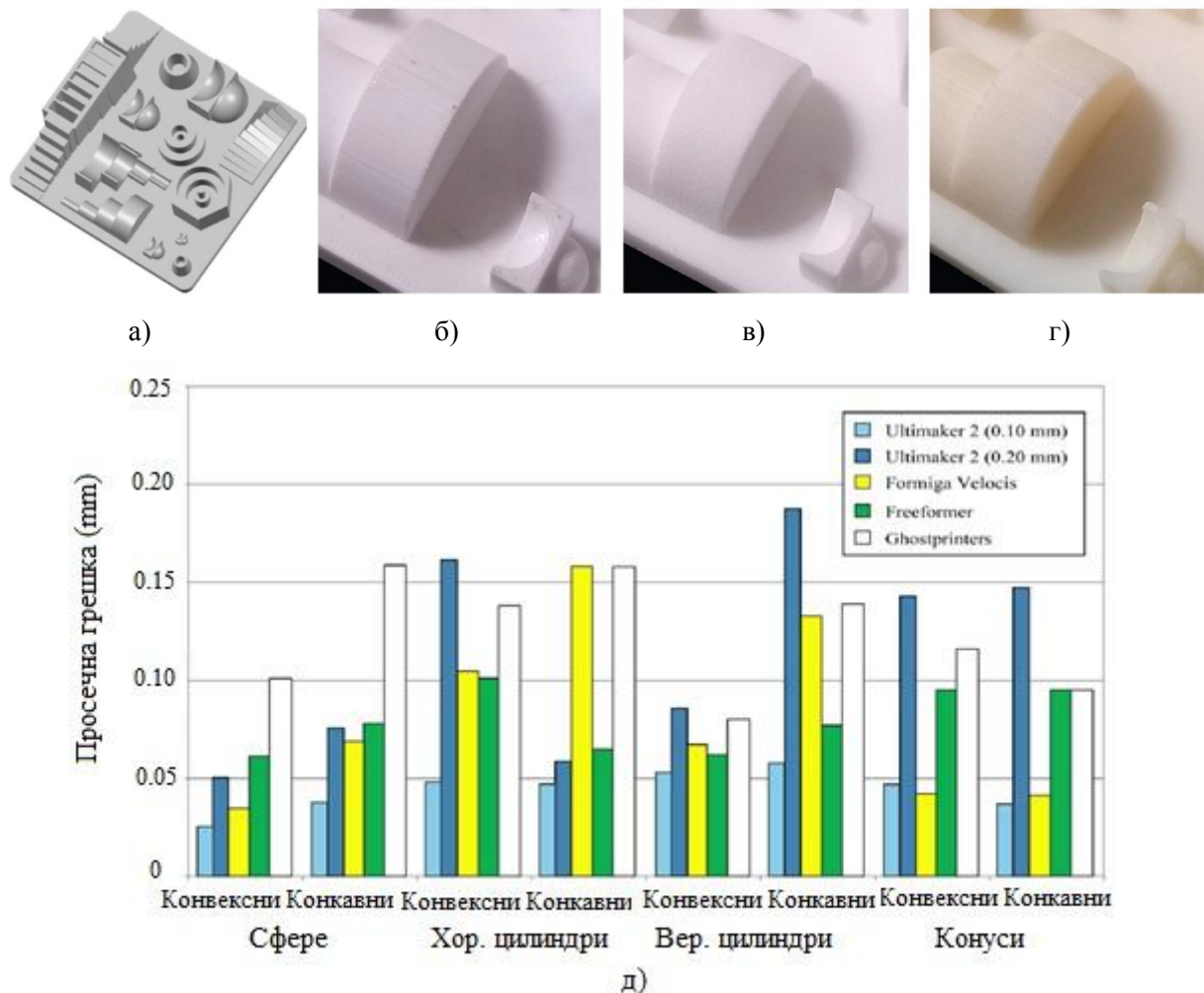


Слика 2.4 Резултати за узорке од белог PLA при различитим температурама млазнице: а) напон на граници течења и б) степен кристалности [Wittbrodt, 2015]

У раду [Mohan, 2021] су приказани резултати истраживања утицаја угла штампања на притисну и савојну чврстоћу, као и ударну жилавост. Узорци су израђени FDM технологијом од материјала PLA са угловима штампања $0^\circ/90^\circ$ и $-45^\circ/45^\circ$ и испитани према стандардима D695 (тест притискивањем), D790 (тест савијањем) и D256 (тест за ударну жилавост). Бољи резултати су постигнути за угао $-45^\circ/45^\circ$ што се поклапа са резултатима осталих истраживања. За вредност угла $-45^\circ/45^\circ$ савојна чврстоћа и ударна жилавост имају већу вредност него за угао $0^\circ/90^\circ$ (савојна чврстоћа $57,5 \text{ МПа} > 50,3 \text{ МПа}$; ударна жилавост $32,76 \text{ J/m} > 23,2 \text{ J/m}$) док су вредности притисне чврстоће приближно једнаке ($60,36 \text{ МПа} \approx 59,23 \text{ МПа}$).

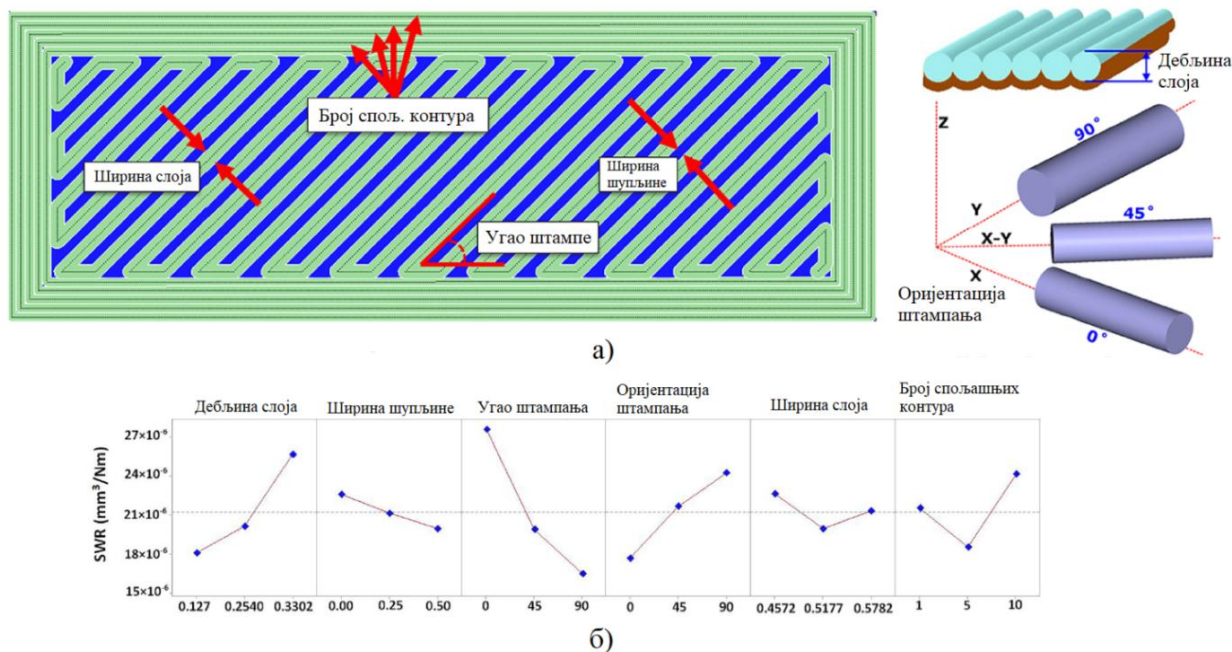
Прецизност израде делова адитивним технологијама важно је питање и тема је многих истраживања. Такво истраживање приказано је у раду [Minetola, 2020] где је помоћу дефинисаног теста оцењивана прецизност три 3D штампача који користе различите технологије и материјале: Ultimaker 2 (FDM, полиестер), EOS formiga velosis (SLS, полиамид) и Arburg freeformer (APF - ArburgPlasticFreeforming – патентирана технологија слична PolyJet технологији, ABS). Тестови за оцену димензионе тачности штампача су дефинисани у бројним радовима а један од најпознатијих је Минетолин тест (слика 2.5). Модел је припремљен у stl формату да би било могуће штампати га на сваком штампачу. Тест садржи различите облике у виду удубљења и испупчења, односно конкавних и конвексних површина. На одштампаном моделу мере се димензиона тачност и грешке облика, коаксијалност, паралелност, равност итд. Највећа хрпаовост површине је добијена на FDM штампачу Ultimaker 2 где су се виделе

ступенице али је смањењем дебљине слоја на 0,1 mm побољшан квалитет. Најбољи резултати постигнути су за *FDM* штампач *Ultimaker 2* када је дебљина слоја смањена са 0,2 на 0,1 mm чиме је показано да *FDM* технологија поред чврстоће делова може да понуди и одговарајућу прецизност што је веома битно за израду алата адитивним технологијама. Просечна грешка је мања на конвексним него на конкавним деловима.



Слика 2.5 Минетолин тест: а) CAD модел дела б) изглед детаља дела израђеног на *Ultimaker 2* в) изглед детаља дела израђеног на *EOS formiga velosis* г) изглед детаља дела израђеног на *Arburg freeformer* и д) поређење вредности грешака [Minetola, 2020]

Мохамед и сарадници истраживали су механизам хабања 3D штампаног PC-ABS материјала са циљем одређивања параметара који највише утичу на хабање [Mohamed, 2018]. За организацију експеримента коришћен је *DSD* (*definitive screening design*) који захтева само $2K+1$ експеримената (K је број утицајних параметара). Разматрани су параметри: дебљина слоја, величина шупљине, угао штампања, оријентација, ширина слоја и број контура (слика 2.6). Шеснаест епрувета $\varnothing 6 \times 35$ mm је направљено на штампачу *Fortus 400* и испитано на трибометру са оптерећењем 10 N при 300 о/мин и са 10000 циклуса. На основу резултата направљен је Парето дијаграм са којег се види да највећи утицај има угао штампања, затим следе дебљина слоја, оријентација штампања и број спољашњих контура док ширина слоја и димензија шупљине немају неки значајан утицај. Уочено је да се хабање, праћено преко *SWR* (*Specific wear rate*), смањује смањивањем дебљине слоја или повећањем угла штампања.



Слика 2.6 Геометријски параметри штампања: а) визуелни приказ и б) њихов утицај на хабање [Mohamed, 2018]

Спајање делова израђених *FDM* технологијом од материјала *ABS* коришћењем диметил кетона (ацетона) приказано је у раду [Saraf, 2020]. Тема рада је актуелна зато што је често при изради прототипова и делова алата адитивним технологијама проблем величина радног стола па је спајање неопходно. Циљ истраживања је био да се утврди да ли делови спојени на овакав начин имају одговарајућу отпорност на смицање. Модели ($101 \times 25,4 \times 2$ mm) су штампани са величином слоја 0,254 mm и 100% испуне са четири угла штампања $0^\circ/90^\circ$, $15^\circ/75^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$ и затим спајани коришћењем ацетона са две дужине преклопа 12,7 mm и 25,4 mm. Узорци који имају идентичну геометрију као два узорка спојена ацетоном штампани су изједна да би резултати тестирања били упоредиви. Тестом затезања добијени су резултати који су показали да спојени делови имају добру отпорност на смицање, чак у неким случајевима већу него делови штампани изједна. Највећа вредност смицајне чврстоће за дужину преклопа 12,7 mm добијена је за угао $45^\circ/-45^\circ$, а код преклопа од 25,4 mm највећа је за угао штампања $0^\circ/90^\circ$. У другом делу експеримента испитиван је утицај претходног третирања површина паром ацетона. Резултати су показали да повећањем времена претходног третирања паром ацетона смицајна чврстоћа значајно опада. Закључено је да се ово дешава због смањења храпавости површине што касније има утицај на спој.

Рад [Cicero, 2021] се бави проучавањем ефекта зареза при лому делова произведених *FDM* технологијом од материјала *PLA* и графеном ојачаног *PLA*. Узорци су штампани са различитим угловима штампања $0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/-60^\circ$ и $45^\circ/-45^\circ$. Зарези су израђивани са радијусима 0 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm и 2 mm. Материјал је подвргнут тестовима затезања и ударне жилавости и резултати су анализирани теоријом критичног растојања (*Theory of Critical Distances*) и употпуњени посматрањем површина на СЕМ-у. Додавање графена материјалу доводи до повећања Јунговог модула еластичности и смањења величине деформације при лому. Затезна чврстоћа зависи од угла штампања, тако да за вредност угла од $0^\circ/90^\circ$ је благо смањена, за угао $30^\circ/-60^\circ$ има незнатно већу вредност, док за угао од $45^\circ/-45^\circ$ је значајно повећана. У случају чистог *PLA* када постоје мале пукотине угао штампања $0^\circ/90^\circ$ обезбеђује

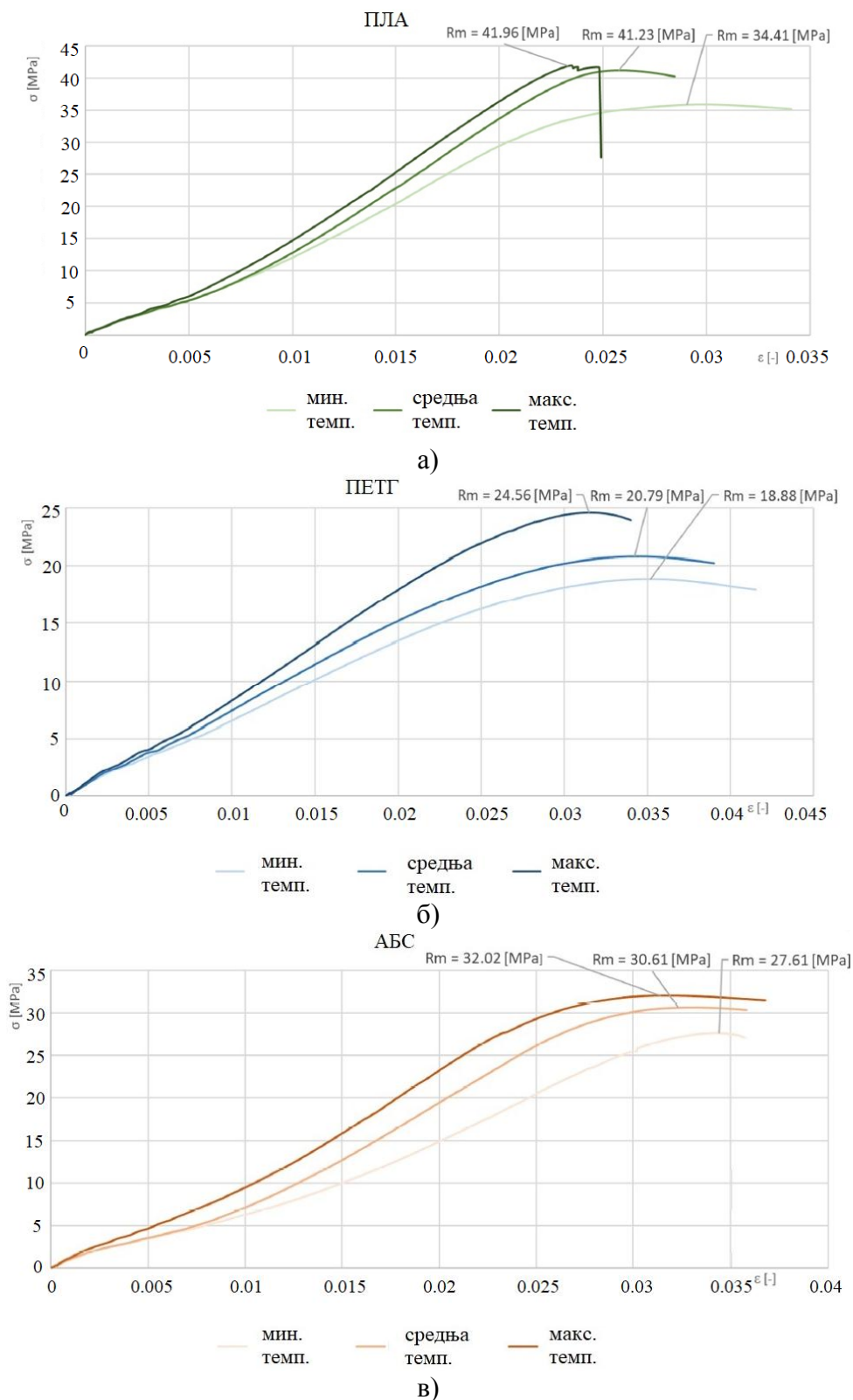
највећу ударну жилавост али у случају дефеката у облику зареза правци штампања $30^\circ/-60^\circ$ и $45^\circ/-45^\circ$ дају боље резултате. Када се користи додаток графена правци штампања $30^\circ/-60^\circ$ и $45^\circ/-45^\circ$ показују значајно боље резултате док у случају $0^\circ/90^\circ$ нема побољшања.

У раду [Bárnik, 2019] направљено је поређење механичких карактеристика композитне структуре од Оникса израђеног при различитим облицима и густинама испуне. Тестирани су узорци од пуног материјала са различитим дебљинама слоја и добијене су вредности затезне чврстоће од 22,8 МПа до 33,4 МПа. Урађен је тест затезања са узорцима са троугаоним, квадратним и шестоугаоним обликом испуне при густини испуне од 20%, 40% и 80%. Резултати су показали да повећање густине испуне доводи до повећања вредности механичких карактеристика и да су највеће вредности постигнуте за квадратни облик испуне.

Испитивање које је описано у раду [Bárnik, 2019] поновљено је коришћењем софтвера *ADINA* који користи методу коначних елемената а резултати су приказани у раду [Dorčiak, 2019]. Направљени су 3D модели узорака за различите облике испуне и резултати нумеричког експеримента су потврдили резултате физичких експеримената и тиме је потврђена могућност коришћења методе коначних елемената за симулације процеса у којима се користе адитивно произведени полимерни материјали.

Тема рада [Tandon, 2021] је одређивање утицаја угла штампања и густине испуне на затезне карактеристике 3D штампаних полимера са троугаоном испуном. Коришћени су материјали *ABS*, *PLA* и ојачани *PLA*. Углови штампања су варирани са вредностима од 0° , 45° и 90° , а густина испуне са вредностима 20%, 50%, 80% и 100%. На основу вредности затезне чврстоће и модула еластичности закључено је да је погодније штампати делове са угловима штампања 0° и 90° . Најбоље механичке карактеристике добијене су за *PLA* са композитима, следе *PLA* па *ABS*. Вредности затезне чврстоће за материјал *ABS* и густину испуне од 50% се крећу у опсегу од 14 МПа до 18,5 МПа а вредности издужења од 2,74% до 3,4%. За густину испуне од 80% затезна чврстоћа *ABS*-а има вредности у распону од 13 МПа до 19,2 МПа а издужење вредности од 1,93% до 3,61%. Закључено је да затезна чврстоћа расте са порастом густине испуне.

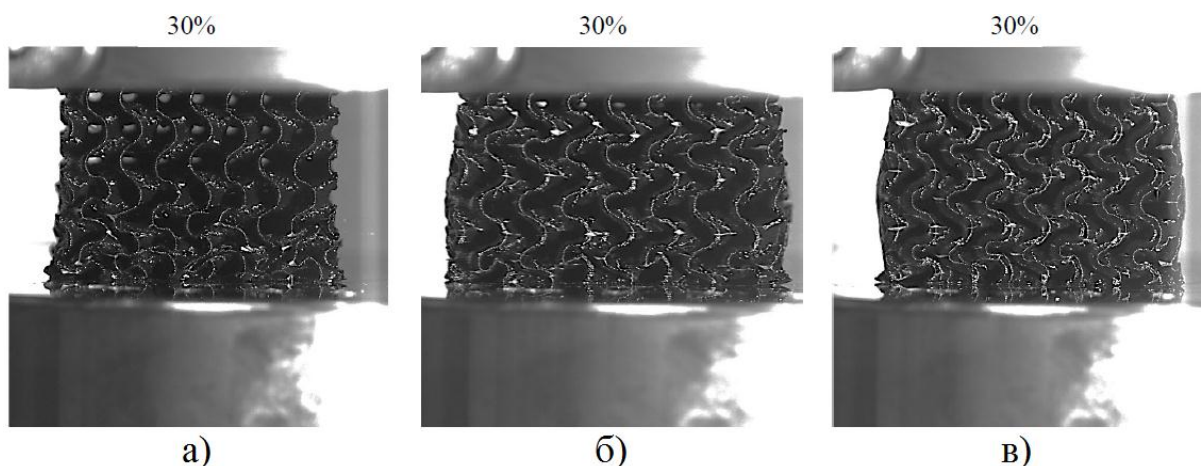
Испитивање утицаја температуре млазнице на механичке карактеристике 3D штампаног материјала приказано је у раду [Pernica, 2021]. Узорци су израђени од три врсте материјала: *PLA*, *PETG* и *ABS*. Узорци од *PLA* штампани су на температурама млазнице $190^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, $210^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и $230^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, узорци од *PETG* на $200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, $220^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и $240^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и за узорке од *ABS*-а примењене су температуре млазнице у вредностима од $190^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, $210^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и $230^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Узорци су штампани са дебљином слоја 0,2 mm и углом штампања $45^\circ/-45^\circ$ а након тога испитивани тестом на затезање према стандарду *ASTM D638*. Једино је материјал *PLA* погодан за штампање на све три температуре, код *PETG* и *ABS*-а постојао је проблем са адхезијом. *PLA* има сличне вредности затезне чврстоће за $210^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и $230^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, око 42 МПа, док је за најнижу температуру млазнице вредност око 34 МПа. Код *PETG* материјала већој вредности температуре одговара већа вредност затезне чврстоће и за највећу вредност температуре износи 24,56 МПа. Идентичан закључак је и у случају *ABS*-а, где је највећа вредност затезне чврстоће постигнута за највећу температуру млазнице. Код *PLA* и *PETG* деформација при кидању је већа за ниже вредности температуре млазнице, док је код *ABS* обрнуто. Дијаграми затезања приказани су на слици 2.7 и на основу њих корисник може на правилан начин да изабере температуру млазнице коју ће користити при адитивној производњи.



Слика 2.7 Дијаграми затезања при различитим температурама млазнице за узорке од материјала: а) PLA б) PETG в) ABS [Pernica, 2021]

У студији [Хи, 2021] тестом притискивања одређен је утицај величине и дебљине зида решетке на механичке особине узорака штампаних од материјала PLA. Облик испуне је таласasti (слика 2.8) а експеримент је подељен на два дела. У првом делу је испитиван утицај величине параметара решеткасте структуре при константној

порозности од 68,72%. Вариране су вредности димензија коцке и ћелије као и дебљине зида (величина коцке - 4 mm, 8 mm, 12 mm; дебљина зида – 0,645 mm, 1,29 mm, 1,935 mm; тестови - T-4-0,645, T-8-1,29, T-12-1,935). У другом делу експеримента при константној величини узорка и ћелије варирана је дебљина зида тј. порозност. Резултати првог експеримента показали су да са повећањем величине узорка, ћелије и дебљине зида расте притисна чврстоћа. Резултати другог дела експеримента су показали да повећање дебљине зида тј. порозности доводи до значајног раста притисне чврстоће. На пример, за дебљину зида од 0,645 mm притисна чврстоћа је 14 МПа, за 1,29 mm износи 23 МПа док за дебљину 1,935 mm чак 29 МПа.



Слика 2.8 Испитивање узорка притискивањем при деформацији од 30%: а) T-8-0.645 б) T-8-1.29 в) T-8-1.935 [Хи, 2021]

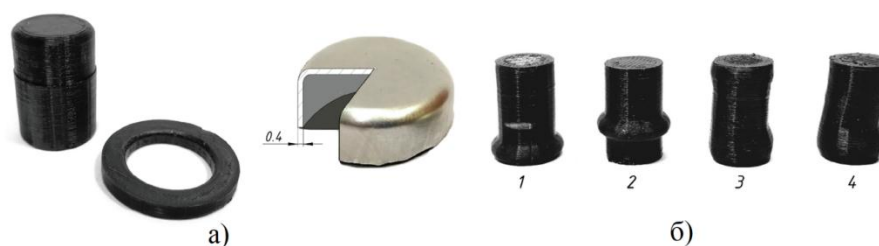
2.2 Примена адитивне производње у процесима обраде деформисањем

Због захтева савременог тржишта скраћење времена израде алата је постало веома битно у производњи алата. Адитивним технологијама се већ одређено време праве алати за бризгање пластике а у последње време све чешће се алати за обликовање лима праве помоћу ових технологија. Због важности теме појавили су се истраживачки радови чији је циљ одређивање могућности израде полимерних алата за обликовање лима.

Шух и коаутори [Schuh, 2020] испитивали су могућност употребе алата од материјала *PLA* за обликовање лима дубоким извлачењем. Материјал *PLA* је показао добре триболошке особине. Циљ истраживања је био утврђивање који облик испуне даје најбоље резултате у погледу притисне чврстоће. Поређени су шестоугаони, квадратни и троугаони облик испуне. Највећа вредност притисне чврстоће постигнута је употребом троугаоног облика испуне. Симулација процеса дубоког извлачења методом МКЕ показала је подударност резултата са експерименталним осим у делу механизма настанка локализованог деформисања и кидања.

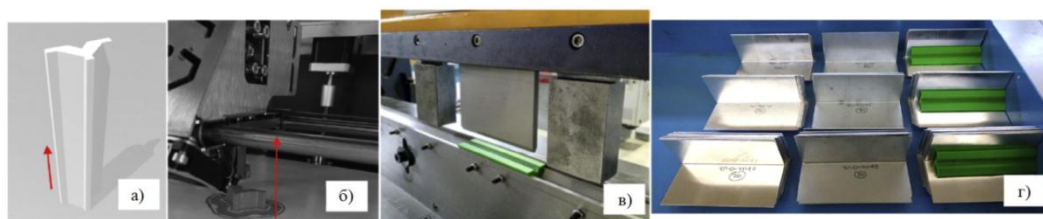
У раду [Tondini, 2021a] анализирана је употреба полимерних алата добијених адитивном *FDM* технологијом за постизање флексибилности у обликовању лимова. Алат за савијање израђен је од *PLA* и поређени су економски параметри израде таквог алата адитивном производњом, обрадом резањем и *EDM* технологијом. Истраживање је показало да алат задовољава и да је могуће производити мале серије. Цена израде АП алата је била 7.21€, помоћу *EDM* 820€ и обрадом резањем 2767€. Недостатак овакве израде је време израде које износи око 36 часова што је за 50% више у односу на *EDM* (23 сата), односно пет пута више у односу на обраду резањем (6 сати и 45 минута).

Постоје бројна истраживања могућности примене *FDM* адитивне технологије за брзу израду алата у области деформисања. Због високих радних температура у области топлог запреминског деформисања примена није могућа али је за израду малих серија у области пластичног обликовања лимова могућа и исплатива што је показано у раду [Klimyuk, 2021]. Због врсте оптерећења које алат трпи цилиндрични узорци димензија $\varnothing 12,7 \times 25,4$ mm испитивани су тестом притискивања. Вредности притисне чврстоће су у распону од 22 МПа до 40 МПа. Приказани су параметри који према прегледу литературе имају највећи утицај на притисну чврстоћу: врста материјала, густина испуне, број спољашњих зидова, облик испуне, ширина екструдираног слоја и температура млазнице. На практичном примеру дубоког извлачења лима дебљине 0,4 mm коришћењем алата од *ABS*-а приказане су могућности примене и истакнуте слабости термопластичних материјала, пре свега мала притисна чврстоћа (слика 2.9).



Слика 2.9 Делови израђени од термопластике (*FDM* технологија): а) алати за дубоко извлачење и део од лима и б) узорци за испитивање притискивањем (*ASTM D695*) [Klimyuk, 2021]

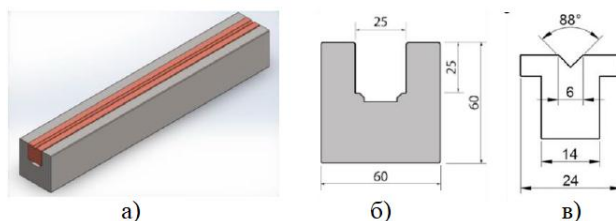
Примена полимерних адитивно произведених алата за *V* савијање и процена њихових механичких карактеристика приказани су у раду [Zaragoza, 2021]. Цилиндрични узорци за испитивање притискивањем штампани су од поликарбоната различитим стратегијама и анализиран је утицај следећих параметара: дебљина слоја (0,4 mm и 0,6 mm), пречник млазнице ($d=0,305$ mm, $d=0,406$ mm), дебљина слоја (0,178 mm, 0,254 mm), угао штампања ($45^\circ/-45^\circ$) и оријентација штампања (хоризонтално, вертикално). Тестом притискивања при брзини 2 mm/s одређивани су граница гњечења и притисна чврстоћа. Закључено је да се најбољи резултати постижу за пречник млазнице 0,406 mm, дебљину слоја 0,6 mm и хоризонталну оријентацију када је постигнута граница гњечења 69 МПа и модул еластичности од 1,57 GPa. У МКЕ софтверу урађена је симулација оптерећења алата и закључено је да алатима од поликарбоната није могуће савијати лим дебљине 2 mm. У другом делу експеримента примењен је јачи материјал *PLA*, и анализиран је начин на који угао штампања утиче на механичке карактеристике. Алати израђени од *PLA* су показали много боље резултате (слика 2.10). После савијања узорака алуминијума и челика мерени су профили у делу са највећим напонима и закључено је да су алати направљени АП технологијама погодни за мале серије. Најбоље резултате даје правац штампе $45^\circ/-45^\circ$.



Слика 2.10 Алат за савијање на апкант преси: а) CAD модел алата б) алат на радном столу в) приказ монтираног алата и г) алат и савијени делови лима [Zaragoza, 2021]

Истраживање карактеристика и понашања полимерних алата за обликовање лимова приказано је у раду [Tondini, 2021b]. Алати су израђени од материјала *PLA* и акрилног фотополимера, *FDM* и *VPAM* (стереолитографија) технологијама. Због постизања потребне крутости алат је штампан са дебелином слоја од 0,1 mm и густином испуне од 50%. Могућност израде алата проверена је на примеру *V* савијања и вишеструког савијања алуминијумског лима дебелине 1 mm. После израде пет делова, површине обликача и матрица посматране су под микроскопом и на обликачу нису уочене неке озбиљне промене док на матрици постоје одступања. Испитан је утицај радијуса савијања, коришћени су радијуси R_1 , R_2 и R_3 и закључено је да повећањем радијуса долази до већег расипања резултата на измереним деловима. Најмања одступања су у случају радијуса R_1 а највећа за радијус савијања R_3 .

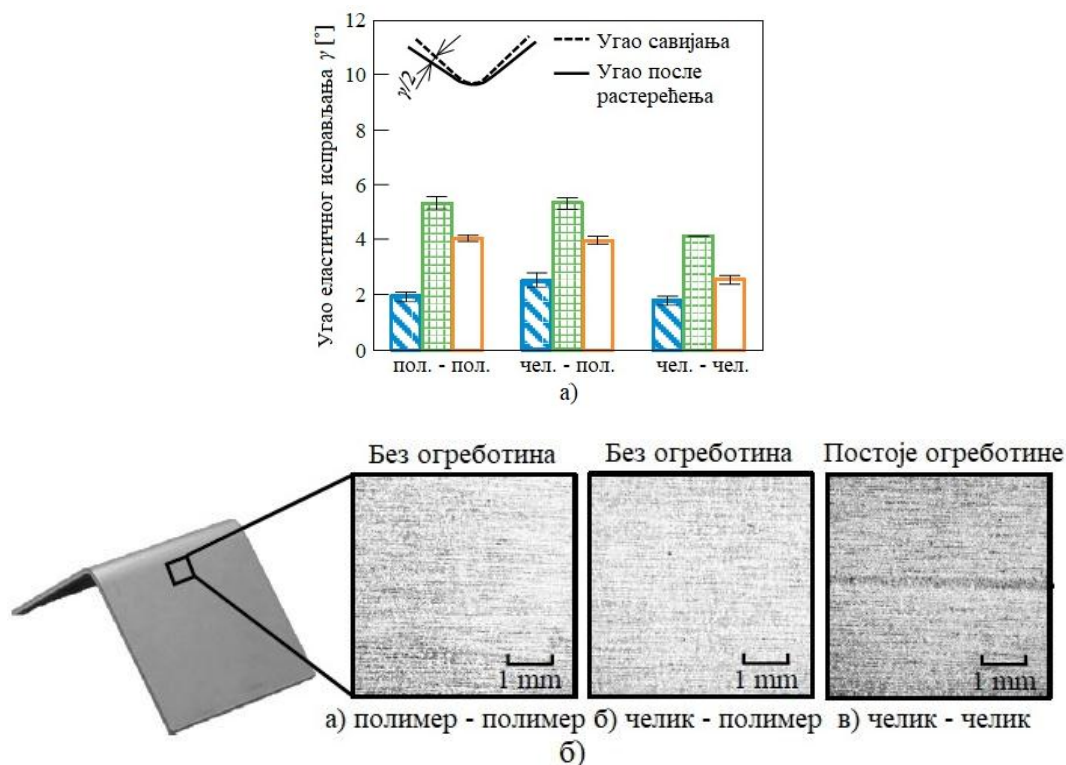
У раду [Zaragoza, 2019] представљени су резултати у примени хибридних алата за савијање лима. Појам хибридни означава да је постоље алата израђено од метала а умети од полимера адитивном производњом. Експериментални део обухвата *V* савијање коришћењем уметка од *C40* челика (ради поређења) и шест врста полимерних материјала: најлона, некурона (термореактивни полиуретан - 1050, 1150, 1300), гуме и поликарбоната. Савијани су узорци од алуминијума и челика и различитих дебелина (0,7 mm; 0,8 mm; 1 mm; 1,5 mm; 2 mm). Циљ истраживања је био поређење резултата добијених са металним уметком и уметцима од полимерних материјала. Анализом вредности апсолутне грешке (разлика измереног и номиналног угла) закључено је да нема великих одступања између резултата експеримената са полимерним и металним алатима. Предност коришћења полимерних алата у односу на металне је што не настају огреботине на обликованом лиму. У оквиру анализе трошкова истакнуто је да је метални алат јефтинији од хибридног али у случају када је за производњу потребно неколико алата хибридни постаје потпуно економски оправдан. Закључак је да је у процесима у којима су вредности напона мале могуће користити адитивно произведене алате. Пример хибридног алата приказан је на слици 2.11.



Слика 2.11 Алат за *V* савијање: а) монтиран хибридни алат б) метална основа и в) 3D штампани полимерни уметак [Zaragoza, 2019]

Резултати анализе могућности коришћења полимерних алата израђених АП технологијом за савијање лима приказани су у раду [Nakamura, 2018]. Конструисан је алат за једноугаоно савијање и израђен је на 3D штампачу од материјала *PLA* за који су претходно одређени напон на граници гњечења (30 MPa) и модул еластичности (1,5 GPa). Алат је израђен са дебелином слоја 0,18 mm, брзином штампања 40 mm/s и углом штампања 45°/-45°. Алат исте геометрије израђен је од челика да би било могуће поређење угла еластичног исправљања, односно да би се потврдила хипотеза да полимерни алат може заменити метални. Узорци за савијање су припремљени од лима (алуминијум A1100-H14, A5052-H32 и челик затезне чврстоће 440 MPa). На крају испитивања експеримент савијања је изведен са челичним притискивачем и полимерном матрицом. Вредност угла еластичног исправљања у случају сва три материјала је најмања за челични алат, док су у случајевима коришћења полимерног

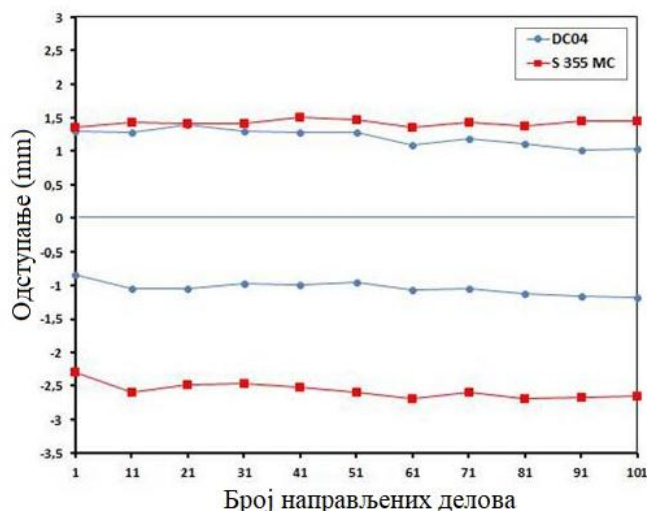
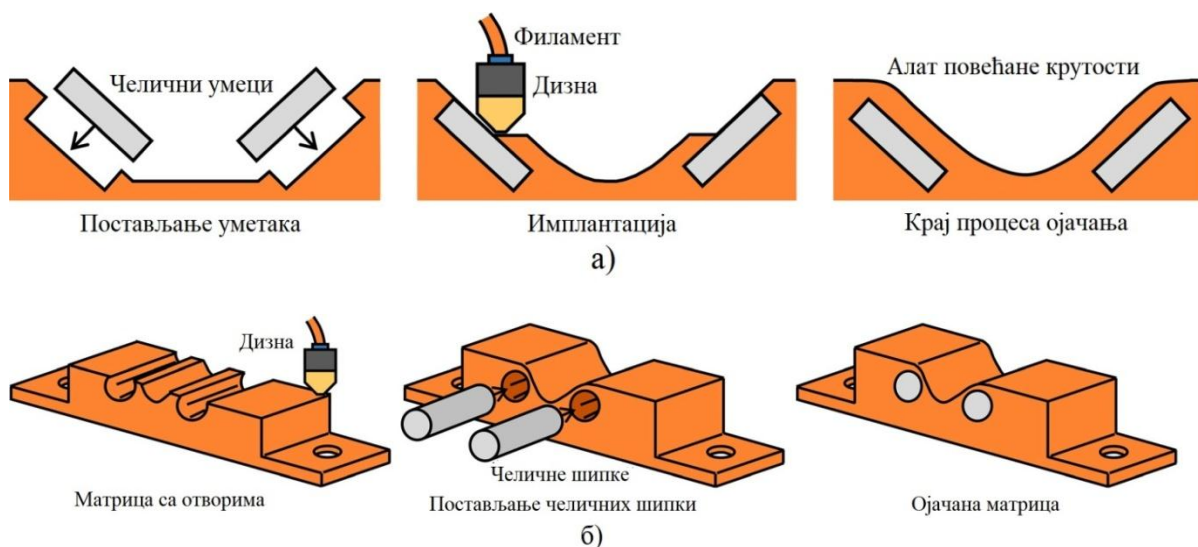
алата и комбинације челични притискивач-полимерна матрица одступања већа (слика 2.12). Посматрањем површина савијених лимова закључено је да огреботина нема када су коришћени полимерни алати. Поред еластичног исправљања анализирана је и вредност деформационе силе. Вредност деформационе силе већа је у случају коришћења челичних алата. Та разлика је приметна на крају процеса деформисања зато што у случају челичних алата остварује се већа крутост алата и ефекат калибрисања, док се код полимерних алата јављају еластичне деформације. На основу резултата експеримената закључено је да је употреба полимерних алата израђених *FDM* технологијом оправдана.



Слика 2.12 Резултати: а) за вредност угла еластичног исправљања (плави правоугаоник - A1100-H14, зелени - A5052-H32 и наранџасти – челик затезне чврстоће 440 MPa и б) стања површине радног комада за различите материјале алата [Nakamura, 2018]

У раду [Frohn-Sörensen, 2021] анализирана је могућност примене адитивно произведених полимерних алата за обликовање лима. За испитивање је коришћен процес обликовања лима коришћењем гуме. Сprovedено је испитивање која врста материјала је најпогоднија за употребу, па су серијом тестова притискивања испитани материјали *PETG*, *PLA* и *ABS* и анализом резултата одлучено је да алати буду израђени од *PLA*. Лим *DC03* димензија 80×80 mm дебљине 0,7 mm коришћен је у експерименталном делу као и гума тврдоће 40 Шорових јединица. Урађена су 64 експеримента обликовања гумом. Адитивно произведен алат је скениран пре првог и након 64. експеримента да би било утврђено да ли настају неке деформације на алату. Највеће одступање измерено на алату је 0,12 mm. Овим истраживањем је потврђено да алати за обликовање могу да буду израђени од ценовно повољних, биоразградивих материјала адитивним технологијама. Алат израђен АП технологијом у комбинацији са обликовањем гумом представља економски оправдан начин производње за мале серије.

Истраживање представљено у раду [Nakamura, 2020] бави се анализом могућности повећања крутости и ојачања адитивно произведених полимерних алата израђених *FDM* технологијом применом челичних уметака. Представљена су два начина ојачања. Први начин подразумева заустављање процеса адитивне производње због постављања челичних уметака и настављање процеса. Други начин обухвата редизајн алата у коме се уводе отвори за накнадну монтажу челичних уметака. Приказ ове две методе дат је на слици 2.13. Резултати експеримента показали су да ојачање алата доводи до повећања крутости полимерног алата и прецизности процеса савијања, тј. до смањења угла еластичног исправљања.



Слика 2.14 Деформације делова од DC04 и S355MC [Durgun, 2014]

Разматрање да ли је могуће користити алат направљен *FDM* технологијом за дубоко извлачење лима дато је у истраживању [Durgun, 2014]. Узорци од материјала DC04 и S355MC обликовани су помоћу адитивно произведених алата и сваки десети произведени узорак је дигитализован 3D скенером GOM Atos да би се проверила евентуална геометријска одступања. Горњи и доњи алат скенирани су после сваког

педесетог узорка и одређене су настале деформације. Резултати добијени обликовањем челика *DC04* били су задовољавајући док су одступања за обликовање делова од *S355MC* била већа од дозвољених што се објашњава тиме да овај материјал има већу вредност затезне чврстоће. На полимерном алату после педесетог дела уочене су деформације на површинским слојевима. Закључак истраживања је да су алати направљени *FDM* технологијом исплативи и погодни за обликовање мекших челика (*DC04*) у серијама од стотину узорака или нешто већим. Вредности измерених одступања на лимовима приказане су на слици 2.14.

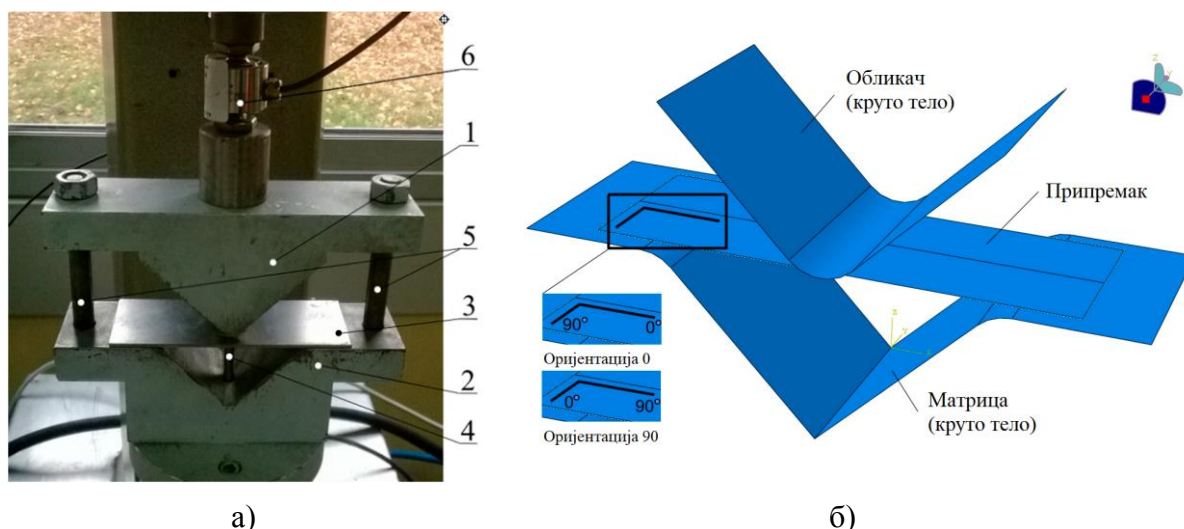
2.3 Анализа процеса обраде лима методом коначних елемената

Примена методе коначних елемената у пројектовању процеса обликовања лима у савременој индустрији је незаобилазна. Научна истраживања из ове области се баве проблемима одређивања еластичне повратности, напонским стањем деформисаних делова и анализом утицајних фактора процеса.

Нумеричко истраживање еластичног исправљања лима од угљеничних челика после старења применом квазистатичког модела ојачања приказано је у раду [Yong Sun, 2018]. Разматран је случај *V* савијања лима од угљеничног челика у софтверу *Abaqus*. Разматрана су два модела криве течења, експоненцијална аналитичка апроксимација и квазистатички модел ојачања. Значајно боље поклапање постигнуто је коришћењем квазистатичког модела и закључено је да повећање коефицијента старења доводи до боље подударности резултата.

Студија [Ibson, 2014] бави се одређивањем оптималних параметара за симулацију обликовања лимова велике дебљине. Три случаја су разматрана експериментално и нумерички: *V* савијање лима дебљине 31,5 mm, *U* савијање лима дебљине 8 mm и дубоко извлачење сложеног облика од лима дебљине 12 mm. Разматрани су следећи МКЕ параметри процеса симулације: тип коначног елемента (солид или љуска), број елемената по дебљини s (1, 3 или 5) и величина странице елемента ($1/3s$, s и $2s$). Закључак истраживања је да су оптимални параметри за обликовање лимова велике дебљине: *3D* тип симулације, три елемента по дебљини лима и величина елемента од $1/3$ дебљине разматраног лима.

У раду [Trzepieciniski, 2017] анализиран је утицај параметара МКЕ симулације на тачност процене еластичног исправљања код једноугаоног савијања. У реалном експерименту савијан је лим *DC04* дебљине 2 mm (слика 2.15 а). У нумеричким МКЕ симулацијама разматран је утицај броја тачака интеграције, два правила интеграције Гауса и Симпсона, утицај оријентације влакана, као и утицај трења на излазне перформансе процеса. За потребе симулације у софтверу *Abaqus* (слика 2.15 б) експериментално су одређене криве течења и фактори r и n лима. Повећањем броја интеграционих тачака време прорачуна расте скоро линеарно по оба модела. Када се број интеграционих тачака повећа са три на петнаест време прорачуна се повећа за око 50% а коефицијент еластичне повратности K после десете тачке има константну вредност која се од експерименталне разликује за приближно 1%. Резултати су показали да је еластично исправљање веће код узорака сечених управно на правац ваљања. На основу резултата нумеричког експеримента закључено је да је оптималан број интеграционих тачака пет. Трење има мали утицај на еластично исправљање.



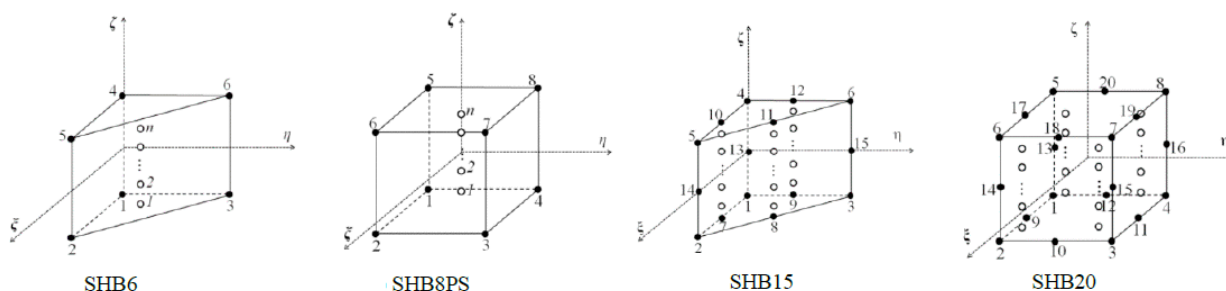
Слика 2.15 Алат за савијање: а) припремљен за експеримент и б) његов нумерички модел [Trzepieciński, 2017]

У раду [Sharma, 2022] нумерички и експериментално је одређен утицај радијуса савијања на еластичну повратност при V савијању композита од три врсте лима (SS304/AI1050/SS430). Утврђено је да код савијања композитних лимова велики утицај има радијус савијања/обликача. Закључак експеримента је да се смањивањем радијуса савијања постиже смањење еластичне повратности. Разматрана су два распореда, први када је унутрашњи слој од материјала SS430 а спољашњи од SS304, и други када је распоред обрнут. Еластична повратност је већа у другом случају када је слој од материјала SS430 у контакту са обликачем за све три вредности полупречника обликача. У нумеричком делу експеримента обликач и матрица су дефинисани као љуска (*solid shell element*) и лим је моделиран у три слоја: слој од материјала SS304 дебљине 0,4 mm, од AA1050 дебљине 1,4 mm и од SS430 дебљине 0,6 mm. Коефицијент трења између матрице и лима је 0,125 а између обликача и лима је 0,05. Поклапање резултата добијених експериментално, аналитички и нумерички потврђује полазну хипотезу да је нумеричким симулацијама могуће добро предвидети еластично исправљање композитних лимова.

Одређивање еластичног исправљања, експериментално и нумерички, при U и V савијању челичног лима Ck67 приказано је у раду [Bakhshi-Jooybari, 2009]. Узорци су припремљени са димензијама 25x100 mm и у три правца у односу на правац ваљања (0° , 45° , 90°). Карактеристике материјала за МКЕ симулацију су одређене тестом затезања. Разлика између резултата добијених нумерички и експериментално је свега неколико процената. Резултати су показали да у оба случаја U и V савијања повећање дебљине лима доводи до смањења угла еластичног исправљања. Разматрајући вредност угла еластичног исправљања закључено је да је најповољнија оријентација 0° .

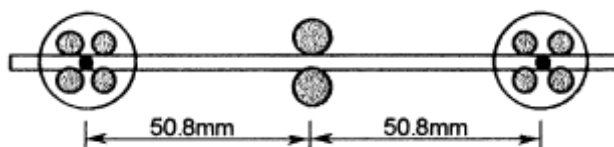
У раду [Nabeel Younas, 2020] разматрана је употреба различитих врста коначних елемената и модела анизотропије лима. Изведена је операција дубоког извлачења лима од алуминијума и поређењем експерименталних резултата са нумеричким одређен је модел анизотропије чијим коришћењем се постижу најповољнији резултати. Нумерички експерименти су спроведени са свим могућим комбинацијама и поређена је висина дела после извлачења. Разматрана су три модела анизотропије: квадратни Хиллов 48 и два неквадратна Барлатова (YLD-91, YLD2004-18P). Разматран је стандардни коначни елемент у софтверу Abaqus, C3D8I, и креирани коначни елементи SHB6,

SHB8, *SHB15*, и *SHB20*. На основу резултата експеримената закључено је да су најбољи резултати постигнути за Хиров и затим за Барлатов *YLD2004-18P* модел као и да су креирани елементи (*solid-shell*) постигли боље резултате него стандардни у софтверу *Abaqus*. Разматрани елементи приказани су на слици 2.16.



Слика 2.16 Разматрани елементи [Nabeel Younas, 2020]

У раду [Zhao, 2002] експериментално и нумерички је анализиран процес савијања лима у три тачке са циљем анализе утицаја модела деформационог ојачања (слика 2.17). Лим од две врсте челика, меког челика дебљине 1,2 mm и челика високе чврстоће дебљине 1,4 mm, оптерећен је циклично и добијена је крива цикличног оптерећења. На кривој се види појава деформационог ојачања и Баушингеровог ефекта. Експерименти су поновљени нумерички да би било утврђено који конститутивни модел је најпогоднији за нумеричку анализу понашања лима при цикличном оптерећењу. На основу поређења експерименталних и нумеричких кривих закључено је да изотропни модел прецењује појаву деформационог ојачања и не укључује појаву Баушингеровог ефекта и пад пластичности. Кинематски модел потцењује утицај деформационог ојачања и преувеличава утицај Баушингеровог ефекта. Најбоље поклапање је постигнуто употребом комбинованог модела. Закључено је да за нумеричку симулацију циклично оптерећених лимова најбоље користити љуску са 25 до 50 интеграционих тачака по дебљини.



Слика 2.17 Шема теста савијања [Zhao, 2002]

Анализа теста једноугаоног савијања и одређивање конститутивних МКЕ модела тема је студије [Reche, 2012]. Урађена су два теста савијања са лимовима од две врсте нисколегираних челика, први када је дебљина лима 1,6 mm и угао савијања до 150° и други када је дебљина лима 0,75 mm а угао савијања до 180°. Аналитички облици криве течења су одређени тестовима затезања и смицања да би прецизно било одређено понашање материјала током савијања и еластичног исправљања. На основу добијених кривих течења урађена је симулација теста затезања и на основу доброг поклапања потврђене су једначине које су коришћене у симулацији. Експериментални и нумерички резултати се поклапају и закључено је да коефицијент трења нема значајан утицај (испитиван ранг од 0,1 до 0,25).

2.4 Оптичко 3D скенирање за контролу делова и алата

Оптичке методе скенирања нашле су значајно место у процесима обраде лима, пре свега као контрола облика и тачности делова и алата. У неким процесима се помоћу оптичког скенирања управља процесом обликовања као што је случај при ласерском обликовању танких лимова [Gao, 2016; Gao, 2017].

Приступ за проверу димензионе тачности делова добијених инкременталним обликовањем лима помоћу 3D скенирања приказан је у раду [Bârsan, 2023]. Током процеса обликовања варијани су параметри инкременталног корака (0,5 mm и 1 mm) и угао нагиба (50° и 60°). За оптичко мерење коришћен је уређај *Atos core 200*. Процес контроле има дефинисан ток: скенирање, склапање скенова, процена димензионе тачности и извештај о мерењу. Препорука је да се анализа добијених резултата мерења лима ради у две међусобно управне равни методом сечења облака тачака мерном равни у софтверу *GOM Inspect*. Коришћење оптичког мерења значајно може да убрза проверу димензионе тачности делова.

У раду [Helle, 2021] објашњене су основе 3D скенирања и реверзног инжењеринга као што су технике реконструкције површина и разматрана је тачност скенираних делова. У студији случаја цилиндрични метални део добијен адитивном производњом скениран је 3D ласерским скенером а затим је измерен на координатној мерној машини и упоређена је тачност. Последња етапа процеса реверзног инжењеринга је креирање површина што је могуће урадити на два начина. Први подразумева прављење једноставних (*primitives*) површина фитовањем према облаку тачака и други прављењем *NURBS* површина којим се доста правилније креира део. Закључено је да није могуће 3D скенирањем добити облак тачака са високом тачношћу без обраде површина са рефлексијом (матирање површина) и коришћења стандардизованих маркера.

Начин процене еластичног исправљања лима коришћењем 3D дигитализације приказан је у раду [Zhang, 2016]. Дигитализација обратка од лима и облак тачака су добијени коришћењем фотограметрије а поклапање облака тачака и *CAD* модела дела урађено је у софтверу *Geomagic Qualify*. Пресек модела и облака тачака могуће је направити у свим правцима како би се одредио угао еластичног исправљања. За оцену еластичног исправљања уведен је индекс $S_A = f(R_A, M_A)$ где R_A представља облик облака тачака дела после еластичног исправљања а M_A теоретски облик дела односно облик *CAD* модела, док је f фактор корелације. Фактор S зависи од вредности угла еластичног исправљања и вектора сва три правца x , y и z . Метода је потврђена на индустријском примеру.

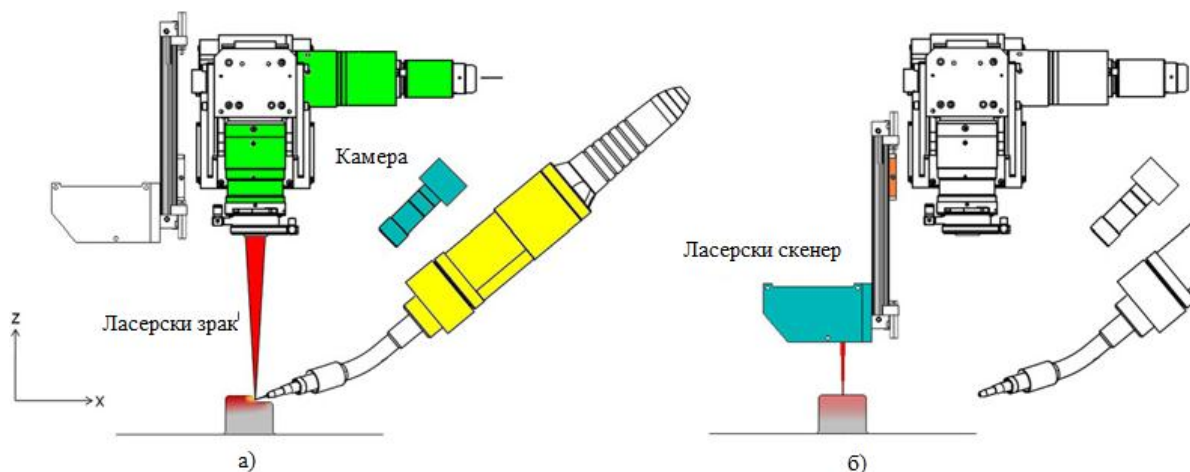
Геометријска тачност лимова обликованих дубоким извлачењем и хидрообликовањем анализирана је у раду [Aydın, 2022]. Обликован је лим од материјала Ti-6Al-4V дебљине 0,55 mm. Коришћен је оптички 3D скенер *Breuckmann optoTop-HE*. Коришћени су маркери пречника 4 mm који су лепљени са обе стране лима. После скенирања извезен је *stl* фајл и у софтверу *Geomagic Control X* измерени су дебљина лима и карактеристични пречници. После скенирања мерење је поновљено са уређајем са магнетном куглицом и упоређени су резултати. Резултати мерења дебљине лима добијени мерењем магнетном куглицом и скенирањем имају задовољавајућу подударност. Стандардна одступања полупречника су била 0,04 mm па је закључено да се прецизност делова од лима може мерити помоћу 3D оптичког скенирања (слика 2.18).



Слика 2.18 Провера тачности делова добијених дубоким извлачењем [Audin, 2022]

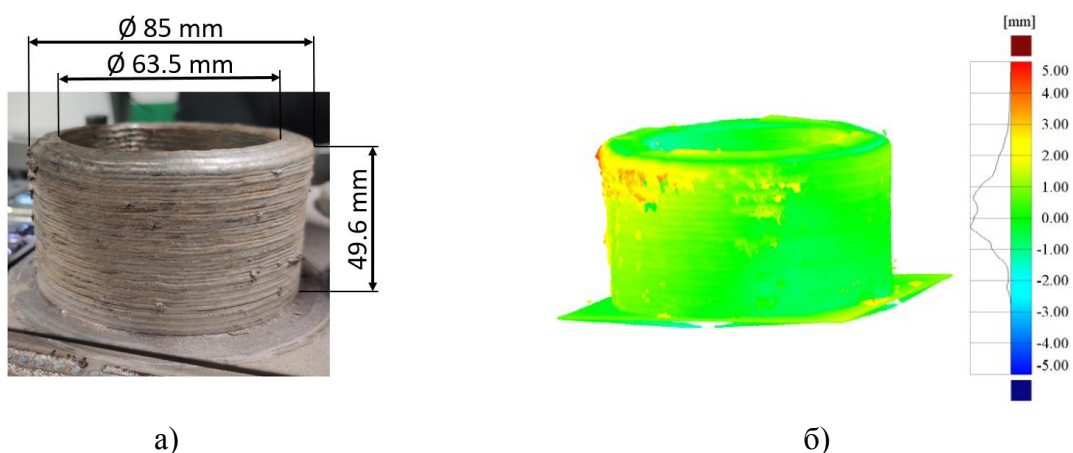
Анализа одступања тачности склопова од лима коришћењем 3D скенирања објашњена је у раду [Claus, 2021]. Приступ је заснован на примени методе коначних елемената са циљем осигурања квалитета при монтажи делова од лима. Циљ истраживања је да се разложи вектор поља деформације добијен поређењем скениране и идеалне геометрије склопа. Разлагање вектора није дефинисана као математичко разлагање већ као вишеструка симулација коришћењем методе коначних елемената применом различитих параметара. Практична примена методе је детаљно описана у раду, анализиран је део од лима из ауто индустрије. Пре монтаже део је скениран, а посредством методе коначних елемената урађена је симулација и процена положаја дела после монтаже, узимајући у обзир услове монтаже и однос са осталим деловима. После монтаже дела на шасију возила део је поново скениран и добијени резултати су упоређени са резултатима симулације. На основу анализе одступања кориговани су параметри монтаже како би део у потпуности задовољио захтеве. Резултат интегрисане примене МКЕ методе и 3D скенирања је приступ на основу кога инжењер квалитета лакше може да разуме настала одступања после монтаже и да предложи решење.

Могућност примене 3D скенирања у комбинацији са адитивном производњом описана је у раду [Heralić, 2012]. Адитивна производња металних делова DED технологијом је веома захтевна и током рада услед неједнаког депоновања материјала може доћи до геометријске нетачности. Интеграцијом скенера и робота постиже се побољшање квалитета делова тако што се након сваког израђеног слоја део скенира и евентуална одступања се одмах коригују. У раду су представљени потребна опрема, детаљна стратегија рада и резултати експеримената. Коришћени су модификовани уређај за ласерско заваривање, роботска рука, уређај за аквизицију података и управљачки систем (слика 2.19). Циљ коришћења оваквог система је обезбеђивање стабилности процеса депоновања материјала односно обезбеђивање прецизног померања робота у вертикалном правцу. После сваког депонованог слоја врши се скенирање површине и на основу резултата које софтвер израчуна дефинишу се вертикално померање и брзина довођења материјала.



Слика 2.19 Коришћени уређај: а) део система за депоновање материјала и б) део за скенирање [Heralić, 2012]

Контрола тачности израде сложених делова *DED* технологијом интеграцијом скенера и роботске руке размотрена је у раду [Garmendia, 2020]. С обзиром да се овом технологијом производе изузетно велики делови није једноставно скенирати све површине (слика 2.20). Идеја у овом раду је да скенер буде интегрисан на роботску руку и да током nanoшења материјала истовремено буде примењено скенирање дела. Овакав метод омогућава брзу анализу тачности добијеног дела и скраћује време потребно за контролу. Резултат овакве интеграције је могућност контроле квалитета без преношења дела до простора за контролу или заустављања производње.



Слика 2.20 Цилиндрични део направљен од $Ti6Al4V$: а) димензије после израде и б) одступање његових димензија од CAD модела [Garmendia, 2020]

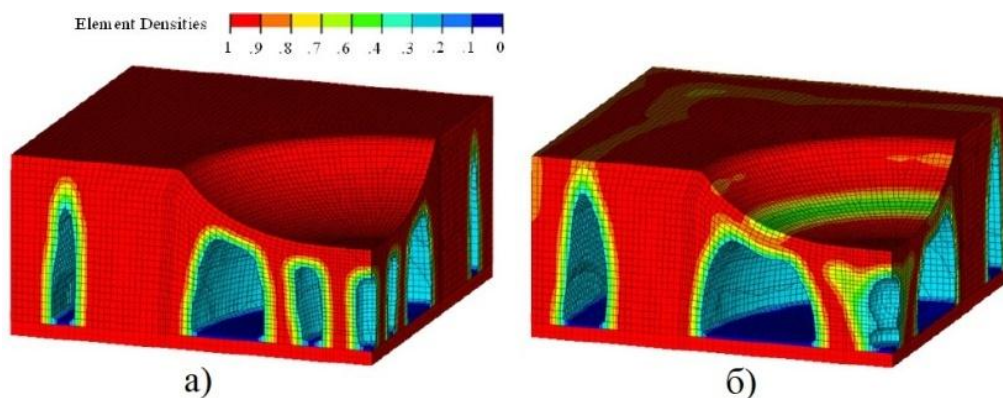
2.5 Тополошка оптимизација

Примена тополошке оптимизације у области адитивне производње је у порасту. У овом одељку су представљена истраживања која се односе на примену тополошке оптимизације у адитивној производњи, а која се тичу одређивања утицаја фактора оптимизације на могућност смањења масе и процену понашања дела после оптимизације.

У раду [Myung Kyun Sung, 2023] анализиран је утицај неколико главних фактора тополошке оптимизације на механичке карактеристике дела. Предмет оптимизације је прирубница цеви. Разматран је утицај фактора пенализације (*penalty factor*),

процентуалног смањења запремине (*volume fractin constraint*), величине елемента (*element size*) и прага густине (*density threshlod*). Оптимизовани део је направљен *PBF* адитивном технологијом од полиамида *PA2200*. Експерименти су урађени на универзалној машини за тестирање материјала и коришћен је *DIC* (*3D Digital Image Correlation*). Описана је детаљна процедура оптимизације, од дефинисања *3D* модела, анализе методом коначних елемената, тополошке оптимизације на основу резултата МКЕ анализе и постпроцесирања тј. припреме за израду дела адитивном производњом. Дефинисана су по три нивоа вредности за сваки од утицајних параметара. Вредности фактора пенализације су [2, 3, 4], фактора ограничења запремине [40, 50, 60], величине елемента су вариране са вредностима [0,35; 0,5; 0,65] а прага густине [0,3; 0,5; 0,7]. На измерену вредност силе највећи утицај има фактор ограничења запремине. Овај фактор и праг густине имају линеарну зависност са порастом силе. Најмањи утицај имају фактор пенализације и величина елемента.

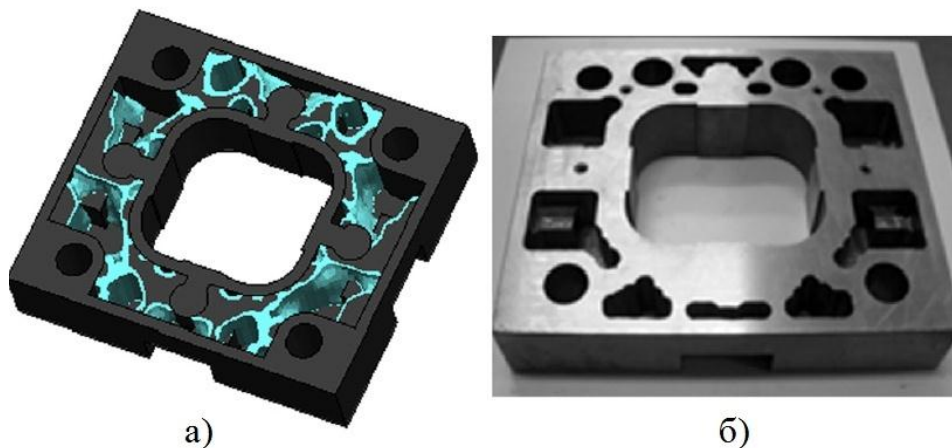
Структурна оптимизација алата за обликовање лима израђеног адитивном *FDM* технологијом приказана је у раду [Geueke, 2021]. Тополошка оптимизација алата урађена је у софтверу *Altair Optistruct* који је заснован на методи *SIMP*. Алат је оптимизован у две варијанте, за вредностима фактора запреминског ограничења 0,8 и 0,7. Поред две варијанте тополошки оптимизованог алата израђених адитивном производњом направљен је и алат од пуног материјала (100% испуна), као и један класичан алат направљен од челика обрадом резањем. На сваком од алата за дубоко извлачење гумом израђена су 64 дела од челичног лима *DC04*. Операција обликовања лима је успешно изведена са свим алатима што је потврда да је могуће користити полимерне алате израђене АП технологијом за производњу малих серија. Одступања су уочена на свим полимерним алатима на радијусу савијања, а највећа одступања уочена су на тополошки оптимизованом алату са највећим степеном оптимизације. На основу резултата истраживања закључено је да су оптимизовани алати, са 30% смањеном запремином, погодни за израду малих серија. Изглед оптимизованих алата приказан је на слици 2.21.



Слика 2.21 Тополошки оптимизован алат са коефицијентом: а) 0,8 и б) 0,7 [Geueke, 2021]

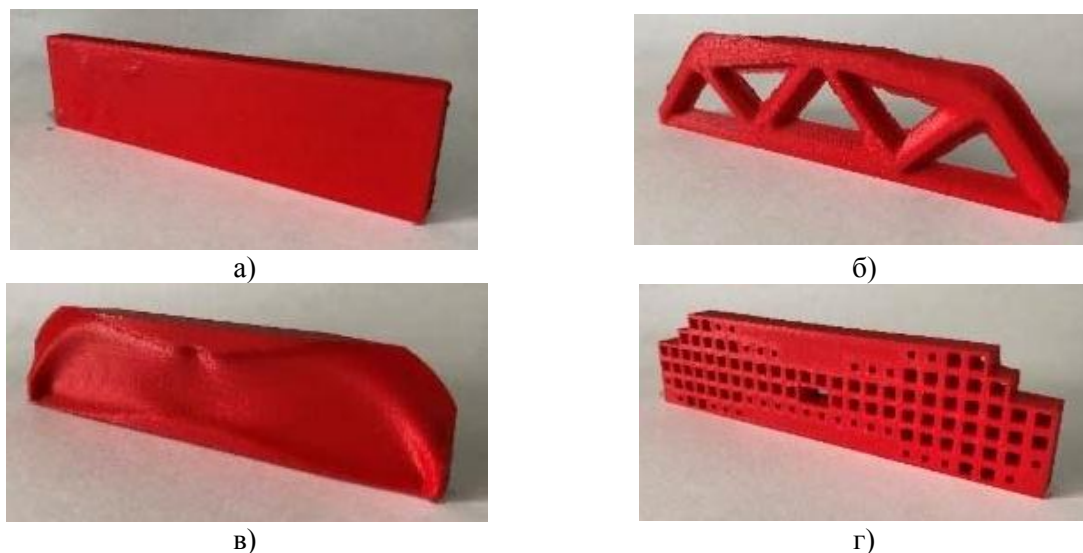
У студији [Хи, 2012] приказан је поступак оптимизације алата за обликовање лимова повишене чврстоће са циљем смањења масе. За оптимизацију је коришћена метода *SIMP* и разматрано је више услова оптерећења. Да би оптимизација била урађена са реалним условима разматрани су сви контакти између делова алата. Метода се заснива на одређивању оптерећења алата коришћењем методе коначних елемената као улазних параметара и ограничења за тополошку оптимизацију на основу које је редизајниран алат. Студија случаја је урађена за држач лима и резултат оптимизације је

смањивање масе држача за 28,1% (слика 2.22). Адитивном производњом направљена су два држача, оригиналан и тополошки оптимизован, како би се упоредила тачност добијених делова од лима. Мерењем делова од лима је утврђено да су делови добијени коришћењем обе варијанте држача задовољили геометријску тачност тј. да је резултат оптимизације одговарајући.



Слика 2.22 Тополошки оптимизован држач лима: а) током оптимизације у софтверу и б) после израде [Хи, 2012]

Примена *SIMP* методе тополошке оптимизације са приступом променљиве дебљине за оптимизацију раванских делова приказана је у истраживању [Kandemir, 2018]. Испитивања су урађена експериментално и нумерички. Оптимизован је носач који је приказан на слици 2.23.

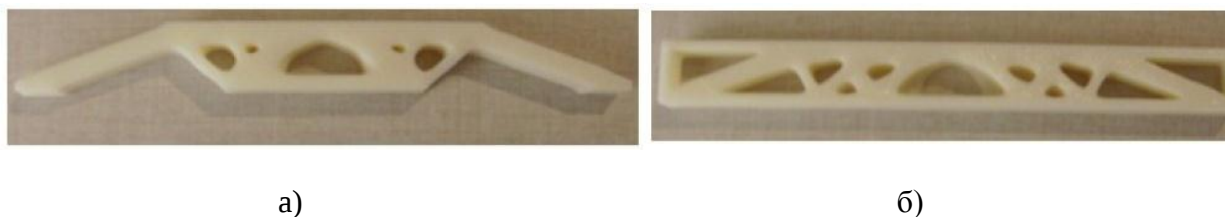


Слика 2.23 Испитани делови: а) пун б) структура са штаповима в) структура променљиве дебљине и г) микроструктура [Kandemir, 2018]

Разматрани део је оптимизован коришћењем различитих приступа тополошке оптимизације и њени резултати су извезени као *stl* фајл и направљени на 3D штампачу. Коришћена су два материјала, *ABS* произвођача *Ultimaker* и *Onyx* произвођача *Markforged*. Разматрано је осам облика структуре, експериментално и нумерички, и делови су оптерећени силом која ће изазвати угиб од 3 mm. На крају су упоређене

вредности силе потребне да изазову жељени угиб и однос сила/маса. Разматрано је осам варијанти: узорак направљен са 100% испуном, са 50% испуном, узорак *P3T* – фактор пенализације 3 и штапови, узорак *P3S* – фактор пенализације 3 и променљива дебљина, узорак *P1T* – фактор пенализације 1 и штапови, узорак *P1SH* – фактор пенализације 1 и приступ променљиве дебљине хоризонтално штампан, узорак *P1SV* – фактор пенализације 1 и приступ променљиве дебљине вертикално штампан, узорак *M* – микроструктура тј. подела дела на мање целине. Неки облици тополошки оптимизованих структура приказани су на слици 2.23. Сви узорци су направљени са дебљином слоја 0,1 mm и пречником млазнице 0,3 mm. За све варијанте сила је у случају *ABS*-а већа за 20% у односу на делове од *Onyx*-а што је и очекивано због механичких карактеристика материјала. После анализе односа сила/маса дела закључено је да је најповољнији однос постигнут за варијанту *P1T* што значи да је примена приступа променљиве дебљине оправдана. Овакав приступ је интересантан јер је у случају алата за савијање раванска анализа са променљивом дебљином оправдана.

У студији [Krishna, 2017] приказана је тополошка оптимизација греде ослоњене са обе стране и оптерећене на средини, применом *SIMP* методе и два приступа. У првом приступу је цела греда дефинисана као простор за оптимизацију (*Design region*) док је у другом један део запремине дефинисан као регион који неће бити оптимизован (*Non design region*). Оптимизација је урађена у софтверу *Altair optistruct*. На основу дефинисаних граничних услова и резултата добијених МКЕ анализом добијени су облици који су за потребе истраживања штампани *FDM* методом на уређају *Stratasys's Fortus 250mc*. У првом приступу запремина оптимизоване греде дела је износила 52% запремине почетне греде а у другом случају 70% (слика 2.24). Први приступ омогућава већу уштеду материјала и времена али даје мању крутост.

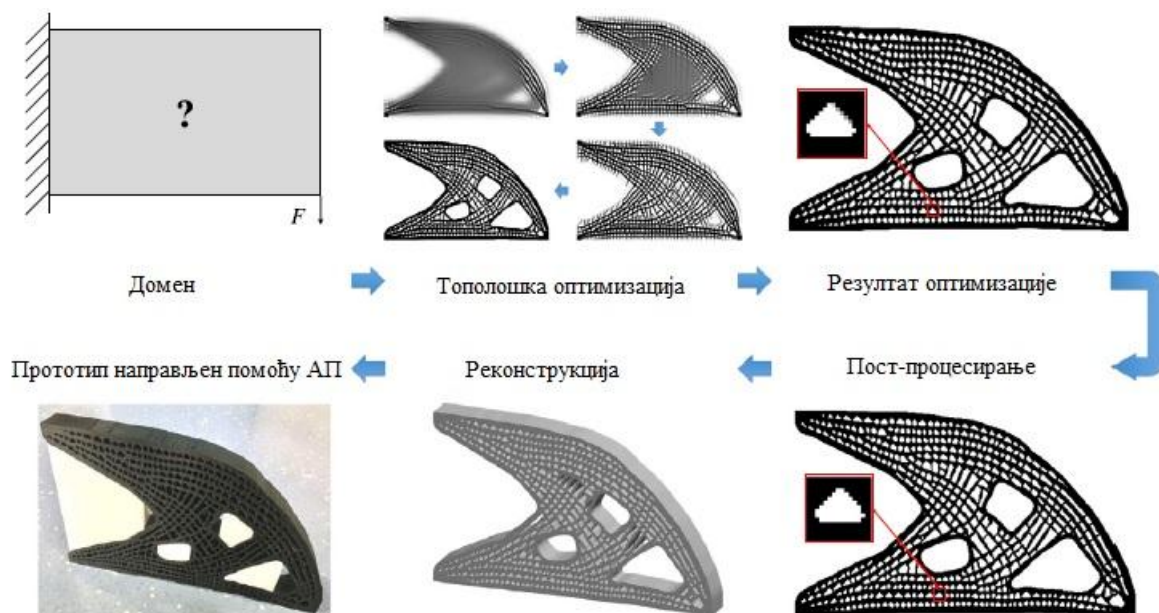


Слика 2.24 Греда оптимизована коришћењем: а) првог приступа и б) другог приступа [Krishna, 2017]

Тополошка оптимизација заснована на изогеоетријској анализи са коришћењем глобалног ограничења напона приказана је у [Liu, 2018]. Изогеоетријска анализа обједињује геометријски опис, анализу и оптимизацију инжењерских структура. За представљање комплексних *CAD* облика доминантно се користи *B-spline*. Метода је заснована на принципима *SIMP* методе и њен оквир обухвата моделирање, структурну анализу напонског стања и оптимизацију. Метода *IGA-SIMP* прецизније раздваја подручја оптимизације него *MKE-SIMP* и има мање степени слободе и краће време прорачуна. *IGA-SIMP* метода представља интеграцију *CAD*, *CAE* и оптимизације облика.

Тема рада [Zhou, 2022] је тополошка оптимизација танкозидних структура са циљем избегавања употребе потпорних структура при адитивној производњи. Коришћен је приступ густине и прецизна контрола препуста. Суштина методе је истовремено коришћење контроле препуста и дефинисање поља тако да се добије задовољавајуће поклапање између танкозидне структуре и облика испуне да би употреба потпорних структура била избегнута. Приступ дефинисан у овом раду (слика

2.25) је применљив за равanske проблеме (2.5D) док ће примена на просторним (3D) структурама бити изазов за даљи рад. Резултат тополошке оптимизације је реконструисан модел са границама, помоћу којег је могуће контролисати највећу вредност од 45° како би модел могао да буде штампан без потпорних структура.



Слика 2.25 Ток процеса оптимизације танкозидних структура [Zhou, 2022]

У истраживању [Yoon, 2021] представљена је примена методе густине са филтером сенке који омогућава да се ограничење препуста разматра истовремено као и оптимизација угла штампања. Да би анизотропија била разматрана, угао штампања сваког слоја се симултано оптимизује са оптимизацијом топологије дела. Разматрањем угла штампања као параметра оптимизације добија се део који поред оптимизоване топологије има дефинисан угао штампања за сваки слој тако да механичке карактеристике дела буду оптималне. Метода је нумерички потврђена на неколико примера са различитим угловима штампања.

3. Еластична повратност код угаоног савијања лимова и принципи њене компензације уз примену напредних технологија виртуелног инжењеринга

Савијање лима је технолошка операција обраде метала деформисањем којом се добијају делови различитог облика [Вујовић, 1990]. Обрада лима савијањем је веома заступљена у савременој индустрији и користи се у различитим гранама индустрије: аутомобилској, индустрији кућних апарата, индустрији намештаја. Користи се у малосеријској и великосеријској производњи. Савијање се у пракси најчешће комбинује са осталим процесима обраде лима попут просецања, пробијања, извлачења и других [Мусафија, 1988]. Комбиновање савијања делова и заваривања се често користи да би на тај начин били направљени делови који могу да замене ливене јер су такви делови лакши и јефтинији.

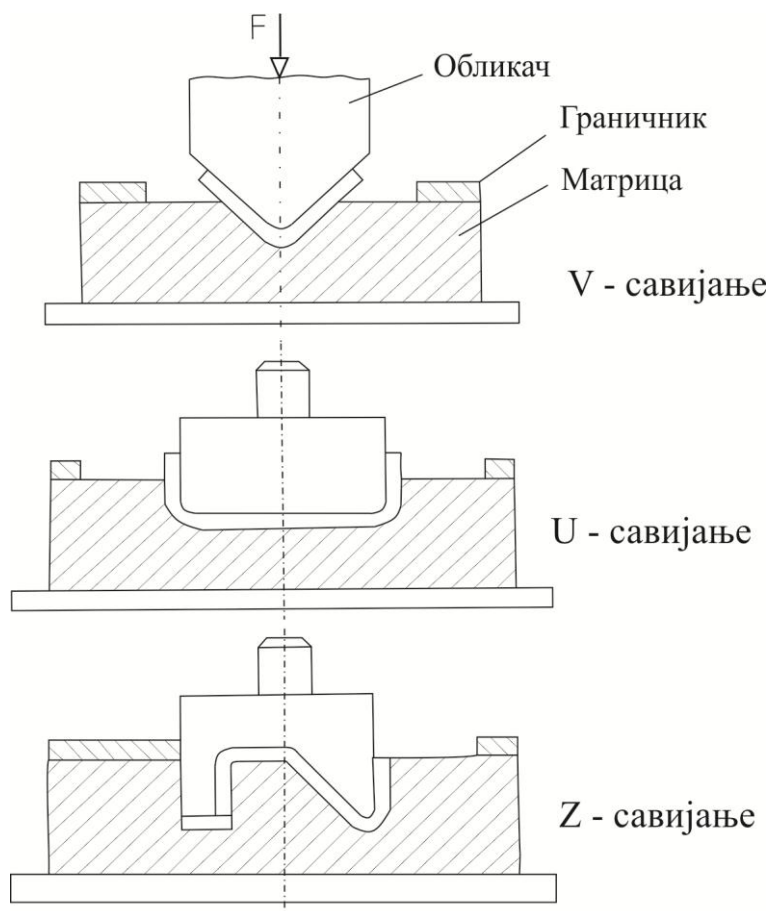
Према технолошким карактеристикама, димензијама и облику комада процес савијања се може поделити на:

- савијање лима у специјално конструисаном алату на различитим врстама универзалних преса (механичке, хидрауличне, фриксione),
- савијање лима на пресама за савијање профила (апкант пресе),
- кружно савијање лима на ваљцима (специјалне ротационе машине за савијање),
- савијање лима и уских трака (специјалне машине за савијање).

У оквиру овог поглавља разматрани су случајеви савијања лима на универзалним пресама. У одељцима који следе приказане су основе угаоног савијања лима, еластичног исправљања као и начини процене и компензације еластичног исправљања лима. Карактеристика савијања на универзалним пресама је да се за сваку операцију конструише алат за савијање и да је деформисање локално односно да се врши преко малог радијуса. Свако савијање лима у алатима назива се угаоно савијање. Алати за обраду савијањем имају сличности са алатима за просецање и пробијање лима. Алат за савијање лима се састоји од горњег и доњег дела алата, вођица, рукавца за везу са машином и два главна радна елемента (матрице и обликача). Савијањем се обликују лимови различитих дебљина у распону 0,01 mm – 100 mm [Девеџић, 1981].

3.1 Угаоно савијање лима

Према облику савијеног лима разликујемо *U*, *V* и *Z* савијање [Александровић, 2010]. Поменути облици савијања приказани су на слици 3.1. Број операција савијања зависи од облика и сложености дела.



Слика 3.1 Основни начини угаоног савијања [Александровић, 2010]

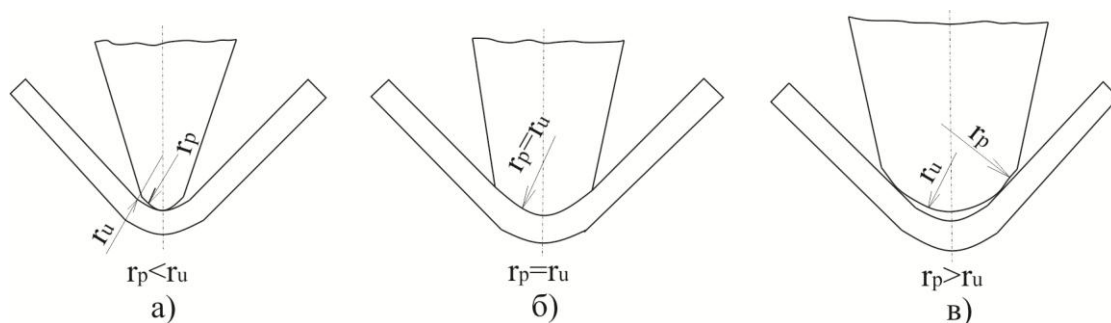
Главна особина угаоног савијања је да се деформисање лима реализује локализовано, само у зони савијања. Главни геометријско-технолошки параметри процеса савијања су полупречник и угао савијања [Девеџић, 1981]. У индустријској пракси највише се користе двоугаоно (U) и једноугаоно (V) савијање.

Једноугаоно савијање може бити урађено као;

- слободно савијање,
- савијање са поравнавањем и
- савијање са калибрисањем.

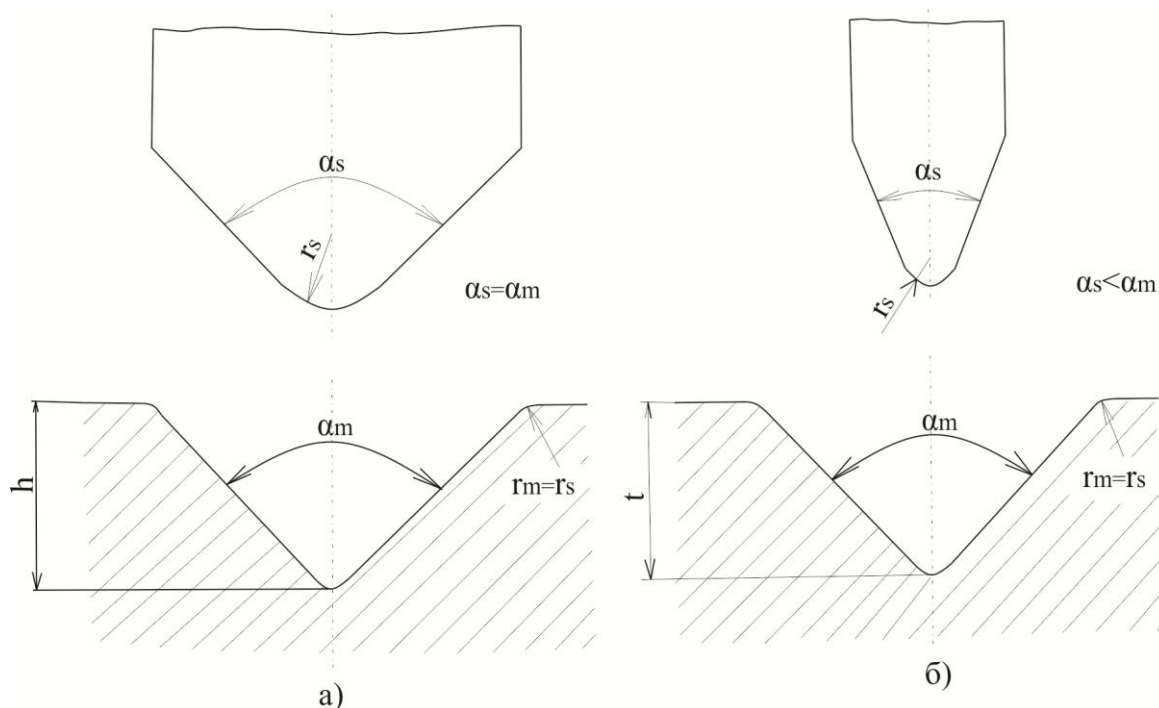
Карактеристика слободног савијања у затвореном алату је да је крај процеса у тренутку када су стране савијеног лима паралелне страницама матрице. У овом случају полупречник обликача (r_p) је мањи од полупречника заобљења савијаног дела (r_u). Савијање са поравнавањем је слично слободном савијању с тим што у овом случају долази до делимичног калибрисања радијуса заобљења и страница лима које належу на странице обликача и матрице. Савијање са калибрисањем је случај када долази до савијања материјала по дебљини и карактеристика овог случаја је да долази до значајног пораста вредности силе савијања. У односу на вредност деформационе силе, сила калибрисања је обично три до пет пута већа. Деформациона сила код слободног савијања је мања него у случају савијања са поравнавањем и калибрисањем али је тачност у другом и трећем случају значајно већа па се због тога такви начини савијања чешће примењују.

Приликом дефинисања геометрије алата треба размотрити однос радијуса заобљења обликача према радијусу савијања. Постоје три могућа односа ова два полупречника ($r_p < r_u$, $r_p = r_u$, $r_p > r_u$) и у зависности од овог односа контакт лима и обликача ће се разликовати (слика 3.2).



Слика 3.2 Различите могућности односа полупречника заобљења обликача и полупречника савијања: а) $r_p < r_u$ б) $r_p = r_u$ в) $r_p > r_u$ [Девеџић, 1981]

Угао обликача и угао матрице могу имати исту вредност (слика 3.3а) или угао обликача може бити мањи (слика 3.3б). Када је у питању серијска производња први случај је извеснији јер на тај начин се гарантује већа тачност. Код слободног савијања угао обликача је обично мањи, а у пракси се бира тако да буде $0,5^\circ$ – 1° мањи од угла матрице.

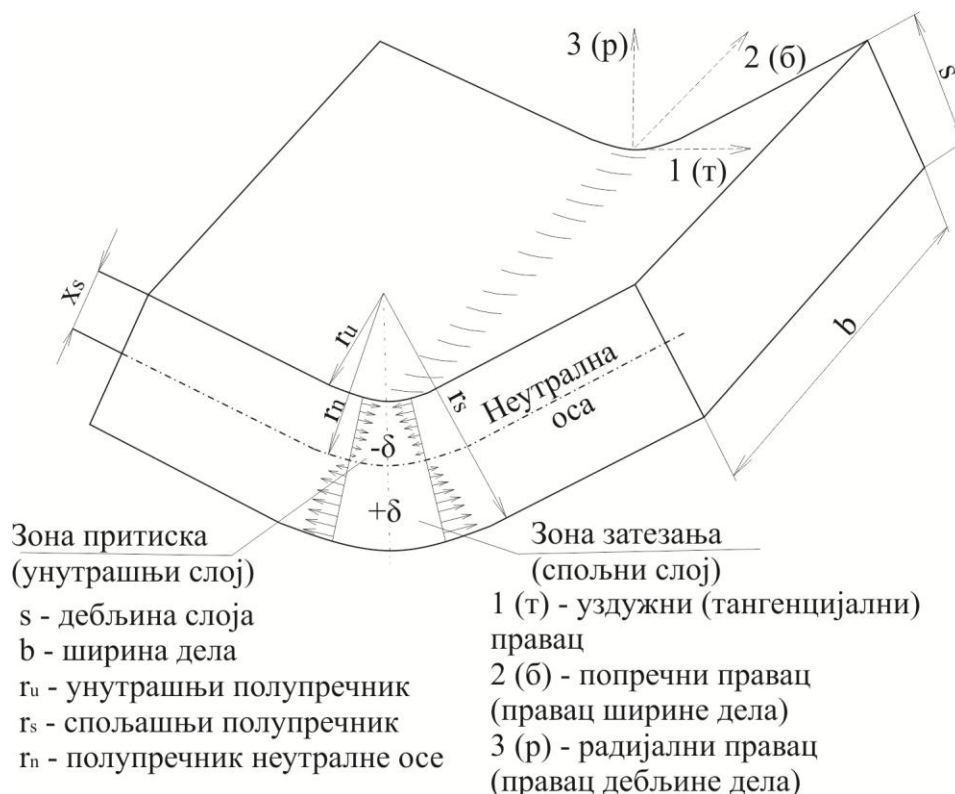


Слика 3.3 Могући односи угла обликача и матрице: а) $\alpha_s = \alpha_m$ б) $\alpha_s < \alpha_m$ [Девеџић, 1981]

Приликом савијања у почетку је лим у контакту само са обликачем и тек у крајњој фази належе на површине обликача и матрице.

За анализу процеса савијања потребно је познавати напонско-деформационе односе у зони савијања. Када се посматра пресек лима током савијања (слика 3.4) види се да је у горњем делу који је ближи обликачу материјал изложен притисном оптерећењу које је веће у горњим слојевима. У доњем делу у материјалу се јављају затежући напони. Између ова два подручја налази се неутрални слој у коме нема

промене дужине влакана и чија се дужина током савијања не мења. Тангенцијални напони у овом слоју су једнаки нули. Од неутралног слоја, где су деформације једнаке нули, па до површина лима у оба правца вредност деформације расте.



Слика 3.4 Положај неутралног слоја и деформационе зоне током савијања
[Девеџић, 1981]

Према теорији пластичности при обради савијањем влада троосно напонско стање али ако је однос ширине и дебљине лима већи од пет ($b/s > 5$) деформација у правцу ширине се занемарује. Код уских делова ($b/s < 5$) деформација по ширини није занемарљива и мора се узети у обзир, с тим да је овакав случај у индустријској пракси редак. Због свега наведеног проблем савијања лима може да се посматра као равански.

За одређивање димензија развијеног стања и најмањег полупречника савијања потребно је знати положај неутралне осе. Дужина неутралне осе се не мења током савијања и може бити одређена коришћењем емпиријских образаца. У случају када је полупречник савијања велики сматра се да положај неутралног слоја одговара средини пресека односно

$$r_n = r_u + s/2, \quad 3.1$$

где су r_n и r_u полупречник неутралног слоја и полупречник савијања, респективно. Овај образац се користи за све случајеве када је дебљина лима мања од 1 mm. При малим полупречницима савијања деформише се попречни пресек и неутрални слој се помера према контакту обликача и лима тј. према притиснутој зони. Полупречник неутралног слоја се одређује коришћењем емпиријских образаца у којима се користи коефицијент померања неутралног слоја x . Коефицијент померања неутралног слоја рачуна се на основу образаца:

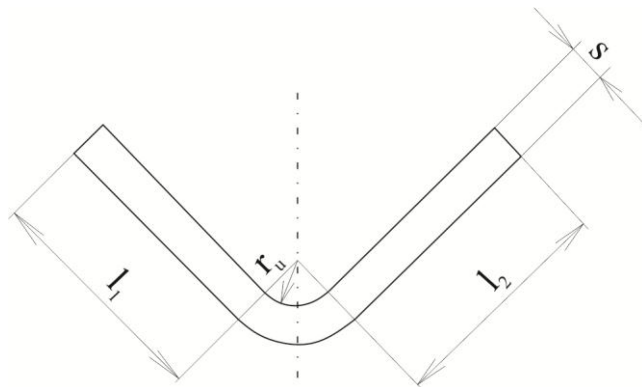
$$x_S = r_n - r_w, \quad 3.2$$

односно

$$x = \frac{r_n - r_u}{s}. \quad 3.3$$

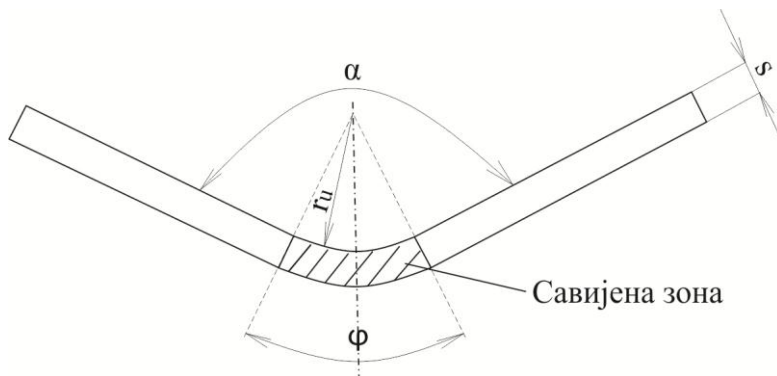
На основу положаја неутралног слоја и димензија дела може бити одређена дужина развијеног стања. За пример једноугаоног савијања са слике 3.5 дужина развијеног стања се рачуна према обрасцу:

$$L = l_1 + l_2 + l_n = l_1 + l_2 + \frac{\pi}{2}(r_u + xs). \quad 3.4$$



Слика 3.5 Једноугаоно савијање [Девеџић, 1981]

Вредности за дужину неутралног слоја на савијеном делу су у литератури дате табеларно за најчешће коришћене типове савијања за вредност угла од 90° [Девеџић, 1981]. Да би та дужина била израчуната потребно је објаснити појмове угла савијања и угла савијене зоне. Приказ ова два угла дат је на слици 3.6. На основу података из литературе за прав угао могуће је добити вредност дужине за жељени угао множећи вредност из табеле са $\phi/90$ [Девеџић, 1981].



Слика 3.6 Угао савијања и угао савијене зоне [Девеџић, 1981]

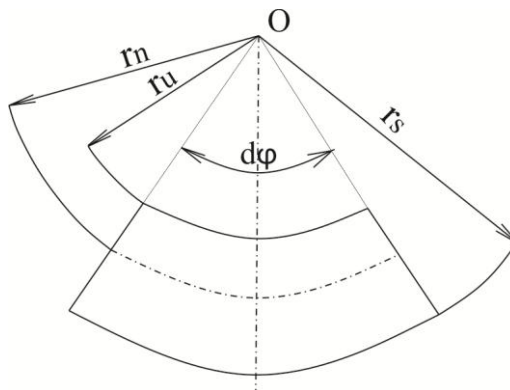
При прорачуну операција савијања лима потребно је дефинисати минималне и максималне полупречнике савијања. Мањим полупречницима савијања постиже се већа крутост али ако се савијање уради са превише малим полупречником може доћи до разарања лима у спољашњој зони. Величина минималног унутрашњег полупречника савијања r_{umin} зависи од карактеристика материјала и геометрије савијеног дела тј. од механичких карактеристика материјала, оријентације лима у односу на правац ваљања и угла савијања [Девеџић, 1981].

Ако се посматра спољашња површина на елементарном исечку лима (слика 3.7) издужење је једнако:

$$\varepsilon_{r_s} = \frac{r_s d\varphi - r_n d\varphi}{r_n d\varphi} = \frac{r_s}{r_n} - 1, \quad 3.5$$

или у логаритамском облику

$$\varphi = \ln \frac{r}{r_n}. \quad 3.6$$



Слика 3.7 Елементарни исечак [Девеџић, 1981]

Минимални полупречник савијања може бити преузет из разних приручника за конструкцију алата и пројектовање технологије али такве резултате треба схватити условно. У сваком случају вредност одабраног полупречника савијања треба да буде већа од израчунатог минималног полупречника. Образац који се у пракси често користи представља зависност минималног полупречника савијања од дебљине материјала:

$$r_{umin} = cs, \quad 3.7$$

где c представља коефицијент који зависи од карактеристика материјала [Девеџић, 1981]. Поред овог Ојлеровог (*G. Oehler*) обрасца користи се израз који је дефинисао Мекелт (*H. Makelt*) за лаке метале. Препоруке за вредност коефицијента c дате су у литератури [Мусафија, 1988] и приказане у табели 3.1.

Табела 3.1 Препоруке за фактор c [Мусафија, 1988]

Ознака материјала - стандард JUS	Фактор c
Č0210	1,5
Č0300	1,8
Č0400	2
Č0145	0,6
Č0146	0,5
Č0147	0,5
Č0148	0,5

Поред минималног полупречника треба дефинисати и максималну вредност полупречника савијања. Максимални полупречник савијања је вредност која гарантује да ће у спољашњим влакнима материјала доћи до појаве пластичне деформације и рачуна се према обрасцу [Мусафија, 1988]:

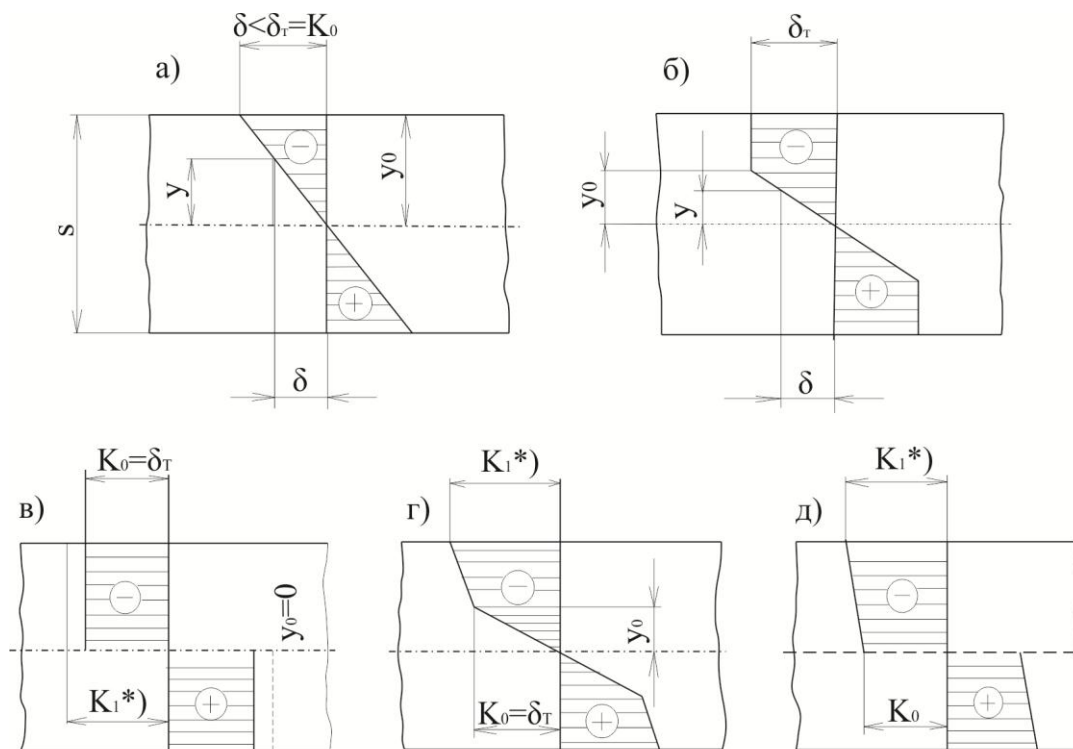
$$r_{max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p} \quad 3.8$$

Закључак је да пројектовани полупречник заобљења мора бити у опсегу

$$r_{min} < r < r_{max}, \quad 3.9$$

Вредности полупречника савијања мање од минималног довешће до пуцања лима у спољашњим влакнима а веће вредности од максималне до ситуације да пластичне деформације уопште неће настати.

С обзиром да се тема рада односи на процену еластичне повратности при савијању лима неопходно је објаснити дистрибуцију напона који настају у зони савијања. На слици 3.8 приказано је шематски пет могућих распореда нормалних напона. На слици 3.8а приказан је случај чисто еластичног савијања, на слици 3.8б еластично-пластичног савијања када су у околини неутралне осе еластичне деформације. На слици 3.8в је приказана расподела напона при чисто пластичном савијању, а на слици 3.8г при еластично-пластичном савијању са ојачањем, док је на слици 3.8д приказана напонска шема при чисто пластичном савијању са ојачањем.



K_0 - деформациони отпор на почетку пластичног деформисања
 K_1 - највећа вредност деформационог отпора

Слика 3.8 Расподела нормалних напона по дебљини савијеног лима: а) чисто еластично савијање б) еластично пластично савијање в) чисто пластично савијање г) еластично-пластично савијање са ојачањем д) чисто пластично савијање са ојачањем [Девеџић, 1981]

Који од наведених распореда напона ће важити у одређеном случају савијања највише зависи од односа r_u/s . За велике вредности овог односа савијање је потпуно еластично затим прелази у еластично-пластично подручје и на крају постаје чисто

пластично. Закључак еминентних истраживача ([Девеџић, 1981], [Мусафија, 1988]) је да је граница чисто пластичног савијања при вредности односа $r_u/s < 5$ тј. да у овом случају се сматра да су напони у области пластичности. Дуж савијених влакана делују нормални уздужни напони а управно на њих радијални нормални напони. Утицај радијалних нормалних напона у савијеној зони је релативно мали осим у случају када је $r_u/s < 5$, тада се положај неутралне осе примиче зони притиска.

Због свега наведеног потребно је размотрити два случаја напона, напоне при чисто пластичном и еластично пластичном савијању. На слици 3.9 приказани су напони у слоју савијене зоне. Приказана су два елементарна слоја и тангенцијални и радијални напони који делују. Средњи главни напон има вредност:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2}. \quad 3.10$$

Једначина равнотеже за слој I гласи:

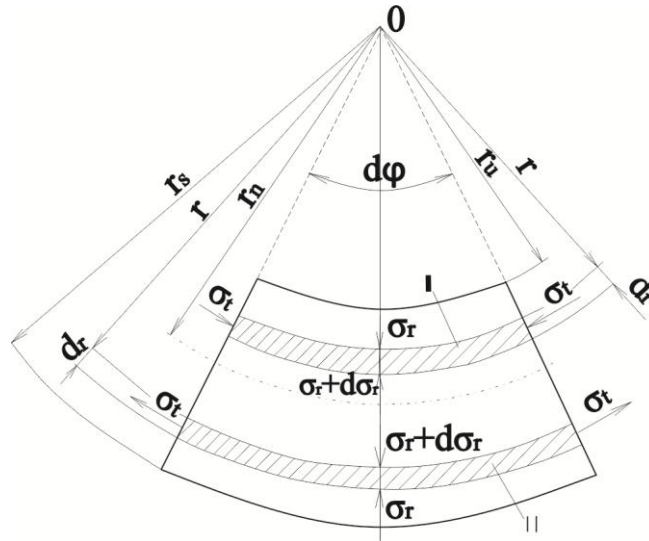
$$\sigma_r r d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi + 2\sigma_t dr \sin \frac{d\varphi}{2} = 0. \quad 3.11$$

Када се уведе да је $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и $d\sigma_r dr = 0$ добија се диференцијална једначина равнотеже [Девеџић, 1981]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0. \quad 3.12$$

Енергетски услов пластичности гласи [Девеџић, 1981]:

$$\sigma_t - \sigma_r = \pm \beta K. \quad 3.13$$



Слика 3.9 Шема деловања напона у савијеној зони [Девеџић, 1981]

Сређивањем једначине равнотеже добијамо изразе за напоне у различитим зонама:

а) у зони затезања

$$\sigma_t - \sigma_r = \beta K \quad 3.14$$

или

$$\sigma_r - \sigma_t = -\beta K, \quad 3.15$$

б) на неутралном слоју

$$\sigma_{rn} = -\beta K \ln \frac{r_s}{r_n}, \quad 3.16$$

$$\sigma_{tn} = \beta K \left(1 - \ln \frac{r_s}{r_n} \right) = \beta K + \sigma_{rn}. \quad 3.17$$

в) у зони притиска

$$\sigma_t - \sigma_r = -\beta K \quad 3.18$$

или

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta K, \quad 3.19$$

односно

$$\sigma_r = -\beta K \ln \frac{r}{r_u}, \quad 3.20$$

$$\sigma_t = -\beta K \left(1 + \ln \frac{r}{r_u} \right) = -\beta K + \sigma_r. \quad 3.21$$

У горе наведеним изразима користи се деформациони отпор K . Вредност деформационог отпора K није константна већ се изражава у зависности од деформације. У линеарном облику ова зависност гласи:

$$K = K_0 + M \varepsilon_t, \quad 3.22$$

где је са K_0 означен деформациони отпор на почетку савијања а M константа која представља модул ојачавања материјала [Девеџић, 1981]. С обзиром да деформацију у тангенцијалном правцу можемо израчунати по обрасцу

$$\text{у зони затезања} \quad \varepsilon_t = \frac{r - r_n}{r_n}, \quad 3.23$$

$$\text{и у зони притискивања} \quad \varepsilon_t = \frac{r_n - r}{r_n}. \quad 3.24$$

Деформациони отпор K се рачуна према изразима:

$$\text{у зони затезања} \quad K = K_0 + M \frac{r - r_n}{r_n} = K_0 + M \left(\frac{r}{r_n} - 1 \right) \quad 3.25$$

$$\text{и у зони притискивања} \quad K = K_0 + M \left(1 - \frac{r}{r_n} \right). \quad 3.26$$

С обзиром да се положаји неутралних оса, напонске и деформационе, не поклапају, па се сравњивањем израза за радијалне напоне у зонама притиска и затезања добија образац за положај неутралног напонског слоја:

$$r_{n\sigma} = \sqrt{r_s r_u}. \quad 3.27$$

Сматра се да је савијање еластично-пластично када је однос $r_u/s > 5$ и у том случају експериментално је одређено да вредност радијалног напона износи 10% деформационог отпора па се због тога утицај радијалног напона занемарује.

Да би било могуће одредити деформациону силу савијања потребно је одредити моменте савијања. Момент савијања спољних сила се одређује на основу свих сила које делују на лим и једнак је моменту унутрашњих сила:

$$M = M_\sigma = \int_A y dF = \int_A y \sigma dA, \quad 3.28$$

где је у растојање тежишта посматраног елемента од неутралне осе, dA површина елемента и σ је уздужни напон у посматраном елементу. Као и у претходном, потребно је размотрити два случаја, чисто пластично и еластично-пластично савијање.

Момент у случају еластично-пластичног савијања једнак је збиру момената у зони еластичности и зони пластичности [Девеџић, 1981]. Дебљина зоне еластичности је $2y_0$ и напони у њој су променљиви. Напони у зони пластичности једнаки су напону на граници течења. Укупна вредност момента једнака је:

$$M_\sigma = 2 \int_0^{y_0} y \sigma dA + 2 \sigma_t \int_{y_0}^{s/2} y dA. \quad 3.29$$

На основу Хуковог закона постоји пропорција:

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{y}{y_0} \rightarrow \sigma = \sigma_t \frac{y}{y_0}, \quad 3.30$$

па израз за момент после замене гласи:

$$M_\sigma = \sigma_t \left(\frac{2}{y_0} \int_0^{y_0} y^2 dA + 2 \int_{y_0}^{s/2} y dA \right), \quad 3.31$$

где први члан у загради означава отпорни момент пресека који је еластично деформисан а други је статички момент пластично деформисаног дела пресека. Релативна деформација елементарног влакна је дефинисана изразом

$$\varepsilon = \frac{r - r_n}{r_n} = \frac{y}{r_n}, \quad 3.32$$

па ће коначни облик обрасца за момент код еластично-пластичног савијања бити:

$$M_\sigma = \frac{\sigma_t b}{12} \left(3s^2 - \left(\frac{2\sigma_t r_n}{E} \right)^2 \right). \quad 3.33$$

У случају чисто пластичног савијања момент унутрашњих сила се одређује на основу центра кривине:

$$M_{\sigma} = \left(\int_{r_n}^{r_s} \sigma_t r dr + \int_{r_u}^{r_n} \sigma_t r dr \right) b, \quad 3.34$$

а после коришћења израза за σ_t гласи:

$$M_{\sigma} = \beta K b \left(\frac{r_n^2}{2} \ln \frac{r_s r_u}{r_n^2} + \frac{r_s^2 - 2r_n^2 + r_u^2}{4} \right). \quad 3.35$$

После замене вредности полупречника неутралног слоја $r_n = \sqrt{r_u r_s}$ добија се коначни облик обрасца за момент:

$$M_{\sigma} = \beta K \frac{b s^2}{4}. \quad 3.36$$

Када се узме у обзир стварни утицај ојачања и уведе корекциони фактор ојачања коначни израз за момент је:

$$M_{\sigma} = n \sigma_M \frac{b s^2}{4}. \quad 3.37$$

Приказани обрасци се користе за одређивање деформационе силе савијања. Деформациона сила се одређује на основу услова једнакости момента спољашњих и унутрашњих сила. За сваки облик савијања (једноугаоно, двоугаоно) постоје два случаја, савијање са или без калибрисања.

Силу савијања одређујемо анализом деловања сила са слике 3.10 према којој се вредност момента одређује:

$$M = R f = \frac{F_s}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} f; \quad 3.38$$

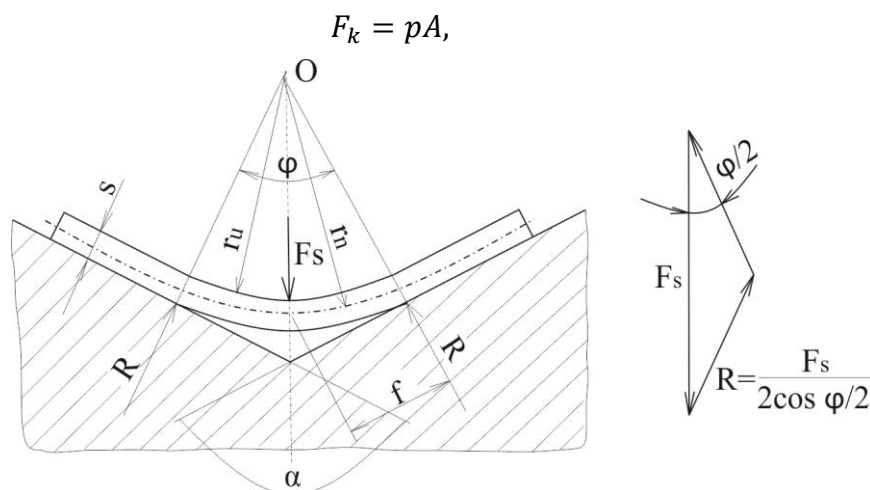
$$f \approx r_n \sin \frac{\varphi}{2}; \quad 3.39$$

$$M = \frac{F_s}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} r_n \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{F_s r_n}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}. \quad 3.40$$

На слици 3.10 сила савијања означена је са F_s , сила реакције у контакту лима и алата R , растојање између центра савијања и тачке деловања силе R са f и угао зоне савијања φ . Сила савијања се рачуна према обрасцу:

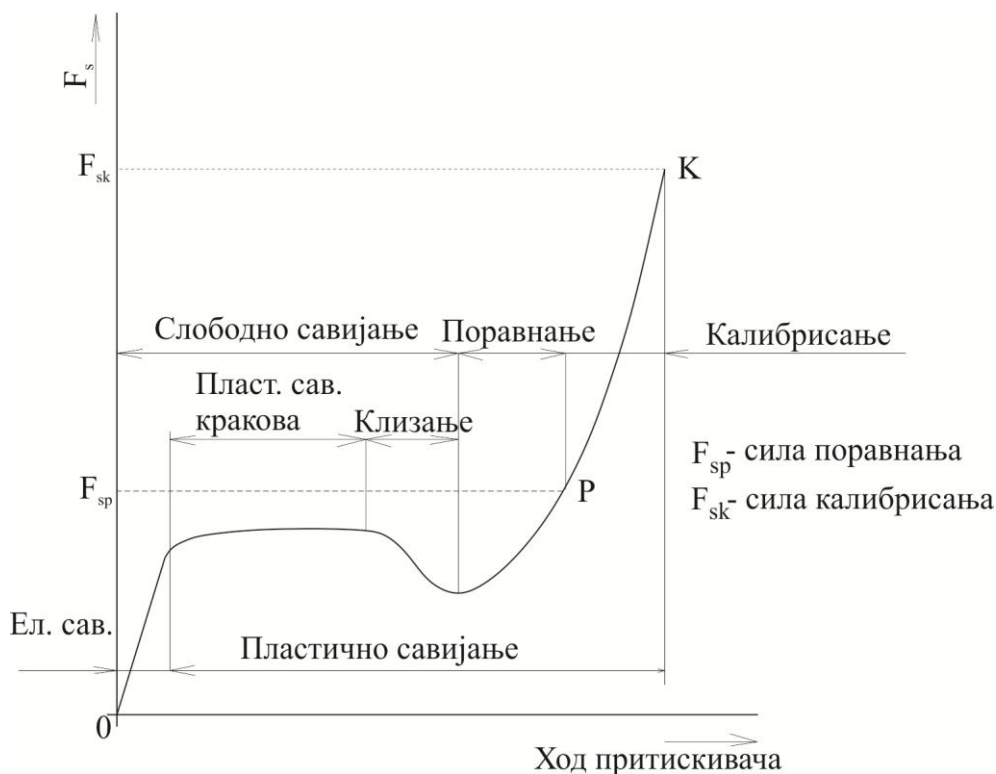
$$F_s = \frac{2M}{r_n} \operatorname{ctg} \varphi. \quad 3.41$$

У другом случају када постоји калибрисање долази до повећања деформационе силе и повећања тачности и смањења еластичног исправљања и тада се сила савијања рачуна према обрасцу:



Слика 3.10 Шема деловања сила при савијању у затвореном алату [Девеџић, 1981]

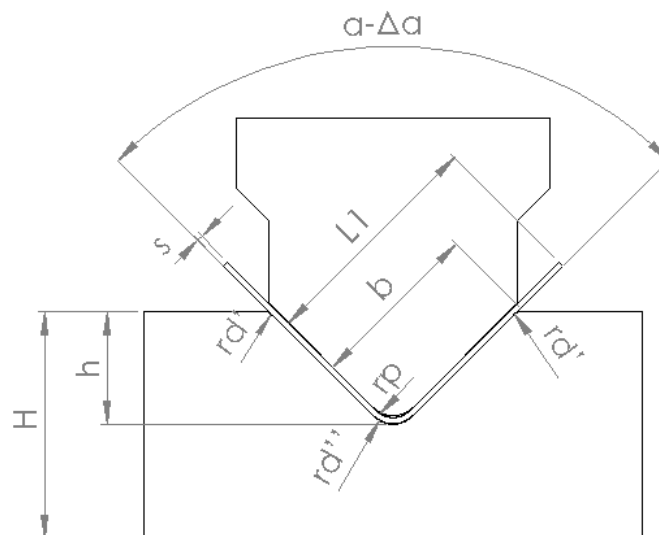
где су p специфични притисак калибрисања који зависи од врсте материјала и дебљине лима, а са A је означена контактна површина. Сила калибрисања је значајно већа од силе савијања током обликовања и може бити чак три до пет пута већа. Та разлика је приказана на слици 3.11 која описује промену силе при једноугаоном савијању. На дијаграму се види да почетни део дијаграма одговара еластичном савијању, затим следи пластично савијање кракова где вредност силе стагнира, мали пад силе који настаје због клизања кракова и на крају долази до раста силе због поравнања и калибрисања.



Битан услов за успешно савијање је правилно димензионисање алата. Главне геометријске карактеристике алата приказане су на слици 3.12. Свака од назначених димензија је дефинисана одређеним изразом у зависности од геометрије дела и

дебљине материјала. Препоруке за избор димензија дате су у табели 3.2 [Јовичић, 1980].

Све наведене технолошко – конструктивне карактеристике алата за савијање треба пажљиво израчунати. Искуства из праксе показују да крајњу одлуку доноси технолог односно да због специфичности производње може да дође до одређених одступања.



Слика 3.12 Димензије конструктивних елемената алата за једноугаоно савијање [Јовичић, 1980]

Препоручене вредности за полупречник заобљења и дужину b на матрици у зависности од дужине крака лима дате су у табели 3.3. Поред основних карактеристика алата потребно је размотрити тачност делова добијених савијањем. Највећи утицај на тачност делова имају [Јовичић, 1980]:

- механичке карактеристике материјала и њихова уједначеност (анизотропија),
- облик и димензије савијеног дела,
- број операција савијања,
- тачност дебљине лима,
- прецизност израде алата,
- врста алата за савијање,
- прецизност позиционирања припремке и
- правилно функционисање алата, међусобни положај обликача и матрице.

Табела 3.2 Препоруке за дефинисање геометријских вредности

Геометријска вредност	Вредност / израз
H	$\geq 20mm$
h	$\square = b \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - r_d'' \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2} - 1} \right)$
r_p	једнак или мањи од r_u , свакако већи од r_{min}
r_d'	$r_d' = (2 - 3)s$ или табела 3.3
r_d''	$r_d'' = (0,6 - 0,8) \cdot (r_u + s)$
$\alpha - \Delta\alpha$	израчуната вредност
b	табела 3.3

Табела 3.3 Препоручене вредности полупречника заобљења матрице и дужине b на матрици [Јовичић, 1980]

Дужина крака L_1 , mm	Дебљина лима s , mm							
	<0,5		0,5 - 2		2 - 4		4 - 5	
	r_d'	b	r_d'	b	r_d'	b	r_d'	b
10	3	6	3	10	4	10	-	-
20	3	8	4	12	5	15	8	20
35	4	12	5	15	6	20	8	25
50	5	15	6	20	8	25	10	30
75	6	20	8	25	10	30	12	35
100	-	-	10	30	12	35	15	40
150	-	-	12	35	15	40	20	50
200	-	-	15	45	20	55	25	65

Због наведених разлога уочава се да ће при савијању лима из исте табле једним истим алатом доћи до појаве одступања угла и радијуса савијања. Дозвољена одступања угла савијања и полупречника савијања дата су у табелама 3.4 и 3.5. Дозвољено одступање угла савијања дато је у зависности од врсте материјала и односа r_u/s који представља изузетно битан параметар при савијању.

Табела 3.4 Дозвољена одступања угла савијања [Јовичић, 1980]

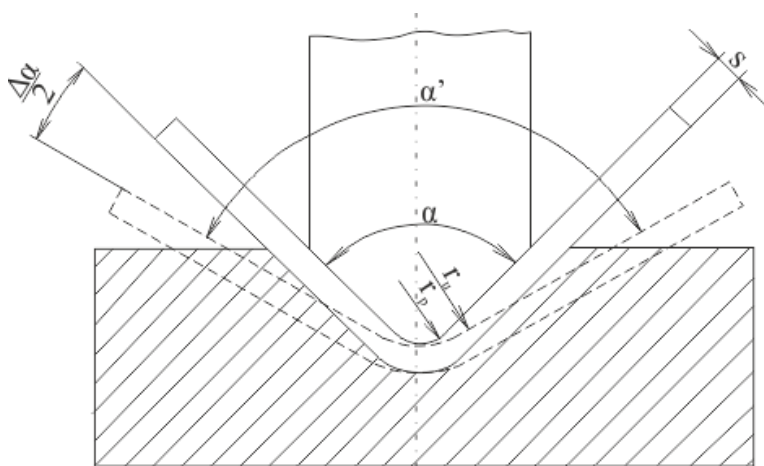
Материјал лима	Однос r_u/s		
	<1	1 - 2	2 - 4
Меки челик, меки месинг ($R_m=300$ МПа)	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ$
Челик средње чврстоће ($R_m=400$ МПа)	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 3^\circ$
Тврди челик ($R_m=600$ МПа) Полутврди месинг ($R_m=350$ МПа)	-	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$

Табела 3.5 Дозвољена одступања полупречника савијања [Јовичић, 1980]

Полупречник r , mm	<1	3 - 6	6 - 20	20
Одступање Δr , mm	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 3

3.2 Процена еластичне повратности и методе њене компензације

При пројектовању алата за савијање посебну пажњу треба обратити на еластичну повратност тј. еластично исправљање савијених делова. Према основама теорије пластичности укупна деформација се састоји од еластичне и пластичне. Престанком деловања силе еластична деформација нестаје. У случају савијања лима нестанак еластичне деформације значи да после вађења лима из алата долази до повећања угла и полупречника савијања (слика 3.13).



Слика 3.13 Промена угла савијања због еластичне повратности [Девеџић, 1981]

Што је удео еластичних деформација већи биће више изражена појава еластичне повратности. Највећи утицај на величину еластичног исправљања имају карактеристике материјала (модул еластичности) и однос полупречника савијања и дебљине лима r_u/s . Еластична повратност је директно пропорционална овом односу, па мањим вредностима количника одговара мањи удео еластичних деформација у укупној деформацији.

Угао еластичног исправљања представља разлику угла који заклапају кракови лима после исправљања и угла алата [Девеџић, 1981]. Његову вредност могуће је одредити експериментално и проценити аналитички. Вредност угла еластичног исправљања је значајно мања када је у питању савијање са калибрисањем него у случају слободног савијања. Вредност угла је дефинисана обрасцем:

$$\Delta\alpha = \alpha' - \alpha. \quad 3.43$$

Процена еластичног исправљања није једноставна због великог броја утицајних фактора. Најутуцајнији фактори на еластично исправљање лима су [Девеџић, 1981]:

- карактеристике еластичности материјала (пре свега модула еластичности и напона на граници течења),
- дебљина лима,
- облик дела,
- угао савијања,
- врста савијања (једноугаоно или двоугаоно),
- однос r_u/s односно степен деформације и
- степен калибрисања.

Процену је могуће направити на основу емпиријских формула, табела које су формиране на основу експеримената и нумеричких експеримената коришћењем МКЕ. Поред могућности процене еластичног исправљања у овом одељку биће представљене могућности компензације еластичне повратности пре свега одговарајућом конструкцијом алата.

У литератури постоји више емпиријских образаца за процену еластичног исправљања [Девеџић, 1981]. Вредност угла еластичног исправљања у случају једноугаоног и двоугаоног савијања се може проценити применом образаца по Романовском [Девеџић, 1981]:

а) за једноугаоно савијање

$$tg\Delta\alpha \approx 0,375 \frac{l}{k_s} \frac{R_p}{E}, \quad 3.44$$

б) и за двоугаоно савијање

$$tg\Delta\alpha \approx 0,75 \frac{l_1}{k_s} \frac{R_p}{E}, \quad 3.45$$

где су:

- k коефицијент положаја неутралног слоја који зависи од степена деформације и рачуна се као $k=1-x$, где је x коефицијент померања неутралног слоја;
- l растојање између ивица матрице;
- l_1 је ширина савијеног дела једнака $l_1=r_M+r_P+1,25s$,
- r_P и r_M су полупречници заобљења обликача и матрице;
- E модул еластичности и
- R_p напон на граници течења.

Рјабин [Девеџић, 1981] је дефинисао емпиријски образац за процену промене угла савијања где угао повратности зависи од односа r_u/s и угла савијања. За савијање под углом од 90° лимова од меких угљеничних челика (Č0260) израз је:

$$\Delta\alpha \approx 0,43 \frac{r_u}{s} - 0,61, \quad 3.46$$

а за челик Č0545:

$$\Delta\alpha \approx 0,79 \frac{r_u}{s} - 1,62. \quad 3.47$$

За угао савијања од 120° израчунату вредност треба смањити за четвртину (20-25%) а за угао 60° повећати за исту вредност.

Када је однос полупречника савијања и дебљине лима већи од десет ($r_u/s > 10$) поред угла повратности треба израчунати и полупречник заобљења обликача због великог удела еластичних деформација према обрасцима:

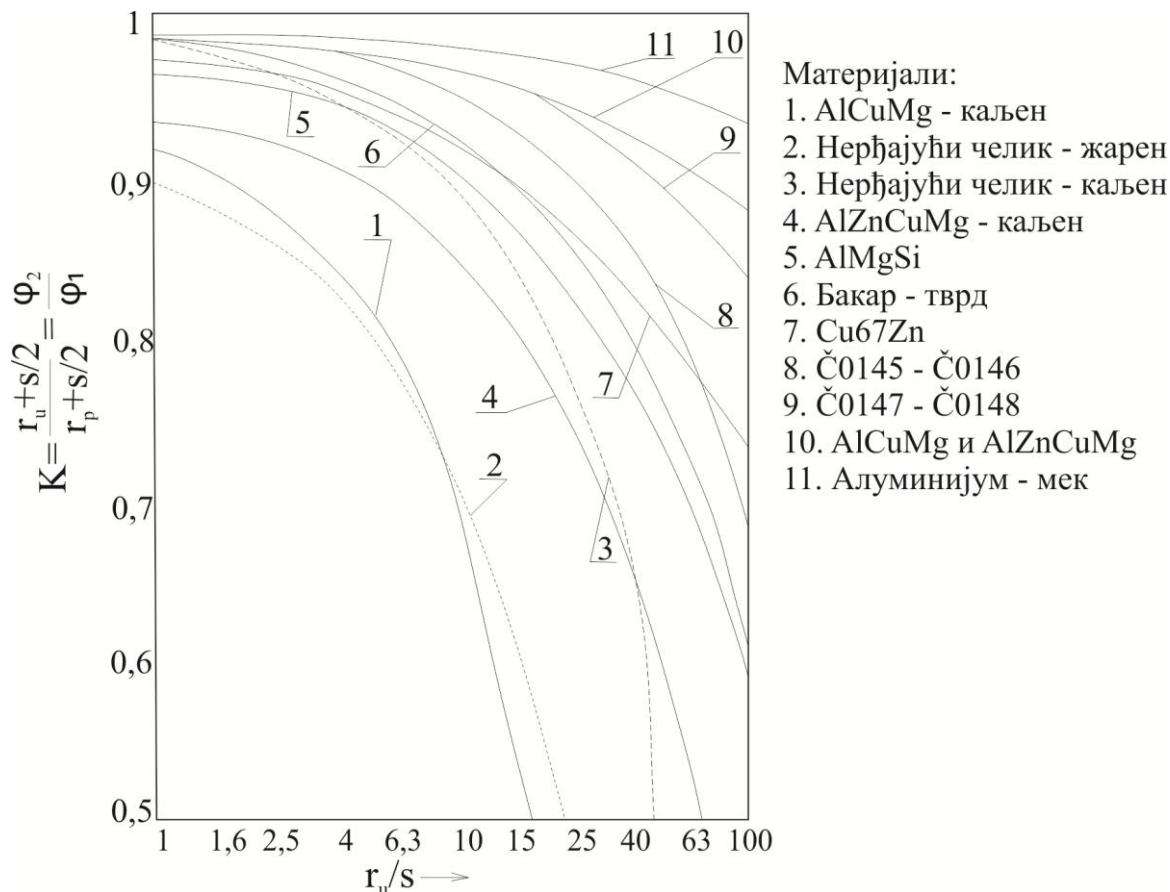
$$r_P = \frac{r_u}{1 + 3 \frac{R_p r_u}{E s}} = \frac{1}{\frac{1}{r_u} + 3 \frac{R_p}{E s}}; \quad 3.48$$

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha) \left(\frac{r_u}{r_P} - 1 \right). \quad 3.49$$

Поред емпиријских образаца користе се табеларни подаци и дијаграми који су добијени експерименталним путем. Прва метода процене која је представљена на основу дијаграма је према Саксу (*G. Sachs*) [Sachs, 1966]. За одређивање угла уведен је фактор еластичног исправљања K [Мусафија, 1988]:

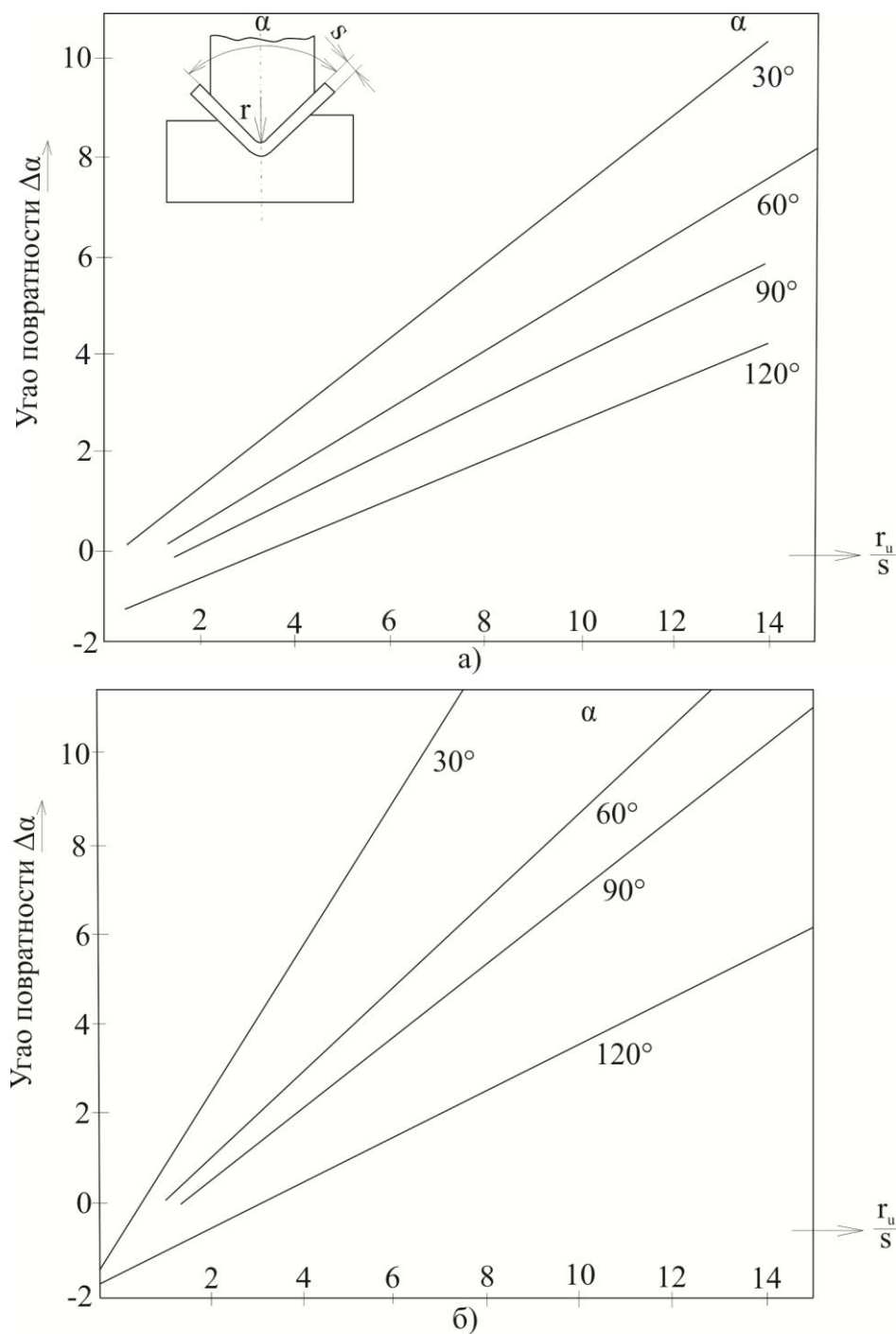
$$K = \frac{r_u + \frac{s}{2}}{r_p + \frac{s}{2}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{180^\circ - \alpha'}{180^\circ - \alpha}. \quad 3.50$$

Вредност фактора еластичног исправљања зависи од врсте материјала и односа r_u/s . Вредност фактора K читава се са дијаграма приказаног на слици 3.14. Фактор је могуће одредити за вредности односа r_u/s од 1 до 100 за једанаест наведених материјала.



Слика 3.14 Дијаграм за читавање фактора еластичног исправљања K
[Мусафија, 1988]

Поред методе Сакса (*G. Sachs*) у литератури постоје и други дијаграми чијим коришћењем је могуће одредити вредност угла исправљања. На слици 3.15 приказани су дијаграми за одређивање угла повратности при савијању лимова од нискоугљеничних челика и челика који имају затезну чврстоћу у распону 400÷600 МПа у зависности од предвиђеног угла савијања и односа r_u/s .



Слика 3.15 Дијаграми за одређивање угла повратности: а) за нискоугљеничне челике (Č0146) б) за угљеничне челике са затезном чврстоћом 400-600 МПа (пример Č0460) [Малов, 1963]

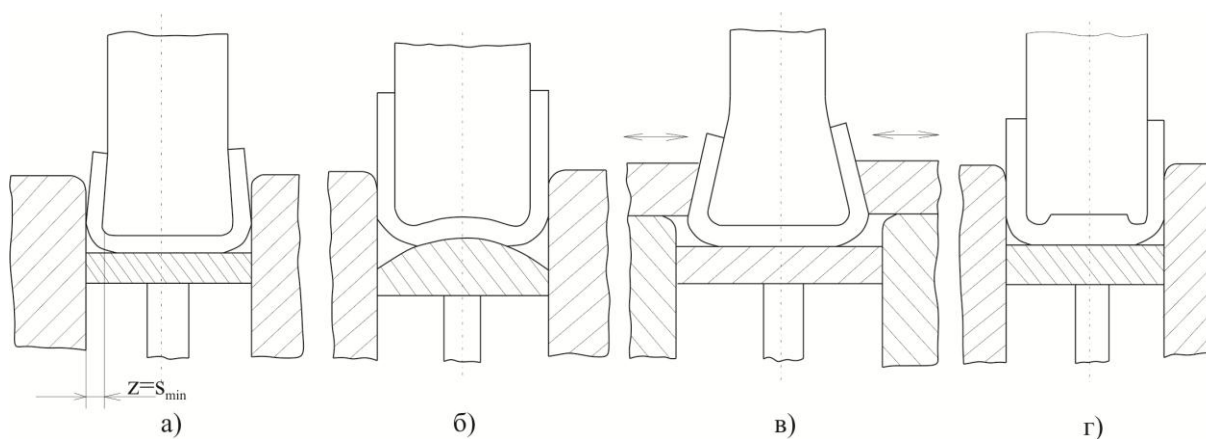
У књизи [Вујовић, 1990] вредности угла еластичног исправљања дате су табеларно. Слично као и у препорукама где се користе дијаграми вредност угла еластичне повратности дата је у зависности од односа r_u/s , дебљине и врсте материјала. Препоручене вредности дате су у табели 3.6.

Табела 3.6 Величина угла еластичне повратности [Вујовић, 1990]

Врста материјала	r_u/s	Дебљина материјала s , mm		
		< 0,8 mm	0,8-2 mm	> 2 mm
Челик $R_m < 350$ Мпа	< 1	4°	2°	0°
Месинг $R_m < 350$ Мпа	1 до 5	5°	3°	1°
Al, Zn	> 5	6°	4°	2°
Челик $R_m = 400-500$ Мпа	< 1	5°	3°	1°
Месинг $R_m = 350-400$ Мпа	1 до 5	6°	4°	2°
Бронза	> 5	8°	5°	3°
Челик $R_m > 550$ Мпа	< 1	7°	4°	3°
	1 до 5	9°	5°	3°
	> 5	12°	7°	5°

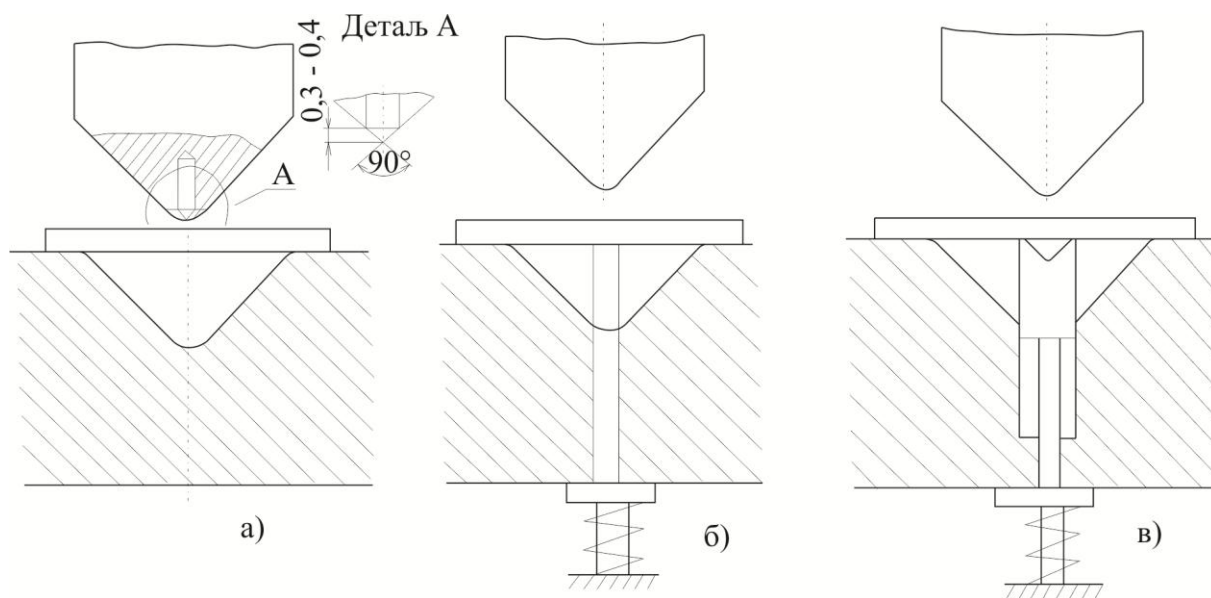
Методe компензације еластичног исправљања имају велики значај за конструкторе алата. Постоји више различитих начина за компензацију угла еластичног исправљања. Први подразумева умањење угла савијања на матрици и обликачу као и полупречника заобљења обликача. До вредности угла за који треба смањити угао на алату могуће је доћи прорачуном као што је приказано у претходном одељку или проценом на основу резултата нумеричке симулације методом коначних елемената. Други метод подразумева калибрисање лима на крају процеса. У том случају деформациона сила има значајно већу вредност и одређује се на основу израза који у обзир узима специфични притисак код калибрисања и површину калибрисања. У трећем случају користи се специфична конструкција алата намењена за компензацију еластичног исправљања.

Примери конструктивних решења радних елемената алата за компензацију еластичне повратности при двоугаоном савијању лима дати су на слици 3.16. На слици 3.16 а) угао на обликачу је умањен за процењену вредност угла еластичног исправљања. На слици 3.16 б) дно матрице је испупчено за вредност угла еластичног исправљања па ће после нестанка еластичних деформација угаоник добити жељени угао и облик. Решење централног дела алата са бочним покретним притискивачима, приказано је на слици 3.16 в), где се двоугаоно савијање изводи са мањим углом од потребног, па се након еластичне повратности добија угаоник жељених димензија и облика. На слици 3.16 г) приказан је алат са обликачем где постоји део за утискивање у лим, где се на дну комада и у зони савијања интензивира деформисање по дебљини лима, и остварује чисто пластично деформисање, које елиминише еластичну повратност.



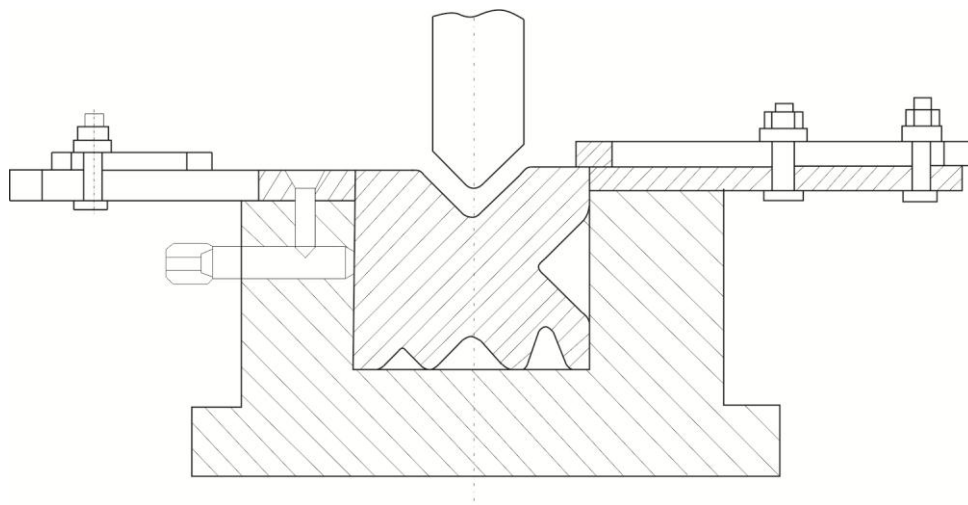
Слика 3.16 Методe компензације угла при двоугаоном савијању [Девеџић, 1981]

Код једноугаоног савијања ситуација је нешто другачија. Најпоузданији начин је правилно одређивање угла савијања као што је описано у првој методи. Постоје различита решења за конструкцију алата који служе за савијање делова са већом прецизношћу па је и то један од начина који се користе у смањивању еластичног исправљања. На слици 3.17 дат је пример конструкције алата који спречава померање лима током савијања и на тај начин повећава тачност. На слици 3.17 а) постоји оштар део на врху обликача који задире у лим и спречава његово померање. Недостатак овакве конструкције је што остаје траг на лиму. На слици 3.17 б) и в) приказана су два решења где се коришћењем опруге обезбеђује позиционирање лима.



Слика 3.17 Алат за једноугаоно савијање са једнаким крацима [Девеџић, 1981]

Поред наведених могуће је користити још неке изведбе алата за савијање. Пример једног од решења алата је матрица са направљеним каналом у који се поставља гума која обезбеђује успешно калибрисање. Поред наведених алата за једноугаоно савијање који се често користе постоје и универзални и комбиновани алати за савијање. Универзални алати погодни су за коришћење на апкант пресама или хидрауичним пресама и приказани су на слици 3.18. Комбиновани алати су много компликованији и служе за обављање још неких операција поред савијања нпр. пробијања, просецања и других.

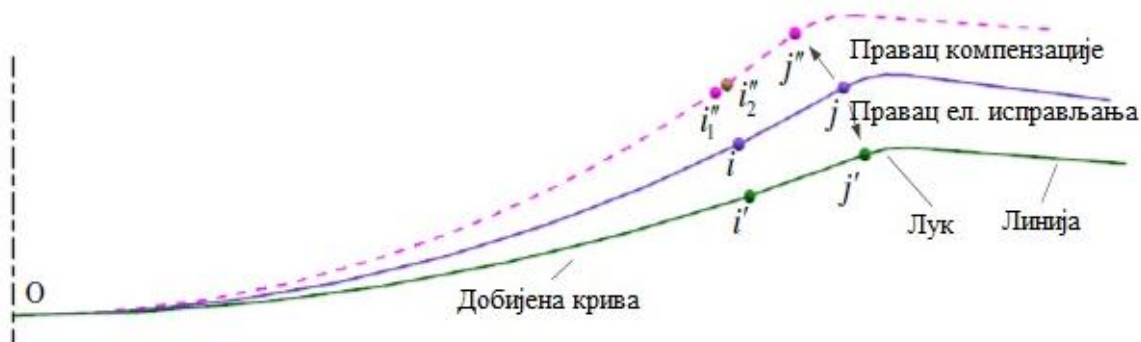


Слика 3.18 Универзални алати за савијање [Девеџић, 1981]

Све наведене методе компензације су познате у литератури и дуго се примењују али су потпуно примењиве само за једноставне примере. Напретком индустрије делови који се производе имају значајно сложеније облике па се све више користи поуздана метода коначних елемената. Коришћењем ове методе развијени су бројни приступи од којих ће неки бити изложени у овом раду.

При конструкцији алата за обликовање лима сложеног облика један од главних проблема је неутралисање утицаја еластичног исправљања. Постоји више начина да се то изведе, а најчешће коришћен у индустрији је пробно савијање са конструисаним алатом и интервентне компензације алата у више итерација. Овај приступ може у потпуности решити проблем али је веома скуп и захтева доста времена. Други приступ је промена параметара процеса попут силе држања чиме се решава проблем еластичног исправљања али и ту могу настати проблеми попут појаве лома на обликованом делу.

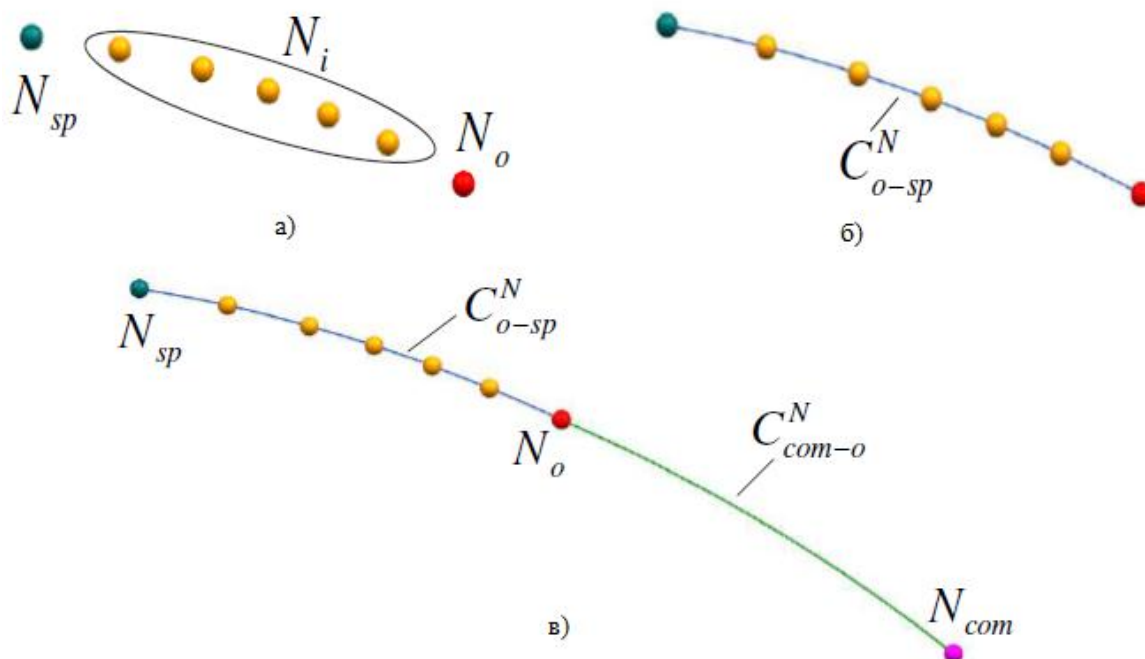
Метода која даје прецизније процене еластичног исправљања, и која се базира на нумеричким симулацијама позната је и под називом метода прилагођавања померања и приказана је у радовима [Gan, 2004] и [Weiher, 2004]. Методом је предвиђено да се у пресеку посматрају жељени и добијени облик контуре обликованог дела и разматрањем карактеристичних тачака добија се облик криве помоћу које ће утицај еластичног исправљања бити неутрализован. На слици 3.19 приказана је примена ове методе. У средини је приказана тражена контура дела, испод крива добијена после еластичног исправљања и изнад крива коју је потребно конструисати. Геометријски облик контуре је веома битан при разматрању, на пример за чвор i који се налази на равном делу компензационе тачке могу бити i_1'' или i_2'' и без обзира на избор тачке то ће имати мали утицај на контуру компензације. Са друге стране за чвор j који се налази на почетку радијуса неопходно је прецизно одредити положај да тачност израде радијуса не би била угрожена.



Слика 3.19 Одређивање позиција тачака при компензацији [Gan, 2004]

Комплексна хибридна метода која укључује коришћење методе коначних елемената представљена је у [Gong, 2021]. Употреба ове напредне методе је приказана на примеру обликовања једног каросеријског дела од три врсте лима дебљине 1 mm. Поступак конструкције приказан је на слици 3.20.

На слици 3.20 а) приказани су чворови за које треба направити компензацију N_i ($i=1, 2, \dots, n$) и чворови N_0 и N_{sp} који представљају чвор пре и после еластичног исправљања. На слици 3.20 б) приказана је интерполација тачака између два чвора чиме је дефинисана контура компензације. На слици 3.20 в) чвор N_{com} се налази на контури компензације. Спајањем кривих C_{0-sp}^N и C_{com-0}^N које су тангентне у тачки N_0 добија се компензациона крива. На основу резултата закључено је да се овом методом добијају бољи резултати него коришћењем методе прилагођавања померања.



Слика 3.20 Конструкција компензационе криве [Gong, 2021]

За процену вредности угла еластичног исправљања користи се и вештачка интелигенција. У раду [Dezelak, 2012] на примеру теста извлачења/савијања помоћу машинског учења анализирана је појава еластичног исправљања и утицај фактора као што су полупречник алата, деформациона сила и трење. Анализирана су два случаја, када се користе резултати МКЕ симулације и када се не користе, и закључено је да су значајно бољи резултати постигнути када су у процесу машинског учења коришћени подаци МКЕ анализе. Поред вештачке интелигенције у комбинацији са нумеричком анализом за планирање експеримента и анализу утицајних параметара користе се метода површине одговора (*Surface method response*) [Stander, 2002] и неуронске мреже [Kim, 2008].

У раду [Stefanovska, 2012] представљена је идеја о развоју флексибилног система за обликовање лима. Прво је методом коначних елемената анализирано савијање лима тестом три тачке и одређене су карактеристике алата и процеса при којим ће лим од челика DC04 бити савијен под углом од 90° . Успешном конструкцијом овог уређаја на коме би цилиндри за савијање били померљиви значајно би било скраћено време развоја.

Пример компензације еластичног исправљања на индустријском примеру описан је у раду [Pačak, 2017]. Истакнуте су две методе, мануелна где инжењер на основу експеримента или нумеричке симулације коригује алат у CAD софтверу и за тај начин је потребно доста времена, и аутоматизована где се уз помоћ софтвера *Autoform* и модула за компензацију корекција алата врши аутоматски. Приказана је оптимизација задњих врата аутомобила.

3.3 Примена нумеричких метода у процени еластичне повратности

Тежња у савременој индустрији је да се конструктивна решења алата, максимална вредност деформационе силе, еластично исправљање и утицај осталих утицајних фактора при обликовању лима провере пре саме израде алата.

Нумеричке симулације су добро проверен и веома користан алат који омогућава инжењерима да предвиде све потенцијалне проблеме који се могу јавити у производњи. Коришћењем нумеричких симулација инжењери који се баве развојем технологије за производњу неког производа могу на рачунару да направе много проба конструисаног алата чиме се избегавају грешке при тестирању алата које су веома скупе. Главна предност примене нумеричких симулација је могућност извођења “шта-ако” симулација које омогућавају инжењерима да нађу алтернативна решења на јефтин и брз начин. Напретком софтвера за нумеричку симулацију процеса обраде омогућено је пројектанту технологије да испита утицај различитих фактора као што су геометрија радног комада, геометрија алата, параметри технологије, карактеристике материјала од којих су израђени. Правилним избором геометријских и производних параметара омогућава се оптимално коришћење алата чиме се продужава његов радни век и смањује цена производње.

За симулације обраде деформисањем користи се више нумеричких метода: метода коначних елемената, метода коначних запремина и метода коначних разлика. За симулацију обликовања лимова и запреминско обликовање у хладном стању користи се метода коначних елемената док се за обраду у топлом стању (топло ковање) користи метода коначних запремина.

Изабрана нумеричка метода и одговарајући софтвер треба да омогуће поуздане резултате симулације конструктору и технологу да би време и трошкови развоја били минимализовани а производња реализована без застоја и отказа. Данас постоје бројни комерцијални софтвери који се користе за симулације процеса обраде лимова као што су *Simufact forming*, *Ansys*, *Autoform* итд.

Параметри нумеричке симулације који имају највећи утицај на еластичну повратност су тип и величина елемента, крива ојачања и параметри материјала попут напона на граници течења, Јунговог модула еластичности и анизотропије.

Најчешће примењивана метода за нумеричке симулације је метода коначних елемената која је интегрисана у скоро све савремене софтвере за нумеричке симулације.

3.3.1 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената је најшире примењивана нумеричка метода за анализу процеса деформисања [Мандић, 2012]. Део који се анализира дели се на коначан број елемената и уз поштовање њихове међусобне повезаности анализира се целина. Основне фазе методе коначних елемената су:

- дискретизација континуума,
- избор интерполационих функција,
- одређивање конститутивних једначина елемената,
- формирање системских једначина за мрежу коначних елемената,
- решавање система једначина,
- прорачун потребних утицаја.

Инжењер који користи софтвер дефинише услове при којима се операција обликовања спроводи без праћења прорачуна који солвер ради. Корисник дефинише контактне услове и врши избор врсте коначних елемената, као и њихове величине. Симулација обраде лима може бити урађена као 2D симулација (ако је део осносиметричан или погодан за 2D раванску симулацију) и 3D симулација.

Метода коначних елемената спада у методе дискретне анализе. Већина нумеричких метода се заснива на дискретизацији једначина граничних проблема, док се метода коначних елемената заснива на физичкој дискретизацији разматраног дела. Код осталих нумеричких метода посматра се део домена веома малих димензија а у методи коначних елемената се посматра мали део коначних димензија који се назива коначни елемент.

Апроксимација континуума се заснива на неколико претпоставки. Прва је да се континуум коришћењем замишљених линија или површина дели на поддомене који се називају коначни елементи. Сви коначни елементи чине мрежу коначних елемената. Следећа претпоставка је да постоји веза између коначних елемената у одређеним тачкама које се називају чворови. За описивање стања у коначном елементу као што су померање, деформација, напони, температура користе се интерполационе функције и коначан број параметара у чворовима. Последња претпоставка је да за прорачун система коначних елемената важе поступци као и за класичне дискретне системе.

У зависности од начина дефинисања једначина за коначне елементе постоје четири врсте методе коначних елемената [Секуловић, 1982]:

- директна метода (*Direct finite element method*),
- варијациона метода (*Variational finite element method*),
- метода резидуума (*Residual finite element method*) и
- метода енергетског баланса (*Energy balance finite element method*).

Директна метода је погодна за решавање једноставнијих проблема и има сличности са методом деформације код линијских носача. Варијациона метода се заснива на стационарности функционала који представља потенцијалну односно комплементарну енергију система. Варијациону методу је могуће користити и при решавању проблема делова сложеног облика. Основа методе резидуума је постављање диференцијалних једначина разматраног проблема. Метода енергетског баланса је заснована на остваривању баланса одређених видова енергије и има примену у термодинамичкој анализи континуума. За разматрање деформабилних тела највише се користе варијациона метода која се заснива на методи Риц-а (*Ritz*) и метода резидуума која се заснива на методи Бубнов-Галеркина.

Због једноставности и широког подручја примене варијациона метода се сматра за основну методу коначних елемената. Њени основни принципи су:

- принцип о минимуму потенцијалне енергије,
- принцип о минимуму комплементарне енергије и
- Рајснеров варијациони принцип.

Врсте МКЕ које се дефинишу на основу ових принципа међусобно се разликују према начину бирања непознатих величина при решавању проблема. Код принципа о минимуму потенцијалне енергије основне непознате су кинематске величине (деформације). Када се користи принцип о минимуму комплементарне енергије користе се статичке величине а код Рајснеровог принципа статичке и кинематске величине. На основу овог разматрања врсте варијационе методе МКЕ су:

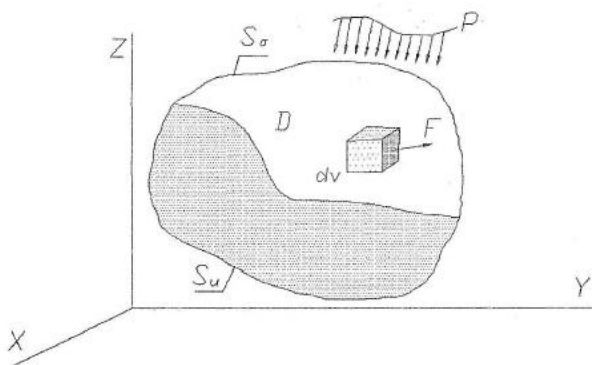
- метода деформације,
- метода сила и
- мешовита или хибридна метода.

Најширу примену има метода деформације. За објашњење основних принципа методе деформације потребно је размотрити домен еластичног континуума D , који је

ограничен контуром S (слика 3.21). На делу контуре S_σ важе контурни услови по силама а на делу S_u контурни услови по померањима. На домену D делују запреминске силе $F(F_x, F_y, F_z)$ а на контури S_σ површинске силе $p(p_x, p_y, p_z)$. Сва померања у домену D представљају непрекидне функције координата $u = u(x, y, z)$ тј.:

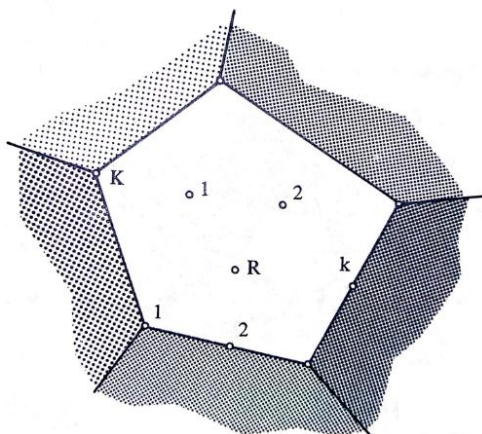
$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z); \\ v &= v(x, y, z); \\ w &= w(x, y, z). \end{aligned} \tag{3.51}$$

Домен D је потребно поделити на коначне елементе који су повезани чворовима. Потребно је померања у било којој тачки елемента приказати у зависности од померања у чворовима. Да би померања у чворовима била одређена потребно је поставити систем једначина које представљају услове равнотеже у чворовима. Једначине се формирају на основу принципа минимума потенцијалне енергије а на основу поља померања могуће је одредити поље деформација и поље напона [Секуловић, 1982]. Тачност апроксимације у методи коначних елемената зависи од тачности апроксимације померања у коначним елементима.



Слика 3.21 Домен еластичног континуума [Секуловић, 1982]

На слици 3.22 приказан је коначни елемент са K спољашњих и R унутрашњих чворова. Непознате величине се називају параметри померања (компоненте померања, изводи компонената померања, њихове комбинације). Параметри померања се називају и степени слободе па за дефинисани пример са слике постоји $S \times K$ спољашњих и $S \times R$ унутрашњих степени слободе.



Слика 3.22 Коначни елемент са K спољашњих и R унутрашњих чворова [Секуловић, 1982]

За сваки чвор могуће је написати параметре померања као компоненте вектора q_k :

$$q_k = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_k, \quad 3.52$$

односно за раванске проблеме

$$q_k = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_k. \quad 3.53$$

Параметре померања у свим спољашњим чворовима могуће је записати као

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_k \end{bmatrix} \quad 3.54$$

Ова померања представљају главне непознате величине елемента. Параметри померања у унутрашњим чворовима се записују у облику

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{bmatrix}. \quad 3.55$$

Компоненте вектора померања се дефинишу као и за спољашње чворове

$$r_s = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad 3.56$$

односно за раванске проблеме:

$$r_s = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad 3.57$$

Следећи битан параметар су интерполационе функције. Померање у било којој тачки коначног елемента могуће је изразити у зависности од померања у чворовима елемента. Та зависност се представља интерполационим функцијама. За представљање начина одређивања интерполационих функција и њених битних елемената потребно је анализирати $2D$ четворочворни елемент који је приказан на слици 3.23. Компоненте померања могуће је записати у облику:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy; \quad 3.58$$

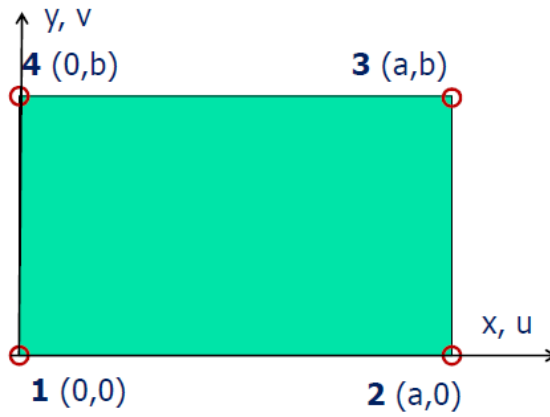
$$v = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 xy; \quad 3.59$$

тј. у матричном облику $u = A\alpha$. Матрице A , u и α су:

$$u = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy \end{bmatrix}; \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_4 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_4 \end{bmatrix}. \quad 3.60$$

Вектор померања у теменима елемента је одређен са осам компоненти:

$$q = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix}. \quad 3.61$$



Слика 3.23 Коначни елемент [Мандић, скрипта CAD/CAM/CAE/2]

Када се израз за компоненте померања примени на тачке у теменима добија се израз $q = C\alpha$, матрица C је

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a & 0 & 0 \\ 1 & a & b & ab & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a & b & ab \\ 1 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & b & 0 \end{bmatrix} \quad 3.62$$

Инверзна матрица C^{-1} је:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/a & 0 & 1/a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/ab & 0 \\ 1/ab & 0 & -1/ab & 0 & 1/ab & 0 & -1/ab & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/a & 0 & 1/a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/b \\ 0 & 1/ab & 0 & -1/ab & 0 & 1/ab & 0 & -1/ab \end{bmatrix} \quad 3.63$$

Када $\alpha = C^{-1}q$ заменимо у $u = A\alpha$ добија се $u = A_q q$ односно $A_q = AC^{-1}$. Матрица A_q је матрица помоћу које се успоставља веза између померања у елементу и померања у чворовима. Пошто се елементи матрице A_q називају интерполационе функције матрица се назива матрица интерполационих функција. Матрица A_q гласи:

$$A_q = \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta) & 0 & \xi(1-\eta) & 0 & \xi\eta & 0 & (1-\xi)\eta & 0 \\ 0 & (1-\xi)(1-\eta) & 0 & \xi(1-\eta) & 0 & \xi\eta & 0 & (1-\xi)\eta \end{bmatrix}, \quad 3.64$$

где су

$$\xi = x/a, \eta = y/b. \quad 3.65$$

Зависност померања у унутрашњости елемента од померања у унутрашњим чворовима приказана је једначином $u = A_r r$. Елементе матрице A_r треба дефинисати на тај начин да побољшају апроксимацију померања у елементу а да не утичу на услове на контури.

Када у елементу постоје спољашњи и унутрашњи чворови, веза између параметара померања у елементу и спољашњим и унутрашњим чворовима је:

$$u = A_q q + A_r r = [A_q A_r] \begin{bmatrix} q \\ r \end{bmatrix}. \quad 3.66$$

Веза између промене неке функције у елементу и њених вредности у чворовима елемента увек је облика:

$$\phi(x, y, z) = N_k(x, y, z)\phi^k = [N_1 N_2 \dots N_K] \begin{bmatrix} \phi^1 \\ \phi^2 \\ \vdots \\ \phi^K \end{bmatrix}, \quad 3.67$$

где су:

- $N_k(x, y, z)$ – интерполациона функција за чвор k ,
- ϕ^k – вредност функције у чвору k ,
- $\phi(x, y, z)$ – скаларна величина (померање, извод померања).

Општи облик се може записати у облику $u = Nq$, где је u вектор генералисаних померања у елементу, N матрица интерполационих функција и q вектор параметара померања у чворовима. На основу дефинисаног поља померања могуће је одредити поље деформација. У произвољно одређеној тачки елемента деформација се добија као збир компоненти деформација:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}, \quad 3.68$$

ε_0 – вектор почетне деформације, $\bar{\varepsilon}$ вектор деформација чије вредности зависе од напрезања. Почетним деформацијама називамо деформације које настају као последица термичког утицаја и одређене су изразом:

$$(\varepsilon_0)_{ij} = \delta_{ij} \alpha t, \quad 3.69$$

α је коефицијент термичког ширења а δ_{ij} Кронекеров коефицијент. Кронекеров коефицијент има вредност

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j. \end{cases} \quad 3.70$$

Диференцирањем израза за померање добија се израз за компоненте деформације

$$\varepsilon = B_q q + B_r r = [B_q B_r] \begin{bmatrix} q \\ r \end{bmatrix}, \quad 3.71$$

где су

$$B_q = L A_q, \quad 3.72$$

$$B_r = L A_r. \quad 3.73$$

У изразима 3.72 и 3.73 са L је означена матрица оператора. За тродимензионалне проблеме линеарне теорије еластичности матрица L је:

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad 3.74$$

а за раванске проблеме

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}. \quad 3.75$$

Разматрањем функционала потенцијалне енергије за један коначни елемент и коришћењем математичких трансформација добија се израз за потенцијалну енергију елемента:

$$\Pi = \frac{1}{2} q^T k_{qq} q + r^T k_{rq} q + \frac{1}{2} r^T k_{rr} r - Q_q^T q - Q_r^T r - C_0. \quad 3.76$$

Прва три члана у збиру представљају унутрашњу енергију деформације која је изражена помоћу померања у спољашњим и унутрашњим чворовима, а последња три члана потенцијалну енергију познатих спољашњих оптерећења. У обрасцу 3.76 непознате величине су параметри померања у спољашњим и унутрашњим чворовима. Пошто параметри померања у унутрашњим чворовима нису стандардне величине потребно је варијацијом доћи до обрасца који не зависи од ових померања. Након сређивања образац је:

$$\Pi = \frac{1}{2} q^T k_q - Q^T q + \bar{C}, \quad 3.77$$

где су:

$$k = k_{qq} - k_{rq}^T k_{rr}^{-1} k_{rq}; \quad 3.78$$

$$Q = Q_q - k_{rq}^T k_{rr}^{-1} Q_r; \quad 3.79$$

$$\bar{C} = C_0 - \frac{1}{2} Q_r^T k_{rr}^{-1} Q_r. \quad 3.80$$

У дефинисаним једначинама k представља матрицу крутости елемента, Q представља вектор сила у чворовима елемента (утицаји запреминских сила у елементу и површинских сила на контури).

После дефинисања једначина за појединачне елементе потребно је одредити једначине система коначних елемената. Укупна потенцијална енергија система добија се као збир потенцијалних енергија елемената. На тај начин, потенцијална енергија система се рачуна према изразу:

$$\Pi = \sum_{e=1}^M \left(\frac{1}{2} q_e^T k_e q_e - Q_e^T q_e - \bar{C}_e \right), \quad 3.81$$

односно у матричном облику:

$$\Pi = \frac{1}{2} \bar{q}^T \bar{K}_q - \bar{Q}^T \bar{q} + \sum_{e=1}^M \bar{C}_e. \quad 3.82$$

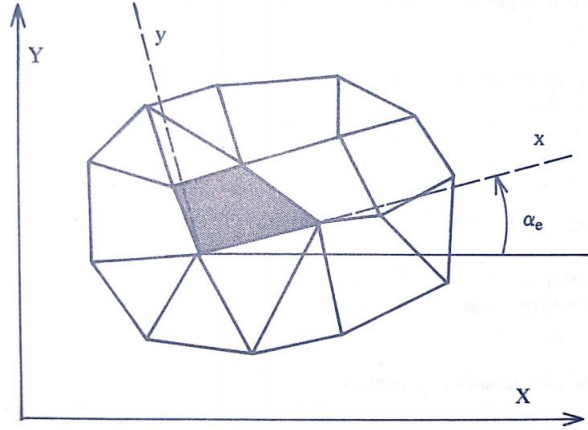
У претходном обрасцу користе се матрице система које су формиране од матрица појединачних елемената и оне су:

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_M \end{bmatrix}; \bar{K} = \begin{bmatrix} K_1 \\ \vdots \\ K_e \\ \vdots \\ K_M \end{bmatrix}; \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_M \end{bmatrix}. \quad 3.83$$

Пошто су елементи система повезани у чворовима, померања у једном чвору су иста за све елементе. Анализу појединих елемената је могуће радити у локалним координатним системима али је потребно увести глобални координатни систем као што је приказано на слици 3.24.

Ако у систему постоји N чворова и са q_n^* и Q_n^* се означе померања и силе у глобалном координатном систему онда се матрице померања и сила система пишу као:

$$q^* = \begin{bmatrix} q_1^* \\ \vdots \\ q_n^* \\ \vdots \\ q_N^* \end{bmatrix}; Q^* = \begin{bmatrix} Q_1^* \\ \vdots \\ Q_n^* \\ \vdots \\ Q_N^* \end{bmatrix}. \quad 3.84$$



Слика 3.24 Локални и глобални координатни систем [Секуловић, 1982]

Везу између померања у локалном и глобалном координатном систему представља матрица трансформације J . Једначина зависности гласи:

$$\bar{q} = Jq^*. \quad 3.85$$

Други назив за матрицу J је матрица везе елемената или глобална кинематичка матрица. У случају када су осе координатних локалних и глобалног система паралелне матрица се састоји од нула и јединица. Ако осе система нису паралелне онда се матрица састоји од нула и косинуса и синуса углова између локалног и глобалног координатног система. Када се примени веза између елемената добија се једначина за потенцијалну енергију система елемената:

$$\Pi = \frac{1}{2} q^{*T} K^* q^* - q^{*T} Q^* + \sum_n C_n, \quad 3.86$$

где су:

$$K^* = J^T \bar{K} J, \quad 3.87$$

$$Q^* = J^T \bar{Q}, \quad 3.88$$

матрица крутости система и вектор генералисаних сила.

Потребно је дефинисати везе између деформација и померања:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad 3.89$$

где су компоненте дефинисане изразима:

$$\epsilon_{xx} = u_{,x}, \quad 3.90$$

$$\epsilon_{yy} = v_{,y}, \quad 3.91$$

$$\epsilon_{zz} = w_{,z}, \quad 3.92$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2}(u_{,y} + v_{,x}), \quad 3.93$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{1}{2}(v_{,z} + w_{,y}), \quad 3.94$$

$$\epsilon_{xz} = \frac{1}{2}(u_{,z} + w_{,x}). \quad 3.95$$

Индекс који се пише после зареза означава диференцирање тј.

$$u_{,x} = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad 3.96$$

Зависност је могуће приказати у матричном облику коришћењем матрице оператора

$$\epsilon = Lu. \quad 3.97$$

Једначина којом се дефинише веза између напона и деформација, односно између компонената напона и компонената деформација је:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}, \quad 3.98$$

што представља генерализовану верзију Хуковог закона. Сређивањем израза добија се:

$$\sigma = D\epsilon. \quad 3.99$$

Матрица D је симетрична матрица и назива се матрица крутости материјала.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ & & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ & & & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ & \text{симетрично} & & & d_{55} & d_{56} \\ & & & & & d_{66} \end{bmatrix}. \quad 3.100$$

Из израза за напон могуће је изразити вредност деформације

$$\epsilon = D^{-1}\sigma = C\sigma, \quad 3.101$$

где је C матрица флексибилности материјала.

Када се узму у обзир особине хомогених изотропних материјала и искористе коефицијенти Ламеа, Јанга и Поасона матрице D и C имају облик:

$$D = \frac{E}{2(1+v)} \begin{bmatrix} \frac{2(1-v)}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(1-v)}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(1-v)}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & \frac{2v}{1-2v} & 0 & 0 & 0 \\ \text{симетрично} & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}; \quad 3.102$$

$$C = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -v & -v & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -v & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{симетрично} & & & 2(1+v) & 0 & 0 \\ & & & & 2(1+v) & 0 \\ & & & & & 2(1+v) \end{bmatrix}. \quad 3.103$$

Везе између коефицијената који се користе за дефинисање матрица су:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}; \quad 3.104$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+v)}; \quad 3.105$$

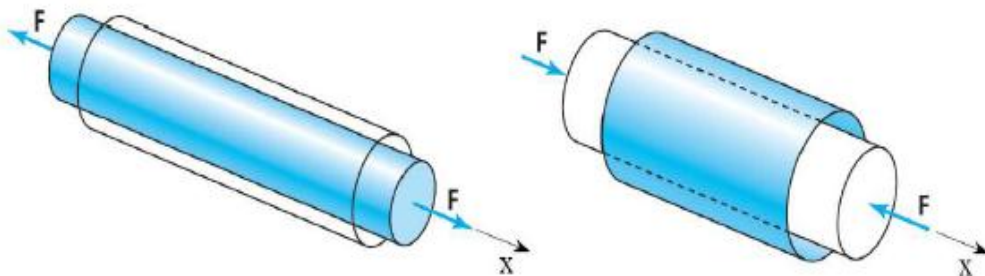
$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}; \quad 3.106$$

$$v = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad 3.107$$

Поасонов коефицијент представља однос између нормалних деформација које се јављају у два међусобно управна правца (слика 3.25) и рачуна се према изразу:

$$v = -\frac{\varepsilon_{\text{попречно}}}{\varepsilon_{\text{подужна}}}, \quad 3.108$$

и његова вредност за метале износи 0,25-0,3.



Слика 3.25 Поасонов ефекат [Мандић, скрипта CAD/CAM/CAE/2]

Пошто је у инжењерској пракси често потребно напонско стање изразити у зависности од деформације, помоћу израза $\sigma = D\varepsilon$ могуће је добити обрасце за вредности компоненти напона:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)]; \quad 3.109$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)]; \quad 3.110$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)]; \quad 3.111$$

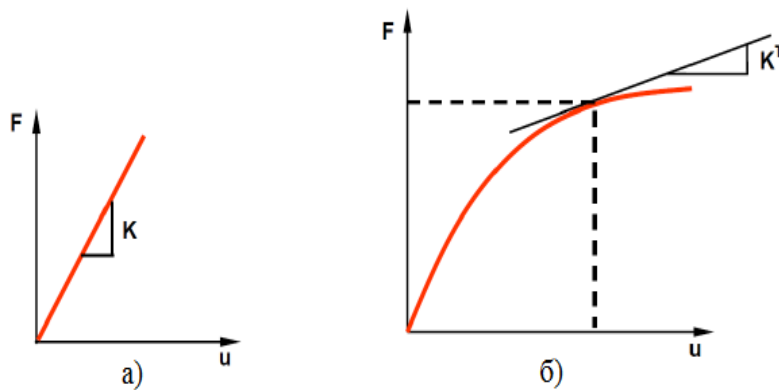
$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}; \quad 3.112$$

$$\tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}; \quad 3.113$$

$$\tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx}. \quad 3.114$$

Други начин приказивања Хуковог закона је изражавање зависности силе од померања (слика 3.26):

$$F = Du. \quad 3.115$$



Слика 3.26 Зависност силе од померања: а) линеарна зависност и б) нелинеарна зависност [Мандић, скрипта CAD/CAM/CAE/2]

Да би се коришћењем МКЕ што прецизније израчунала еластична повратност потребно је поуздано дефинисати стање напона и деформација на обликованом лиму [Mulidrán, 2019]. Понашање материјала је одређено кривом течења. Једино криве течења одређене тестом затезања дају поуздане податке док коришћењем сличног материјала из базе софтвера долази до пораста грешке. Анизотропија лима се описује помоћу два модела: *Hill48* и *Barlat*. За обраду лима односно уопштено за обраду у хладном стању користе се два модела апроксимације криве течења:

$$\sigma_f = A + C\varphi^n; \quad 3.116$$

и
$$\sigma_f = C\varphi^n. \quad 3.117$$

Према теорији укупна настала деформација једнака је збиру:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{el} + \Delta\varepsilon^t + \Delta\varepsilon^{pl} + \Delta\varepsilon^f, \quad 3.118$$

где су:

$\Delta\varepsilon^{el}$ – еластична деформација,

$\Delta\varepsilon^t$ – термална деформација,

$\Delta\varepsilon^{pl}$ – пластична деформација и

$\Delta\varepsilon^f$ – деформација услед фазних трансформација.

С обзиром да се савијање ради у хладном стању две компоненте деформације ће скоро бити једнаке нули. Инкрементална еластична деформација се рачуна на основу релације између Кошијевог напона и модула еластичности:

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon^{el}, \quad 3.119$$

односно вредност еластичне деформације којом се дефинише угао еластичног исправљања једнак је:

$$\Delta\varepsilon^{el} = \frac{\Delta\sigma}{E}. \quad 3.120$$

Приказана релација показује да је за тачност нумеричке симулације најважније познавање праве вредности модула еластичности. У раду [Lal, 2016] анализирана је вредност еластичног исправљања на основу Рамберг – Осгуд (*Ramberg–Osgood*) једначине. Вредност еластичног исправљања одређена је односом унутрашњег полупречника пре и после еластичног исправљања и дефинисана је једначином:

$$\begin{aligned} \frac{R_0}{R_f} = 1 - \frac{3(1-v^2)}{\frac{\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{n+1}{2n}} (2n+1)}{n}} \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^{\frac{n-1}{n}} \left(\frac{2R_0}{t}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \\ + \left[\frac{2R_0}{t} \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{n}{n-1}} (1-v^2) \right]^3 \left(\frac{3(1-v^2)^{\frac{1}{n}}}{\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{n+1}{2n}} (1-v+v^2)^{\frac{2n+1}{2n}} (2n+1)n} - \frac{1}{(1-v+v^2)^{\frac{3}{2}}} \right). \end{aligned} \quad 3.121$$

3.3.2 Солвери уграђени у *Simufact forming*

Софтвер *Simufact.forming* је базиран на две методе нумеричког прорачуна које се међусобно допуњују и на тај начин је обезбеђен тражени квалитет резултата. Солвери које програм користи су:

- солвер који користи методу коначних запремина (*FV*) и заснива се на експлицитном *MSC Dytran* солверу који је погодан за симулације процеса топлог и врућег обликовања и
- солвер који користи методу коначних елемената (*FE*) и заснива се на имплицитном *MSC Marc* солверу за нелинеарне проблеме и користи се за симулацију свих типова процеса.

Оба солвера су развијена од стране MSC-а и користе термо-механичке и еластично-пластичне формулације. Да би одређени солвери били погодни за свакодневну употребу у индустрији потребно је да време прорачуна не буде предуго. У *Simufact*-у се користе две ефикасне методе за скраћивање времена:

- за *FE* солвере *DDM* – *domain decomposition method* и
- за *FE* и *FV* солвере *SMP* – *shared memory parallelization*.

Солвер *Marc* је заснован на методи деформација. Крутост система се дефинише односом сила и деформације. Однос силе и деформација за линеарне статичке проблеме се дефинише изразом:

$$Ku = f, \quad 3.122$$

где K представља матрицу крутости, u померање чвора и f је вектор силе.

Једначину 3.122 је могуће записати у матричном облику као што је већ објашњено у теоријским разматрањима:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix}, \quad 3.123$$

где је u_1 вектор непознатог померања, u_2 вектор дефинисаног померања, f_1 вектор силе и f_2 је сила реакције. После одређивања непознатог померања, деформација у елементу може бити одређена из релације деформација-померање у односу на померање чвора:

$$\varepsilon_{e1} = \beta u_{e1}. \quad 3.124$$

Напони у елементу се добијају из релације напон-деформација:

$$\sigma_{e1} = L \varepsilon_{e1}, \quad 3.125$$

где су σ_{e1} и ε_{e1} напон и деформација у елементу, u_{e1} је вектор померања чвора, β и L су релације деформација – померање и напон – деформација.

Када се разматрају динамички проблеми потребно је у разматрање узети утицаје маса и пригушивања. Једначина којом се описује линеарни динамички систем:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = f, \quad 3.126$$

где су:

M – матрица маса система и

D – матрица пригушења система.

Једначина којом се описује непригушени систем гласи:

$$M\ddot{u} + Ku = f. \quad 3.127$$

Једначина непригушеног система са вибрацијама је:

$$M\ddot{u} + Ku = 0. \quad 3.128$$

Пренос топлоте је дефинисан једначином:

$$C^T \dot{T} + K^T T = Q, \quad 3.129$$

где су: C^T – матрица топлотне капацитивности,

K^T – матрица термалне кондуктивности,

Q – топлотни флуks,

T – вектор температуре у чвору.

Једначина 3.129 за стабилна стања гласи

$$K^T T = Q \quad 3.130$$

Једначина којом се дефинишу термални проблеми је:

$$C^T(T) \dot{T} + K^T(T) T = Q + Q^E, \quad 3.131$$

где су:

$C^T(T)$ – матрица топлотне капацитивности зависна од времена,

$K^T(T)$ – матрица термалне кондуктивности зависна од времена,

T – вектор температуре у чвору,

Q – вектор топлотног флуksа,

Q^E – унутрашњи вектор генерисања топлоте из топлотног извора.

За решавање термо – механичких проблема користе се следеће једначине:

$$M \ddot{u} + D \dot{u} + K(T, u, t) u = F; \quad 3.132$$

$$C^T(T) \dot{T} + K^T(T) T = Q + Q^I + Q^F; \quad 3.133$$

и у овим једначинама матрица пригушења D , матрица крутости K , матрица топлотне капацитивности C^T и термалне кондуктивности K^T су зависне од времена. Q^I представља унутрашњу топлоту генерисану настанком нееластичних деформација.

У солверу *MSC Marc* матрица крутости система се изражава у зависности од матрица крутости елемената:

$$K = \sum_{i=1}^N K_i^{e1}. \quad 3.134$$

Матрица крутости система је симетрична матрица и на слици 3.27 је шематски приказано формирање матрице.

Елемент матрице крутости се добија као

$$K^{e1} = \int_{v^{e1}} \beta^T L \beta dv^{e1}, \quad 3.135$$

где су: v^{e1} – запремина елемента,

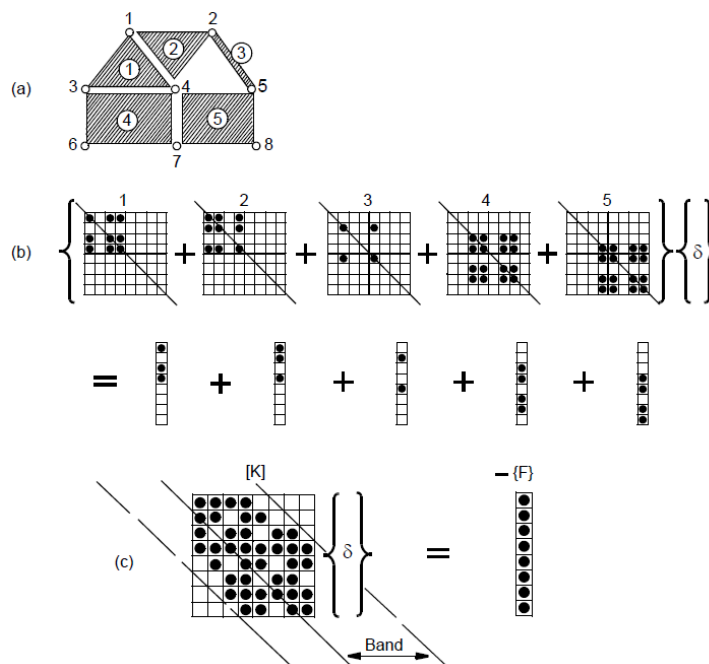
β и L релације деформација – померање и напон - деформација па се напон и деформација дефинишу изразима:

$$\varepsilon = \beta u; \quad 3.136$$

$$\sigma = L\varepsilon. \quad 3.137$$

Матрица маса је дефинисана изразом:

$$M^{e1} = \int_{v^{e1}} N^T \rho N dv. \quad 3.138$$



Слика 3.27 Шема образовања матрице крутости $[K]$

Када се разматра вектор сила у чворовима он се састоји из неколико различитих типова оптерећења:

$$f = f_{\text{тачке}} + f_{\text{површине}} + f_{\text{запремине}} + f^*, \quad 3.139$$

где су:

$f_{\text{тачке}}$ – вектор оптерећења у тачки,

$f_{\text{површине}}$ – вектор оптерећења по површини,

$f_{\text{запремине}}$ – вектор оптерећења по запремини и

f^* - остали вектори оптерећења (термални напони или постојећи напони).

Оптерећење у тачки је повезано са бројем степени слободe и може се директно додати у тачки. Вектори оптерећења по површини и запремини морају бити израчунати па додати оптерећењу у тачки. Рачунају се према изразима:

$$f_{\text{површине}} = \int_A N^T p dA; \quad 3.140$$

$$f_{\text{запремине}} = \int_V N^T p dV, \quad 3.141$$

где је p притисак.

3.3.3 Коришћени коначни елементи у софтверу *Simufact.forming*

С обзиром да је у овом раду коришћен софтвер *Simufact.forming* највише ће бити речи о елементима који су у њему подржани. За 2D симулацију могуће је користити две врсте елемената: *Advancing front quad* и *Quadtree*. Елемент *Advancing front quad* погодан је за нумеричке симулације када се анализира напон на алатима. За дискретизацију лима погодан је *Quadtree*. За 3D симулацију могуће је користити хексаедарски *Hexmesh* али је најпогоднији елемент посебно направљен за симулацију обраде лима *Sheetmesh*.

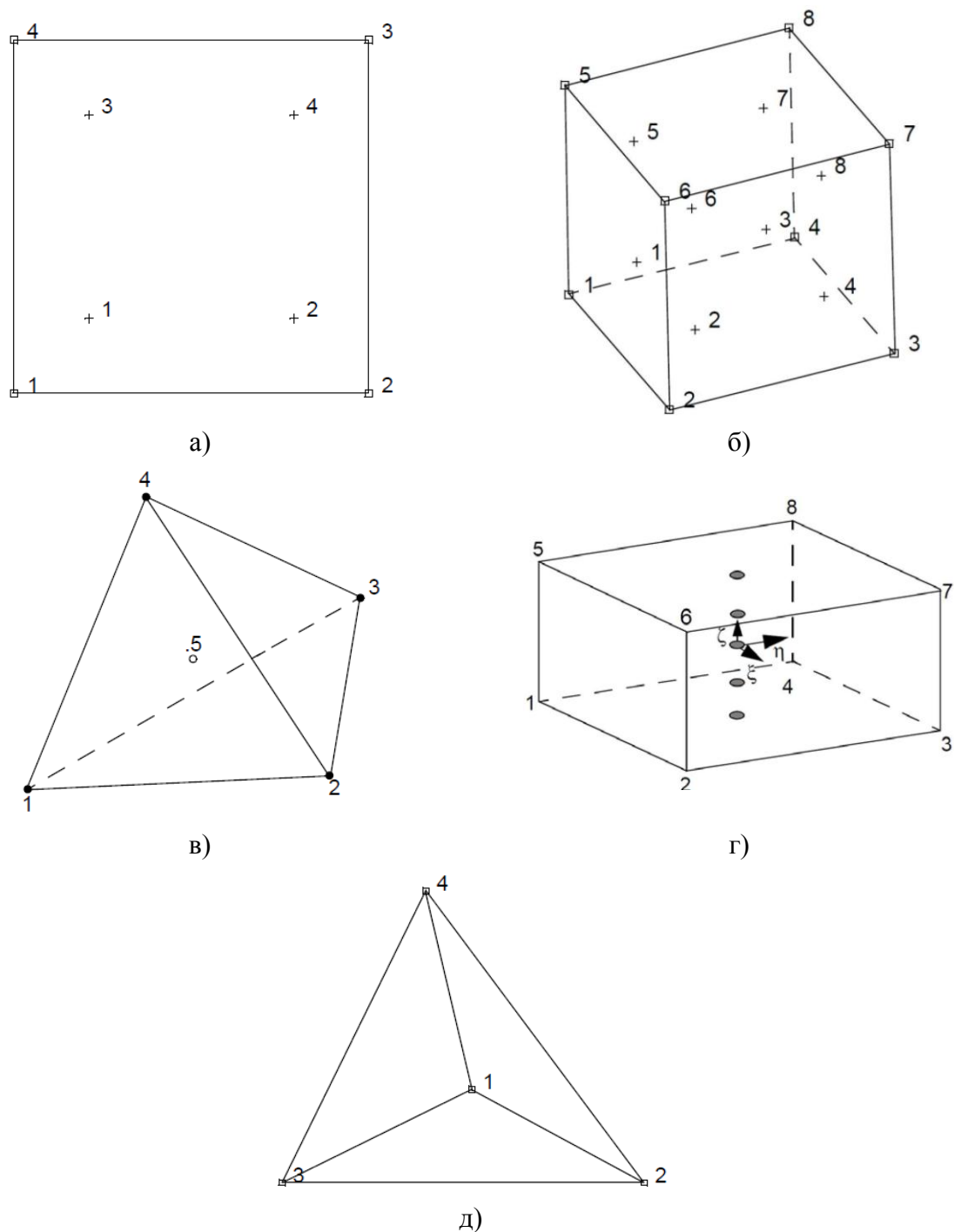
За 2D симулацију коришћен је елемент 11. Елемент 11 има четири чвора и користи се за решавање раванских проблема [Msc]. Елемент користи билинеарну интерполациону функцију па ће деформације бити константне дуж елемента. Због овога елемент није погодан за приказивање смицања. Симулација савијања може бити унапређена коришћењем алтернативних интерполационих функција. Овај елемент може се користити за све конститутивне релације. Када се користе нестишљиви гумени материјали, елемент мора бити коришћен у оквиру унапређеног Лагранжевог оквира. Изглед елемента 11 приказан је на слици 3.28 а).

За 3D симулацију користе се елементи 7, 157 и 185. Елемент 7 је хексаедарски елемент са осам чворова где сваки чвор има три степена слободе. Користи осам интеграционих тачака заједно са дилатационом методом за блокирање елемената. Изглед чвора приказан је на слици 3.28 б).

Елемент 157 је тетраедарски изопараметарски елемент који се састоји од пет (4+1) чворова. Има четири интеграцијске тачке и користи се за нумеричке симулације обликовања метала. Изглед елемента 157 приказан је на слици 3.28 в). Разлика у коришћењу елемената 7 и 157 је у прецизности и трајању симулације. Да би била постигнута иста тачност симулације потребно је више елемената типа 157. За нумеричке симулације где има више детаља и има потребе за ремешингом повољније је користити тип елемента 7.

Елемент 185 је елемент љуске са осам чворова и има једну интеграциону тачку у равни елемента и додатне интеграционе тачке по дебљини елемента. Погодан је за 3D анализу обраде лима. У односу на елемент 7 има више интеграционих тачака у правцу дебљине лима па је повољнији за употребу за симулације обраде лима. Елемент 185 приказан је на слици 3.28 г).

За 3D напонску анализу матрице и обликача коришћен је елемент 134. Елемент 134 је линеарни изопараметарски елемент који има четири чвора. Има једну интеграциону тачку и због закључавања елемената користи се за анализу напрезања и линеарног еластичног понашања материјала алата при малим деформацијама. Изглед елемента приказан је на слици 3.28 д).



Слика 3.28 Коначни елементи: а) тип елемента 11 б) тип елемента 7 в) тип елемента 157 г) тип елемента 185 д) тип елемента 134 [Msc]

Улазни параметри коришћени у нумеричкој симулацији процеса једноугаоног савијања лима за потребе ове дисертације објашњени су у шестом поглављу. Примена одговарајућих елемената и правилно дефинисање њихове величине кључни су за тачност симулације и време трајања прорачуна.

4. Принципи и примена адитивне производње и тополошке оптимизације у изради компоненти алата

Адитивна производња представља скуп технологија којим се делови израђују слој по слој, без додатних алата за резање или деформисање [Ћирић Костић, 2020]. Суштина адитивне производње је да се делови производе наношењем материјала по слојевима где сваки слој представља танки пресек дела дефинисаног *CAD* моделом [Gibson, 2021]. Спада у нове технологије јер су се прве идеје о примени адитивних технологија у машинству појавиле пре нешто више од 40 година. Први значајан рад у којем су објашњени принципи и основе развоја адитивне производње објавио је 1981. године Хидео Кодама (*Hideo Kodama*). Иако није успео да патентира проналазак сматра се да је он осмислио први *3D* штампач [BCN3D]. Први патенти су пријављени седамдесетих година двадесетог века међу којима су најзначајнији патенти Свансона, Кремера, Вите, Андреа и Хула.

Данас све адитивне технологије делимо у седам категорија где у свакој имамо одређене подгрупе или различита извођења машина али у историјском погледу најважније и најстарије технологије су *SLA* (стереолитографија) и *FDM* (депоновање топлог материјала). Први уређај заснован на технологији *SLA* је 1987. године представила америчка фирма *3D Systems* коју је основао поменути иноватор Хул (*Charles Hull*). Оснивачи фирме Стратасис (*Stratasys*) Скот и Лиса Крамп (*Scott Crump, Lisa Crump*) су 1989. године дефинисали и патентирали *FDM* технологију. Током осамдесетих и деведесетих година двадесетог века развијена је већина осталих технологија и у њиховом развоју предњачили су технички универзитети и институти.

4.1 Основе адитивних технологија

Адитивна производња се користи за брзу израду прототипова, брзу израду алата и брзу производњу. Постоје бројне погодности које пружа адитивна производња, на пример израда делова сложене геометрије без примене алата а да цена дела није већа од цене једноставног дела сличних димензија. Због карактеристика адитивне производње могуће је применити различите иновативне могућности као што су бионички дизајн, тополошка оптимизација делова, израда делова прилагођених кориснику, израда алата са оптимизованим каналима за хлађење [Ћирић Костић, 2020] итд.

Процес адитивне производње се може поделити на три дела: припрема модела, израда модела и завршна обрада модела. Процес почиње креирањем *3D* модела објекта и прављењем *stl* фајла. Постоји више формата који се користе у адитивној производњи али од тренутка када је Чарлс Хул дефинисао *stl* фајлове они су постали доминантни у употреби. Овакав фајл садржи податке о геометрији али не о боји и текстури. Поред *stl* фајла у адитивној производњи користе се *WRML*, *3MF*, *OBJ* и *AMF* фајлови [Xometry]. У последње време *AMF* формат се све више користи. *AMF* формат (*Additive Manufacturing File*) представља унапређење *stl* фајла. Предност *AMF* формата у односу на *stl* је мања величина фајла али и могућност дефинисања боје, текстуре, материјала и решеткастих структура на делу.

Према Гибсону [Gibson, 2021], процес адитивне производње дели се на осам корака: 1. дефинисање *CAD* модела, 2. конвертовање *CAD* модела у *stl* формат (или неки други, попут *AMF*-а), 3. пребацивање *stl* фајла на 3D штампач и подешавање у софтверу машине, 4. подешавање машине за адитивну производњу (3D штампача), 5. израда дела, 6. вађење готовог дела и чишћење, 7. постпроцесирање дела и 8. примена дела. Почетак процеса производње дела адитивном производњом је креирање *CAD* модела са потпуно дефинисаном геометријом. Други корак је прављење *stl* фајла који дефинише спољашње површине дела које дефинишу његову геометрију. После учитавања *stl* фајла у софтвер машине (трећи корак) дефинише се путања штампања по слојевима. У четвртном кораку ради се умеравње 3D машине и учитавање материјала. После израде део се уклања са радног стола машине и уклањају се потпорне структуре. У седмом кораку врши се постпроцесирање дела тако да површине добију одговарајући квалитет. У последњем кораку следи припрема за примену дела, најчешће фарбање или нека друга метода завршне обраде. Наведених осам корака приказано је на слици 4.1.



Слика 4.1 Ланац процеса адитивне производње [Gibson, 2021]

После дефинисања квалитетног *stl* фајла, фајл се учитава у софтвер за припрему *stl* модела за штампу где се дефинише израда дела слој по слој. После завршетка израде приступа се постпроцесирању дела. У наставку су представљене главне технологије адитивне производње, системи, материјали и технике постпроцесирања.

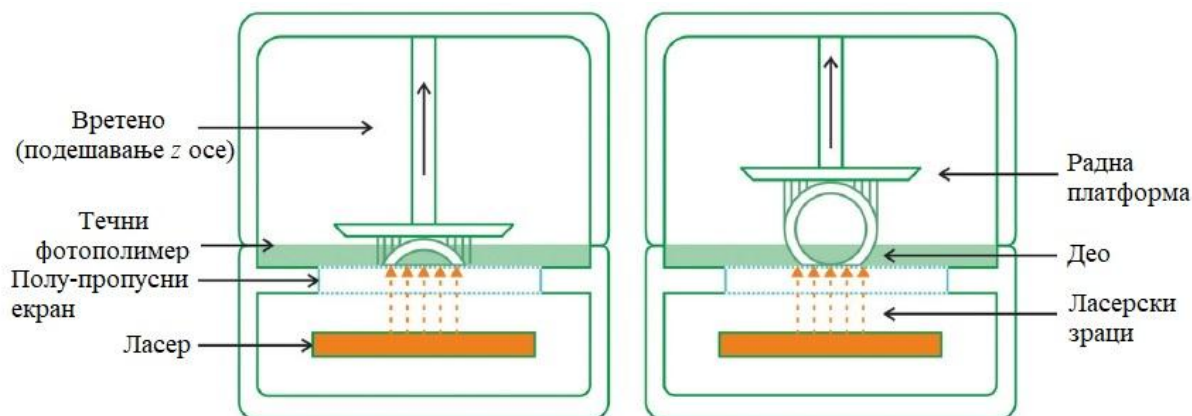
Доказ да адитивна производња представља важан део савремене индустрије је раст прихода ове индустрије који је у периоду од 2020. до 2022. увећан са 15,8 на 23,9 милијарди долара [Ћирић Костић, 2020]. Приходи су у 2024. години достигли вредност 25,92 милијарде долара. Процена је да ће тржиште адитивне производње у периоду 2023-2030 расти 23,3% годишње и да ће 2030. године укупан приход индустрије износити 88 милијарди долара [GVR].

4.1.1 Технологије адитивне производње

Према стандарду америчког друштва за испитивање и материјале све технологије адитивне производње деле се на седам категорија [ISO/ASTM 52900]:

- фотополимеризација у кади (*VAT polymerization*),
- директна 3D штампа (*Material jetting*),
- везивна 3D штампа (*Binder jetting*),
- екструдирање материјала (*Material extrusion*),
- фузија прашкастог слоја (*Powder bed fusion*),
- ламинација фолија (*Sheet lamination*) и
- наношење материјала применом усмерене енергије (*Direct energy deposition*).

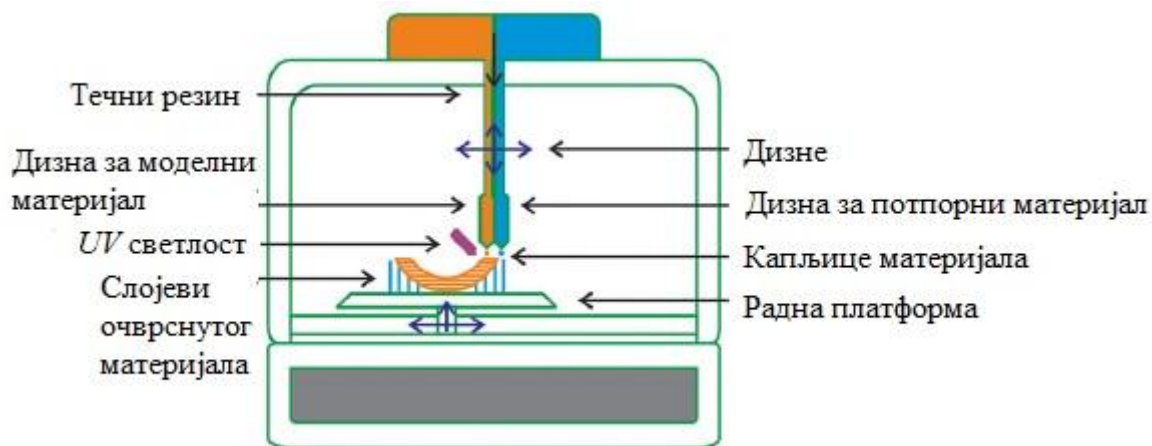
Фотополимеризација у кади је процес адитивне производње где се модели добијају очвршћавањем танког слоја фотополимера коришћењем ултраљубичастог светла или ласера. Овај процес је познатији као стереолитографија и најстарији је процес адитивне производње. Као у осталим технологијама после очвршћавања једног слоја платформа се помера за дебљину слоја и затим се кристалише следећи слој. Стереолитографија спада у спорије поступке а дебљина слоја зависи од квалитета уређаја и креће се у границама 0,025-0,3 mm. Мана методе је што је могуће користити само материјале (смоле) који кристалишу под дејством светлости па је процес скуп и добијени делови су осетљиви на сунчеву светлост. Други недостатак је неопходност коришћења потпорних структура чиме се процес продужава. Иако хемијска својства делова нису добра, механичке карактеристике делова су сличне карактеристикама материјала који се често користе, попут ABS-а, најлона, полипропилена итд. Фотополимери се деле према намени на инжењерске фотополимере, стандардне, златарске и денталне. Шематски приказ процеса дат је на слици 4.2.



Слика 4.2 Шематски приказ фотополимеризације у кади [Tatez, 2021]

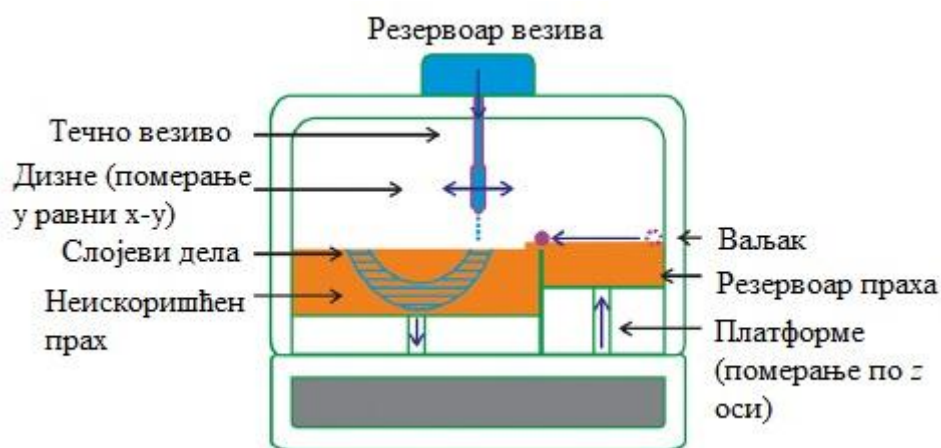
Директна 3D штампа има сличности са стереолитографијом само што се фотополимер у овом случају не налази у кади већ се млазницама истискује на радну површину и затим очврсне деловањем ултраљубичастог светла. Примењени материјали су веома слични материјалима који се користе у стереолитографији али се у директној 3D штампи доста користи и восак. Млазнице се крећу у x-y равни док платформа има кретање по z осе. Течни фотополимер се загрева на одређену температуру да би имао одговарајућу вискозност и затим се млазницама наноси на радни сто или на претходно

нанесен слој и деловањем ултраљубичастог светла очвршћава. Постоје три начина директне 3D штампе: истискивање материјала кроз млазнице, истискивање нано честица материјала и истискивање материјала у ситним капљицама. Приказ рада технологије дат је на слици 4.3.



Слика 4.3 Шематски приказ рада технологије директне 3D штампе [Tamez, 2021]

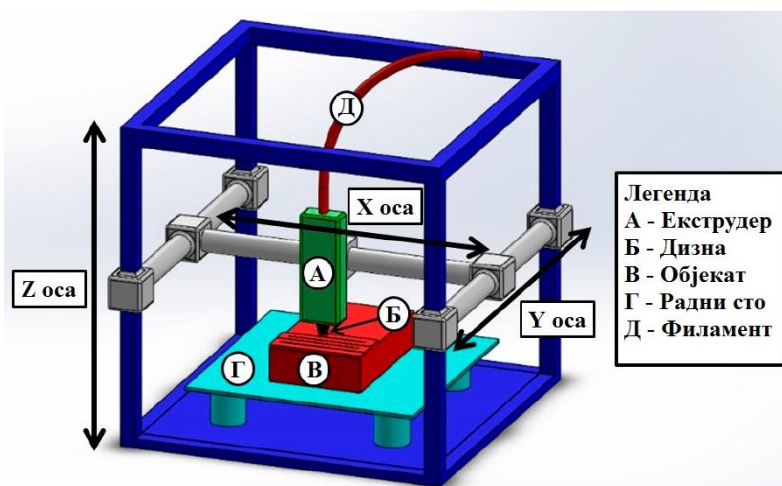
Технологија везивне 3D штампе подразумева да се у танак слој основног материјала који је у виду праха додаје везивно средство у облику ситних капи. У овој технологији адитивне производње користе се прашкасти материјали који су на бази керамике, гипса, стакла или на бази метала (нерђајући челик). Основни материјал у виду праха представља носећу структуру па коришћење потпорних структура није потребно. Уређај се састоји од механизма за наношење праха и главе са млазницом која наноси везивно средство. После наношења основног материјала долази до померања млазнице у x -у равни и наношења везивног средства на потребно место. Технологијом везивне 3D штампе производе се делови и модели за проверу ергономичности, архитектонски модели и језгра за процес ливења метала. Шема рада технологије приказана је на слици 4.4.



Слика 4.4 Шематски приказ рада технологије прашкастог супстрата [Tamez, 2021]

Најчешће коришћена адитивна технологија је свакако екструдирање материјала. Патентирана од фирме *Stratasys* као депоновање топљеног материјала *FDM* (*Fused deposition modelling*), често се назива и *FFF* (*Fused filament fabrication*). Користе се

разни материјали *ABS*, *PLA*, најлон итд. и материјал се испоручује у облику жице намотане у котурове и помоћу једноставних вођица у облику цеви се доводи у загрејану млазницу (дизну) где се материјал топи. Млазница се креће у *x-y* равни и депонује материјал према дефинисаној путањи и као код осталих технологија након завршеног слоја радна платформа се спушта за дебљину слоја (слика 4.5). Дебљина слоја варира и код већине стандардних уређаја износи од 0,05-0,4 mm у зависности од прецизности штампача. Механичке карактеристике делова су сличне онима израђеним другим технологијама попут бризгања пластике. Добре стране *FDM* технологије су приступачна цена уређаја и материјала. Код делова направљених *FDM* технологијом уочава се анизотропност механичких карактеристика које зависе од низа параметара. Лоше стране ове технологије су релативно мала тачност која се креће $\pm 0,5$ mm за хоби и полупрофесионалне штампаче и $\pm 0,2$ mm за индустријске штампаче. Појава компанија које производе јефтине *FDM* штампаче (*Creality*, *Prusa*, *Bambu Lab*) је допринела популарности технологије јер је тако омогућено и хобистима да уђу у свет адитивних технологија. На успешност процеса *FDM* штампе утицај имају бројни фактори, а према [Mazzanti, 2019] и [Gibson, 2021] деле се на факторе екструдирања, факторе процеса и структурне факторе (табела 4.1).



Слика 4.5 Шема *FDM* штампача [Mazzanti, 2019]

Табела 4.1 Утицајни параметри у *FDM* штампи [Mazzanti, 2019; Gibson, 2021]

Фактори		Опис
Екструдер	пречник млазнице пречник филамента	величина излазног отвора на екструдеру пречник филамента
Процес	температура млазнице температура радног стола брзина штампања	температура истопљеног материјала температура површине радног стола брзина депоновања материјала
Структурни параметри	дебљина слоја облик испуне густина испуне број нивоа угао штампања растојање између слојева ширина депонованог слоја путања штампе	дебљина слоја депонованог материјала облик унутрашње структуре проценат материјала у запремини објекта број депонованих нивоа угао између пута штампе и <i>x</i> осе растојање између пута штампања ширина депонованог слоја путања наношења материјала

Процес истискивања материјала у адитивној производњи је сличан истискивању материјала у Архимедовом вијку (завртњу) па може бити објашњен на тај начин. Истопљени материјал се креће кроз комору до њеног самог краја на коме се налази млазница, и то брзином

$$v_1 = \pi D N \cos \phi, \quad 4.1$$

где је D пречник вијка, N је брзина вијка и ϕ је угао вијка [Gibson, 2021]. Брзина материјала кроз млазницу је

$$v_2 = \pi D N \sin \phi. \quad 4.2$$

Запремински проток материјала зависи од димензија и брзине вијка и рачуна се према обрасцу

$$Q_D = \alpha D^2 N H. \quad 4.3$$

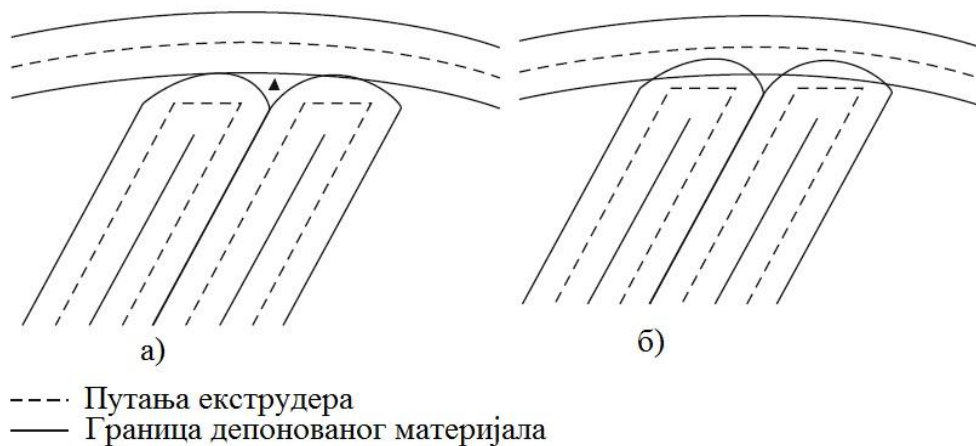
Ако посматрамо кретање истопљеног материјала кроз канал ширине B и висине dy проток је одређен изразом

$$Q_D = \int_0^H \frac{W}{2} B dy = \frac{WBH}{2}, \quad 4.4$$

где је H дубина а $v_1/2$ средња вредност брзине. Заменом вредности за v_1 добија се израз за проток

$$Q_D = \frac{\pi}{2} D N B H \cos \phi. \quad 4.5$$

Делови код којих постоје шупљине имаће слабије механичке карактеристике па је пројектовање путање кретања екструдера веома битно. Постоје две могућности за дефинисање кретања, са циљем веће прецизности (4.6 а) и са циљем бољих механичких карактеристика (4.6 б).



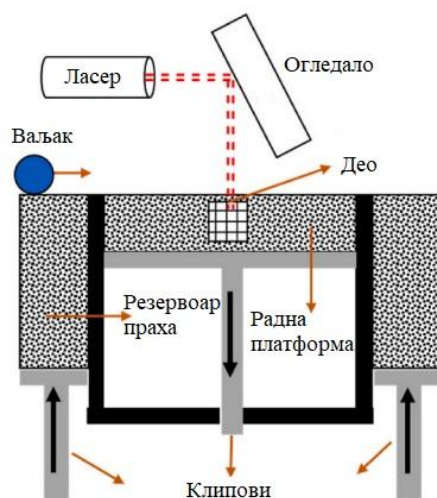
Слика 4.6 Депоновање материјала са циљем: а) веће прецизности и б) бољих механичких карактеристика [Gibson, 2021]

Према [Gibson, 2021], контролисање депоновања материјала је комплексан процес и зависи од бројних фактора који су наведени у табели 4.2.

Табела 4.2 Утицајни фактори на процес депоновања материјала

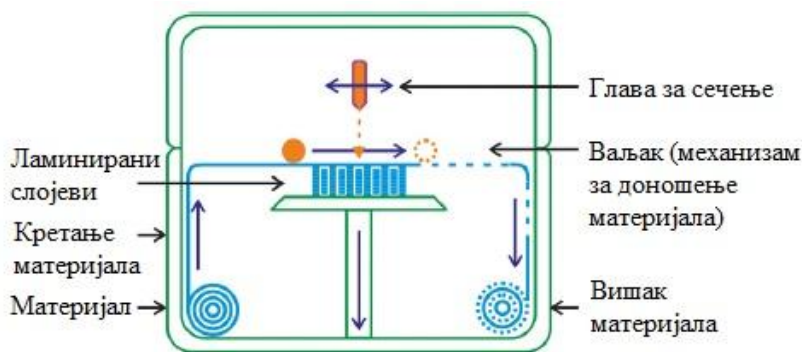
Фактор	Објашњење
Улазни притисак	Притисак се мења током процеса штампања и повезан је са другим параметрима. Променом притиска мења се количина депонованог материјала.
Температура	Одржавање константне температуре је идеално и мале промене ће изазвати промене у депонованом материјалу.
Пречник млазнице	Пречник млазнице се не мења током процеса али многи системи користе млазнице различитог пречника да би били постигнути већа прецизност или брзина.
Карактеристике материјала	При планирању процеса битно је познавати карактеристике материјала попут вискозности да би предвидели кретање материјала кроз млазницу.
Гравитација	Под утицајем гравитације може доћи до цурења материјала. Одговарајућом припремом површина млазнице овај процес је могуће успорити.
Температура дела током штампања	Сви делови се хладе током штампања али се то дешава различитом брзином. Масивнији делови ће дуже задржати топлоту док ће се тањи брже охладити што може довести до кривљења услед хлађења (најчешће код ABS-а).

Фузија прашкастог супстрата је технологија која се заснива на топљењу или синтеровању основног материјала у облику праха. Најчешће се користе *SLS* (Селективно ласерско синтеровање) и *SLM* (Селективно ласерско топљење). Производе се делови од полимера и метала. Добре стране су могућност производње делова високе тачности и могућност коришћења више различитих материјала. Механичке карактеристике делова су добре и одговарају деловима произведеним стандардним технологијама. Недостатак методе су спора израда и квалитет спољашњих површина који често захтева додатну обраду. Током процеса производње користи се неутрална атмосфера изbacивањем кисеоника затим се на целу радну платформу поставља слој праха. Вишак праха се уклања ваљком након чега остаје раван слој где се доводи додатна енергија којом се врши синтеровање или топљење (спајање) материјала. Радна платформа се спушта за вредност дебљине слоја. Током процеса у зависности од врсте материјала комора се загрева на одређену температуру. Шема технологије дата је на слици 4.7.



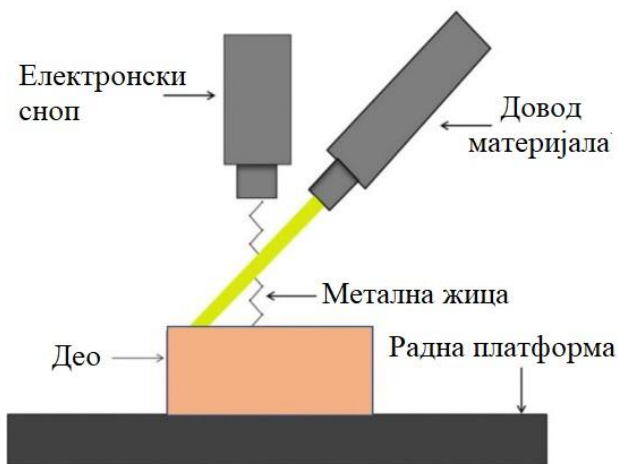
Слика 4.7 Шематски приказ израде дела технологијом фузије прашкастог супстрата [Azam, 2024]

Технологија ламинације фолија се дели на ултразвучну адитивну производњу (*UAM*) и израду објекта ламинацијом (*LOM*). Користе се листови метала (алуминијум, бакар, нерђајући челик, титанијум), пластичне фолије или папир. Поступком *UAM* спајају се листови наведених метала ултразвучним заваривањем тако што се слој по слој ласером исеца контура слоја и заваривањем спаја. *LOM* поступак користи папир или полимерне фолије и загрејаним ваљком се врши ламинирање папира/фолије. После ламинирања слоја спрема се наредни слој. Процес је јефтин и продуктиван али има одређене недостатке. Број материјала је ограничен док су квалитет површина и механичке карактеристике незадовољавајуће. Површине захтевају додатну обраду док због слабих механичких карактеристика делови могу да се користе као конструктивни модели и нису предвиђени за уградњу. Приказ шеме технологије ламинације фолија дат је на слици 4.8.



Слика 4.8 Шематски приказ технологије ламинације фолија [Tamez, 2021]

Технологија *DED* (*Direct energy deposition*) коришћењем усмерене енергије наноси и топи материјал на неку позицију у радном простору. Усмерена енергија добија се коришћењем ласера, плазме или електронског снопа. Млазница се често поставља на роботску руку чиме се обезбеђује вишеосно кретање млазнице. Материјал се доводи у виду праха или у облику жице која је идентична жици која се користи у заваривању. Главне предности технологије су добра искоришћеност материјала док је главни недостатак релативно спор процес и лоша резолуција делова и због тога је неопходна додатна обрада делова. Шема израде *DED* технологијом је дата на слици 4.9.



Слика 4.9 Шематски приказ *DED* технологије [Kumar, 2021]

Сумиране предности и мане наведених метода су због прегледности приказане у табели 4.3.

Табела 4.3 Предности и мане метода адитивне производње [Sandeep, 2017], [Kumar, 2016]

Технологија АП	Предности	Мане
<i>SLA</i>	- делови имају високу резолуцију - нема проблема са зачепљењем млазница - погодан за примену у медицини и стоматологији	- висока цена израде - фотоиницијатори и неочврсла смола могу бити отровни
<i>FDM</i>	- ниска цена - коришћење више врста материјала - производња функционалних делова	- најчешће се користе термопластични полимери - материјал је само у облику жице (филамент) - нехомогене механичке карактеристике израђених делова
<i>SLM</i>	- механичке карактеристике су упоредиве са карактеристикама ливених делова - добра геометријска тачност - нису потребне потпорне структуре - производе се метални функционални делови	- потребно је постпроцесирање машинирањем - висока храпавост површина - спора израда
<i>SLS</i>	- нису потребне потпорне структуре - задовољавајућа чврстоћа израђених делова - праве се функционални делови од полимера, керамике и метала	- појава скупљања и кривљења - висока цена - механичке карактеристике су просечне - делови су порозни
<i>LOM</i>	- брза израда - погодна за израду средњих и великих компоненти	- неопходно постпроцесирање - чврстоћа делова у правцу управном на слој фолије значајно мања - постоји ризик од деламинације (одлепљивања)
<i>3D штампа</i>	- висока резолуција штампе - висока продуктивност - нижа цена у односу на <i>SLA</i>, <i>SLM</i> - могућност штампања меких материјала у више боја	- механичке карактеристике су слабе - делови су порозни - храпава површина делова - потребно доста времена за постпроцесирање - потребна термичка обрада
<i>DED</i>	- слојеви могу бити наношени у било ком правцу - користи се доста материјала - већа брзина израде - могућност производње већих делова	- нижа геометријска тачност - појава степеница на површини дела - неопходно постпроцесирање

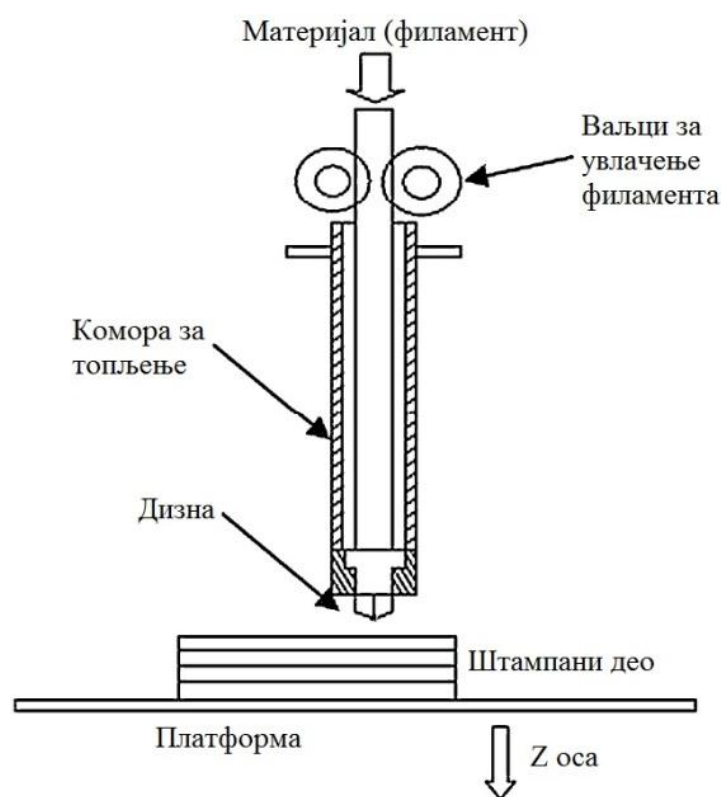
4.1.2 Системи за FDM адитивну производњу

Често се за системе и уређаје за адитивну производњу користи назив 3D штампач. Данас постоје бројни произвођачи 3D штампача нарочито за често коришћене технологије као што су FDM и SLA.

Према [Gibson, 2021], сви системи који се заснивају на депоновању топљеног материјала имају сличне фазе процеса:

- увлачење материјала,
- топљење материјала,
- истискивање материјала под притиском кроз млазницу,
- депоновање материјала према предвиђеној путањи,
- спајање слојева материјала слој по слој да би била добијена жељена структура и
- коришћење ослонаца да би било могуће добити компликоване облике.

На слици 4.10 приказана је шема 3D штампача који ради на основу FDM технологије.

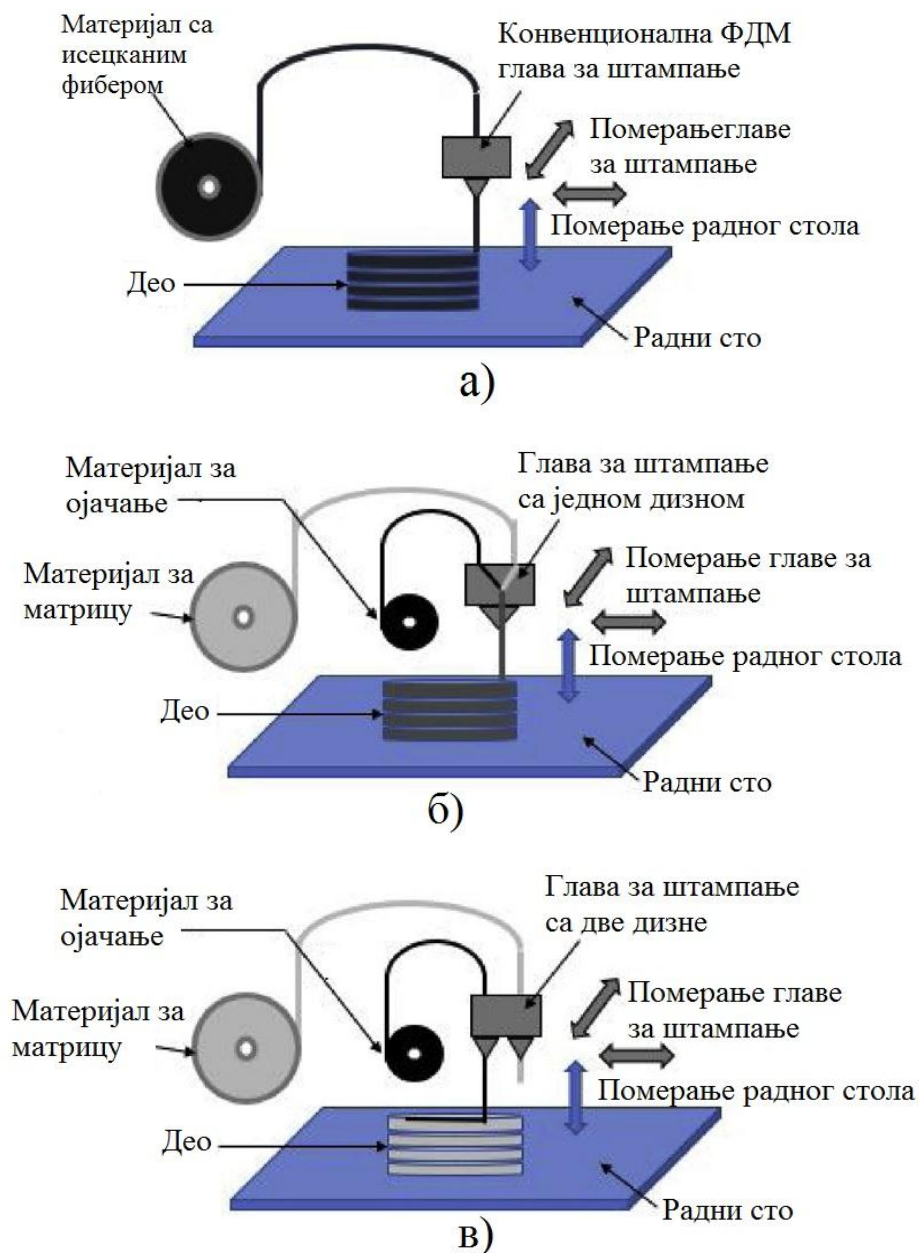


Слика 4.10 Шема FDM процеса [Gibson, 2021]

Да би делови израђени адитивним технологијама имали адекватне карактеристике често се користи метода ојачања коришћењем одговарајућих влакана. Поред стаклених влакана користе се угљенична влакна и кевлар. Према литератури [Naranjo-Lozada, 2019], постоје три различита начина за коришћење влакана:

- тип 1, када су влакна део филамента,
- тип 2, када се влакна доводе до главе за штампање у којој се сједињују са основним материјалом и заједнички штампају и
- тип 3, када су неопходна два екструдера и две млазнице и тада се штампа слој материјала а затим влакно утисне у основни материјал.

Најчешће се користи тип 3, који ће бити коришћен у оквиру експеримента М3, и тада је неопходно да и млазница за ојачавајућа влакна буде загрејана. Илустрација три типа ојачања влакнима дата је на слици 4.11.



Слика 4.11 Типови ојачања влакнима [Naranjo-Lozada, 2019]

4.1.3 Преглед материјала за адитивну производњу

Напретком адитивних технологија повећава се број материјала који се користе. Материјали могу бити у течном стању (фотополимери), у облику праха, фолија или у у облику филамента. Друга подела коришћених материјала је на полимере, метале, керамику и композитне материјале [Bourell, 2017].

Полимерни материјали се деле на термопластику и термосетове. Термопластика која се користи у технологији екструдирања материјала може бити аморфна или као код *PLA* имати кристалну фазу до чак 15%. Најчешће коришћени термопластични материјали попут *ABS* и *PLA* при топљењу имају одличну вискозност што ове

материјале чини погодним за екструдирање кроз млазнице пречника између 0,2 и 0,5 mm. За ослонце које је могуће лако уклонити користи се поливинил алкохол PVA. Највише коришћена термопластика за PBF технологију је полиамид 12 код којег је температура топљења за 35°C виша од температуре кристализације. Термосетови односно стандардни фотополимери се састоје од мономера, олигомера, фотоиницијатора, различитих инхибитора, антиоксиданаса и разних агенаса (*antifoaming agents*).

Метални делови се производе различитим технологијама (FDM, DED, BJ). Комерцијално доступни материјали који се често користе су: Ti6Al4V, 316L и 17-4PH нерђајући челици, 18Ni300, AlSi10Mg, CoCrMo и суперлегуре са никлом Inconel 718 и Inconel 625. Интересантна иновација је штампање металних делова FDM технологијом коју је увела компанија Markforged где се тренутно користи челик 316L. Алуминијум и легуре се производе DED и PBF технологијом.

Висока температура топљења и слаба жилавост отежавају адитивну производњу керамике. Керамика спада у новије материјале у адитивној производњи. Добра особина керамике је отпорност на корозију.

Композитни материјали су веома пожељни у адитивној производњи због добрих механичких карактеристика. У оквиру овог рада коришћен је материјал Оникс који представља композитни материјал где је основа најлон а ситна угљенична влакна се користе да би механичке карактеристике биле побољшане. Штампачи са две главе за штампање могу да користе влакна за ојачање, било угљенична, стаклена или од кевлара.

Детаљан приказ материјала који се користе у адитивној производњи дат је у табели 4.4. Полимерни материјали подељени су у три групе на: аморфне полимере, поликристалне полимере и термосетове.

Табела 4.4 Материјали у адитивној производњи [Bourell, 2017]

Материјали	Материјали			Технологије адитивне производње						
	Аморфни	Поли-кристални	Термореактивни	MEX	VPP	MJT	PBF	BJT	SHL	DED
ABS	x			x						
Поликарбонат	x			x						
PC/ABS	x			x						
PLA	x			x						
Акрили			x		x	x				
Акрилати			x		x	x				
Епокси			x		x	x				
Полиамид 11, 12		x					x			
Полистирен	x						x			
Полипропилен		x					x			
Полиестер							x			
PEEK		x					x			
Чоколада		x								

Табела 4.4 (наставак) - Материјали у адитивној производњи [Bourell, 2017]

Материјали	Материјали			Технологије адитивне производње						
	Аморфни	Поли-кристални	Термореактивни.	MEX	VPP	MJT	PBF	BJT	SHL	DED
Папир									x	
Алум. легуре							x	x	x	x
Со-Ср легуре							x	x		x
Злато							x			
Легуре никла							x	x		x
Сребро							x			
Нерђајући челик							x	x	x	x
Титанијум							x	x	x	x
Ti-6Al-4V							x	x	x	x
Алатни челик							x	x		x

У литератури [Мандић, moodle portal, 2022] наведено је десет најзаступљенијих материјала за адитивну производњу у индустријској примени: најлон, ABS, смола (дуромери - PF, UF, MF, UP, PDAP, SI, EP), HIPS (High impact Polystyrene -полистирен високог утицаја), PLA, PET/PETG (полиетилен терефталат), злато и сребро, нерђајући челици, титанијум и керамика.

За правилан избор материјала потребно је размотрити пре свега технологију која је најповољнија за израду дела а затим механичке и хемијске карактеристике материјала као и цену. С обзиром да је у овом раду коришћена FDM технологија разматрани су материјали који се у њој користе, а предности и недостаци у њиховој примени су приказани у табели 4.5.

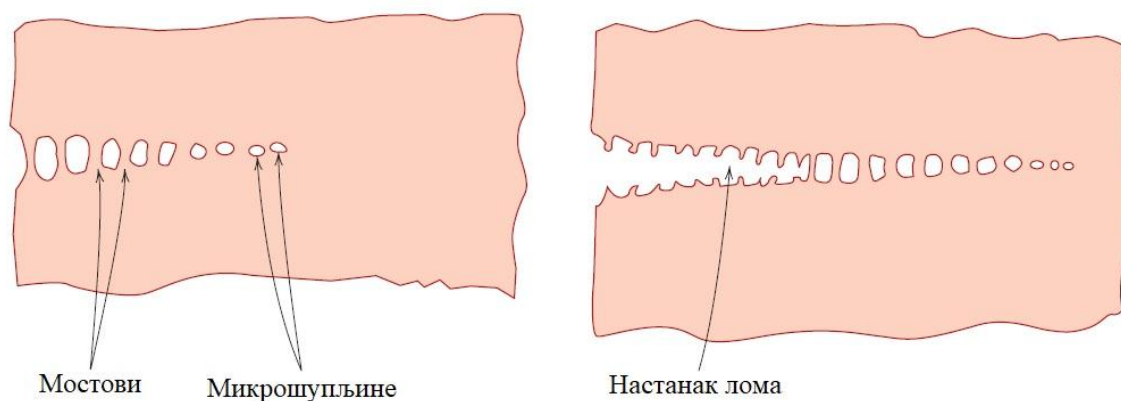
Табела 4.5 Особине материјала који се користе у FDM технологији [Мандић, moodle portal, 2022]

Материјал	Добре карактеристике	Недостаци
Најлон	- издржљив - добар однос чврстоће и еластичности - мале деформације при промени температуре	- има рок трајања, влага задаје велике проблеме - скупљање током хлађења
ABS	- спада у јефтиније материјале - добре механичке карактеристике - дуг век трајања - велики број боја	- отровна испарења се јављају при штампању - потребно је загревање радног стола - при хлађењу се савија, може да се одлепи са радног стола
HIPS	- отпоран на ударце - водоотпоран - ниска цена - лаган и гладак	- појава јаким испарења при изради, препоручује се употреба у вентилираном простору - ако нема сталног протока топлоте, овај материјал може млазницу да зачепи

Табела 4.5 (наставак) - Особине материјала који се користе у FDM технологији [Мандић, moodle portal, 2022]

Материјал	Добре карактеристике	Недостаци
PLA	- мало савијање током хлађења - није потребан загрејан радни сто - могуће је направити финије детаље него са ABS-ом -доступан у доста боја	- смета му изложеност великој топлоти - мање издржљив у односу на ABS
PETG	- издржљив материјал - отпоран на ударце - добро пријањање на претходни слој	- склон је гребану - УВ светло га слаби

Механичке карактеристике полимерних материјала су значајно слабије у односу на карактеристике метала и керамике. Код полимерних материјала најчешће настаје крти лом [Callister, 2020]. Почетне пукотине настају на местима где долази до концентрације напона. Код термопластичних полимера, чија употреба је тема овог истраживања, могућ је настанак пластичног и кртог лома. Бројни су фактори који доводе до кртог лома: снижена температура, повећање брзине деформације, постојање оштрих ивица и сл. Код настанка лома термопластичних полимерних материјала често се дешава феномен који називамо *crazing*, односно настанак много малих пукотина на површини разматраног дела. Овај феномен се код нас често назива појава крокодилских чељусти и приказан је на слици 4.12. Појава подручја локализоване пластичне деформације доводи до формирања малих и повезаних микрошупљина. Ако је затежуће оптерећење довољно велико доћи ће до издужења и пуцања мостова између микропукотина.



Слика 4.12 Настанак лома, ткз. крокодилске чељусти [Callister, 2020]

Иако је адитивна производња већ дуго заступљена у науци и индустрији не постоје посебни стандарди за тестирање материјала за адитивну производњу већ се користе стандарди за тестирање полимерних материјала. Преглед ASTM и ISO стандарда који се често користе за испитивање механичких карактеристика полимерних материјала дат је у табели 4.6.

Табела 4.6 Стандарди за испитивање карактеристика полимерних материјала (користе се и за АП материјале) [Dizon, 2018]

Стандард	Врста испитивања	Карактеристике	Област
ASTM D638 ISO 527	тест затезања	затезна чврстоћа напон течења издужење при лому модул еластичности	полимери
ASTM D412 ISO 37	тест затезања	-II-	гума и термопластични еластомери
ASTM D882	тест затезања	-II-	танке пластичне фолије
ASTM D3039	тест затезања	-II-	композити - полимери ојачани влакнима
ASTM D790 ISO 178	тест савијања	савојна чврстоћа модул савијања	тип А – материјали који се ломе при малом извијању тип Б - материјали који се ломе при великом извијању
ASTM D695 ISO 604	тест притискивања	притисна чврстоћа напон гњечења	крута пластика
ASTM D256 (Изод) ASTM D6110 (Шарпи)	ударно дејство	ударна жилавост	полимери
ASTM E384	Кнуп и Викерс	тврдоћа	полимери
ASTM D2240	Шоров дурометар	тврдоћа меких материјала	еластомери
ASTM D785	Роквел	тврдоћа	полимери
ASTM D2990	затезање, притискивање и савијање	модул пузања и деформација при пузању	полимери
ASTM D7791	тест једноосног променљивог затезања	динамичка издржљивост	полимери
ASTM D3479	тест једноосног променљивог затезања	динамичка издржљивост	композитни материјали са полимерном матрицом
ASTM D7774	тест савијања	савојна динамичка издржљивост (тест са три и четири тачке)	полимери
ASTM D5592	карактеристике полимерних материјала које су потребне за примену у одређеној области		

4.1.4 Технике постпроцесирања

После израде дела адитивном производњом потребно је постпроцесирати део да би део имао жељени облик, тачност и функцију. Начин на који ће део бити постпроцесиран зависи од коришћене адитивне технологије. Третмани

постпроцесирања се деле на третмане за постизање бољег квалитета површине, за добијање веће тачности компоненти и за унапређење механичких особина. У третмане постпроцесирања за постизање бољег квалитета површине спадају уклањање потпорних структура и побољшање текстуре површине брушењем или пескарењем. Већа тачност површина се постиже машинском обрадом или неком од напредних метода (термички, абразивни, хемијски, *EDM*). Третмани постпроцесирања за унапређење механичких особина се деле на нетермичке и термичке. Нетермички поступци се заснивају на употреби различитих инфилтраната или нанокмполитних ојачања. Термички третмани се примењују под различитим температурама и притисцима: ниским, амбијенталним и високим. Технике постпроцесирања се константно унапређују да би механичке и естетске карактеристике материјала биле побољшане.

Квалитет површина делова је често незадовољавајући. Разлог за то могу бити појава степеница због велике вредности дебљине слоја, положај дела при штампању, стручност при уклањању ослонаца итд. У [Ћирић Костић, 2020] дат је детаљан осврт на вредност храпавости површина при коришћењу различитих технологија адитивне производње. Вредности храпавости приказане су у табели 4.7. Постпроцесирање у сврху повећања квалитета површине може бити изведено пескарењем, брушењем, ручним шмирглањем или неким видом хемијске обраде. За добијање сјајности површине често се користи неки вид бојења површина док је у случају материјала *ABS* могуће користити ацетон. Комбинацијом деловања ацетона и фарбања добијају се сјајни делови израђени *FDM* технологијом.

Табела 4.7 Храпавост површина делова у зависности од примењене АМ технологије [Ћирић Костић, 2020]

Технологија	Дебљина слоја, <i>mm</i>	Храпавост површине (R_a), μm
<i>SLA</i>	0,1	20 - 40
<i>SLS</i>	0,125	5 – 35
<i>FDM</i>	0,254	9 – 40
Везивна 3D штампа	0,175	12 – 27
<i>LOM</i>	0,114	6 – 27
Директна 3D штампа	0,1	3 - 30

На тачност димензија израђених делова највећи утицај имају коришћена технологија, коришћени материјал и вештина оператера. За прецизну израду делова неопходна је правилна припрема *stl* фајла односно да при припреми модела не дође до лоше триангулације и смањења тачности. Свака од технологија има одређени опсег тачности па према захтеваној тачности дела треба изабрати технологију. На тачност значајан утицај може имати искуство оператера који дефинише положај дела на радном столу. Многи материјали имају проблем да приликом хлађења долази до скупљања и да тада долази до напрезања која имају утицај на тачност делова. Критична места за појаву кривљења су и нагле промене површине попречног пресека и места гомилања материјала. *FDM* технологија не пружа добру тачност осим код примене индустријских штампача када је тачност у опсегу $\pm 0,2$ mm. Да би била постигнута тачност са неким стандардним АП уређајем могуће је користити скалирање где је потребно одштампати део, измерити га и одредити вредност фактора скалирања који ће при следећој изради дела гарантовати тачне димензије.

Обрада модела са циљем естетских побољшања је веома битна када се делови користе у маркетиншке сврхе или као функционални модели. Естетски се делови

дорађују бојењем, брушењем, хромирањем или наношењем танког слоја металне превлаке. Препорука је да се за израду маркетиншких модела користе технологије директне 3D штампе, као што је *Polyjet*.

Механичке карактеристике делова зависе од врсте материјала, технологије, параметара производње и техника обраде. Код технологија које су засноване на топљењу материјала у облику праха механичке карактеристике материјала гарантује произвођач. У зависности од материјала најчешће произвођач прописује опрему за додатну обраду попут термичке обраде. Метални делови се поред термичке обраде дорађују пескарењем и машинском обрадом. Фотополимери после производње *SLA* технологијом морају бити изложени зрачењу да би полимеризација била завршена. Делови направљени *FDM* технологијом имају механичке карактеристике које много зависе од параметара адитивне производње и утицај процесних параметара је испитан у једном од наредних поглавља овог рада. Делове направљене од праха пожељно је прскати ауто лаком или сличним средствима да би било смањено хабање. Превлачење металима доводи до побољшања механичких карактеристика.

4.2 Пројектовање за адитивну производњу

Адитивна производња има предност у односу на традиционалне производне технологије да може да произведе делове изузетно сложене геометрије без употребе скувих алата. Иако примена адитивних технологија има велики потенцијал са њеном повећаном применом дошло је до дефинисања неких нових ограничења током структурне оптимизације и производног процеса као што су прецизност, повезаност структуре, додатне носеће структуре, храпавост површине, карактеристике материјала за АП итд [Zhu, 2020]. Интеграција ограничења АП технологија, правила конструисања и карактеристика АП материјала је постигнута дефинисањем правила пројектовања за адитивну производњу (*DFAM - Design for additive manufacturing*).

Свака АП технологија има сопствена правила за *DFAM*. Избор адитивне технологије која ће бити коришћена треба обавити током развоја производа. Током избора адекватне АП технологије треба размотрити [Мандић, 2022]:

- функцију производа,
- перформансе производа,
- геометријску сложеност,
- персонализацију производа (специфично за одређеног купца /клијента /пацијента),
- обим продаје,
- време производње и
- стопе повећања производње за лансирање на тржиште.

Према [Мандић, 2022], процес пројектовања за адитивну производњу могуће је поделити на неколико јасно дефинисаних фаза:

- избор адекватне АП технологије,
- избор одговарајућег материјала,
- дефинисање дебљине слоја,
- дефинисање геометријских толеранција и квалитета површине,
- дефинисање потпорних структура и
- дефинисање оријентације штампања.

Све наведене фазе су примењене током дефинисања производних параметара за израду алата за савијање коришћењем АП технологије. Пошто је у овом истраживању

за израду алата коришћен уређај који ради на основу *FDM* технологије већина напомена је везана за наведену технологију.

Постављање потпорних структура и дефинисање оријентације штампања условљени су геометријским карактеристикама разматраног дела као што су [Мандић, 2022]:

- препусти и површине које немају ослонац,
- постојање, величина и оријентација отвора,
- шупљи делови и
- танки делови.

Оријентација делова на радном столу има значајан утицај на:

- потребу за потпорним структурама,
- време штампања,
- максималну висину штампања и
- механичке карактеристике (као у испитивањима у експерименталном делу).

За смањење масе делова често се користи метода израде делова са шупљинама (стандардни облици испуне или решеткасте структуре) као што је приказано на слици 4.13.

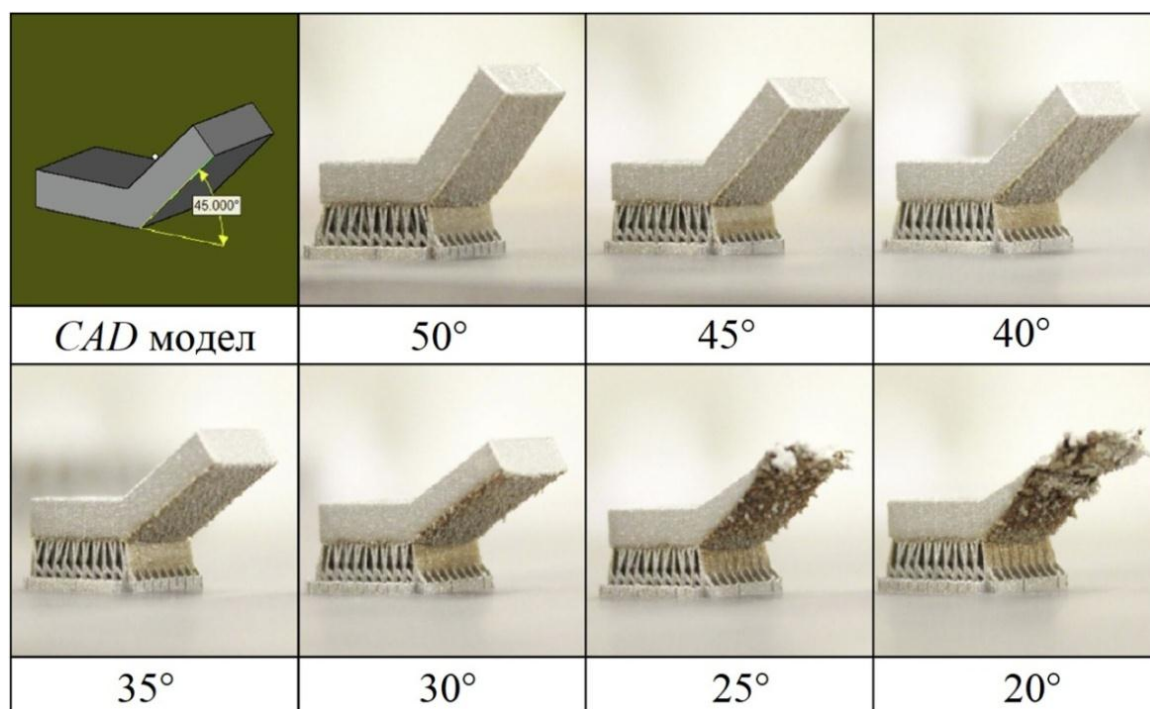


Слика 4.13 Делови направљени са решеткастом структуром
[Мандић, moodle portal, 2022]

За правилну примену тополошке оптимизације потребно је размотрити ограничења која постоје у разматраној адитивној технологији. Ограничења која се разматрају су:

- ограничења минималне дужине,
- ограничења повезаности и
- ограничења препуста.

Наведена ограничења морају бити примењена на тополошки оптимизованом моделу, односно само оптимизован модел који задовољава сва ограничења може бити употребљив. За процену каква ограничења постоје код одређене технологије и уређаја користе се специјализовани тестови са наменски дефинисаном геометријом (шаблонима) где се после штампања мерењем утврђују могућности 3D штампача. Пример теста за одређивање ограничења препуста за *FDM* технологију приказан је на слици 4.14.



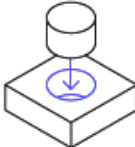
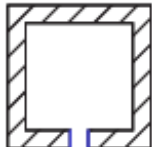
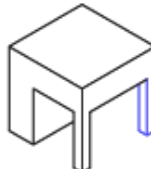
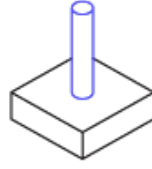
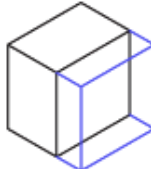
Слика 4.14 Одређивање могућег угла препуста [Zhu, 2020]

Препоруке за конструисање модела и припрему за штампу у складу са *DFAM* правилима, за различите АП технологије, приказане су у табели 4.8. Ту су наведене најважније препоруке о којима треба водити рачуна при конструисању делова који ће бити израђени адитивним технологијама.

Табела 4.8 Правила за конструисање делова за адитивну производњу (*DFAM*)

Техно-логија	Зид повезан са две стране	Зид повезан са једном страном	Угао који је могуће штампати без потпоре	Релефни и урезани детаљи	Распон који може да се штампа без потпорних структура	Минималн и пречник отвора
FDM	0,8 mm	0,8 mm	45°	0,6 mm ширина и 2 mm висина	10 mm	φ2 mm
SLA	0,5 mm	1 mm	увек са потпором	0,4 mm оба	/	φ0,5 mm
SLS	0,7 mm	/	/	1 mm оба	/	φ1,5 mm
MJ	1 mm	1 mm	увек са потпором	0,5 mm оба	/	φ0,5 mm

Табела 4.8 (наставак) - Правила за конструисање делова за адитивну производњу (DFAM)

	<i>Зид повезан са две стране</i>	<i>Зид повезан са једном страном</i>	<i>Угао који је могуће штампати без потпоре</i>	<i>Релефни и урезани детаљи</i>	<i>Распон који може да се штамп без потпорних структура</i>	<i>Минималн и пречник отвора</i>
BJ	2 mm	3 mm	/	0,5 mm оба	/	φ1,5 mm
DMLS	0,4 mm	0,5 mm	увек са потпором	0,1 mm оба	2mm	φ1,5 mm
	<i>Зазор између два покретна дела</i>	<i>Минимални пречник за истицање потпорног материјала</i>	<i>Минималне димензије танких делова</i>	<i>Минималн и пречник цилиндрич ног дела</i>	<i>Очекивана димензиона тачност</i>	
Техно-логија						
FDM	0,5 mm	/	2 mm	3 mm	±0,5% (макс. ±0,5 mm)	
SLA	0,5 mm	4 mm	0,2 mm	0,5 mm	±0,5% (макс. ±0,15 mm)	
SLS	0,3 mm за покретне делове и 0,1 mm за чврсту везу	5 mm	0,8 mm	0,8 mm	±0,3% (макс. ±0,3 mm)	
MJ	0,2 mm	/	0,5 mm	0,5 mm	±0,1 mm	
BJ	/	5 mm	2 mm	2 mm	±0,2 mm за метал и ±0,3 mm за остале	
DMLS	/	5 mm	0,6 mm	1 mm	±0,1 mm	

4.3 Примена адитивних технологија за брзу израду алата

Развојем технологија и материјала примена адитивних технологија се проширила на брзу израду алата. Коришћењем адитивних технологија за израду алата могуће је смањити време израде и скратити време до почетка производње и појаве на тржишту што је кључно за тржишни успех неког производа. Иако технологије којима се метални делови израђују из праха синтерованем или топљењем омогућују производњу делова са квалитетним површинама и високе тврдоће после термичке обраде ипак се алати направљени адитивним технологијама највише користе за израду малих серија.

Постоје две поделе поступака за израду алата адитивним технологијама. Према једној подели деле се на: директну брзу израду алата и индиректну брзу израду алата. Директна брза израда алата је поступак када се конструисани алат штампа изабраном технологијом, најчешће коришћењем поступака који користе металне материјале.

Други приступ је индиректна брза израда алата где се адитивним технологијама израђује мастер модел на основу којег ће касније бити направљен алат.

Друга подела метода за израду алата је на меке и тврде. Код меких поступака материјал алата је најчешће епокси смола или силиконска гума док се код тврдых поступака алат израђује од металних материјала. Алата добијени меким поступком служе за израду малих серија док алата израђени тврдим поступком могу бити коришћени и за великосеријску производњу. Класификација поступака приказана је у табели 4.9.

Табела 4.9 Класификација поступака адитивне производње алата [Мандић, moodle portal, 2022]

Меки поступци адитивне производње алата		Тврди поступци адитивне производње алата	
Директни	Индиректни	Директни	Индиректни
Израда пешчаних калупа SLS поступцима	Израда металних алата распршивањем	RapidTooling	3D Keltool
DirectAIM	Калупи од силиконске гуме	Израда алата од металних ламината (LOM)	EDM електроде
	Ливење у песку	Prometal	Копирне глодалице
	Прецизно ливење	Израда калупа SLS, DLMS, SLM поступцима	
	Ливење са испарљивим моделом		

Индиректна брза израда алата се одвија у два корака, први је израда мастер модела адитивном производњом, а други корак је секундарни процес који не припада адитивним технологијама. Најчешће коришћени секундарни процеси су вакуумско ливење, прецизно ливење, ливење у песку и други. Мастер модел треба да има квалитетне површине па је препорука да се користи нека од прецизнијих технологија као што је полицет, док је при коришћењу технологија које дају лошије површине потребно предвидети додатну обраду.

При изради калупа за ливење у песку мастер модел се поставља у посуду и преко мастер модела наноси се песак који се добро сабија. Ливнице које производе прецизне ливове – микроливове користе топиве мастер моделе које умачу у керамичку емулзију и након печења материјал мастер модела испарава (нестаје) кроз шупљине.

Најпрепознатљивији вид коришћења индиректне израде алата је свакако израда силиконских калупа која се користи као решење за мале серије. Пример израде лопатице гасне турбине коришћењем епокси смоле приказан је на слици 4.15. Мастер модел којем се често при дефинисању геометрије додају уливни канали се поставља у посуду и затим се силиконска смола излива и држи на око 80°C неколико сати док не очврсне. Затим се врши раздвајање, односно сечење калупа по подеоној линији и вади се мастер модел.



Слика 4.15 Модел лопатице (лево), калупи (у средини) и изливени модели од воска (десно) [Vaezi, 2014]

Индиректни меки *RTAM* (*Rapid Tooling by Additive Manufacturing*) поступци обухватају израду металних алата распршивањем, израду калупа од силиконске гуме, израду калупа за ливење у песку, израду алата за прецизно ливење и ливење са испарљивим моделом. Индиректне методе израде тврђих алата се свode на ливење течних метала или мезалног праха са одговарајућим везивом. Синтеровање и инфилтрација секундарним материјалом се врше накнадно. Ова група поступака обухвата методе израде *3D Keltool*, *EDM* електроде и копирање глодалицом.

Као што је наведено индиректне меке методе се користе за израду алата за прецизно ливење. Мастер модел се прави на *3D* штампачу и потапа у емулзију керамичке мешавине да би се формирала превлака која се зове шкољка. Затим се шкољка заједно са мастер моделом пече два до три сата на 1000°C да би се мастер модел отопио и испарио из шкољке. После тога се топљени метал улива у шупљину шкољке и добија облик мастер модела. После хлађења шкољка се ломи и остаје готов одливак. На сличан начин се производе и силиконски калупи. Мастер модел израђен на *3D* штампачу са високом резолуцијом се везује за уливни систем и спушта у контејнер. У контејнер се улива течна емулзија силиконске гуме преко мастер модела. Затим се силиконска гума суши на 70°C око три сата. На калупу се прави линија раздвајања и мастер модел се уклања.

За израду металних калупних уметака користи се јединствена и комерцијално доказана метода *3D Keltool*. Методу је развила компанија *3M* а лиценцу је преузела компанија *3D Systems*.



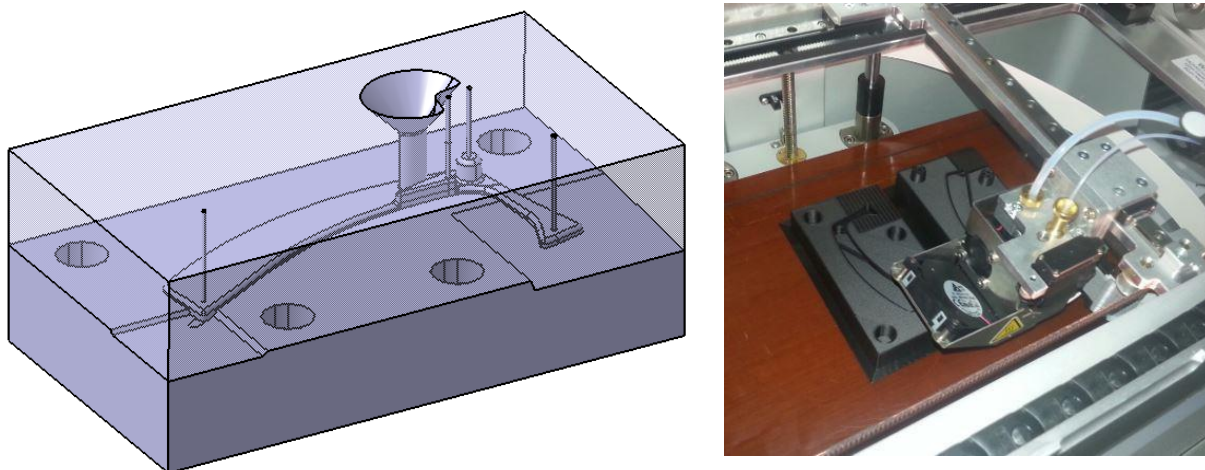
Слика 4.16 Поступак *3D Keltool* [3dsystems]

На почетку процеса израде алата пројектују се шупљина и језгро у *CAD* софтверу. Мастер модел шупљине и језгра се израђује најчешће коришћењем *SLA* технологије и тако израђени модели служе за производњу калупа од силиконске гуме. Силиконски калуп се затим пуни мешавином 70% праха од алатног челика А6, праха волфрам карбида и 30% епоксидног везива који се користи за спајање два праха. Када ова мешавина отврдне у калупу, овај "зелени део" се уклања и спреман је за синтеровање. Зелени делови се стављају у графитну пећ за синтеровање, у контролисаној атмосфери (снижен удео водоника). Током синтеровања везивни материјал сагорева, што резултира „смеђим делом“ који је 70% А6 челика и волфрам

карбида, и 30% празнина (ваздух). Последњи корак је инфилтрација бакра у празнине браон (синтерованог) дела. Добијени део је потпуно компактан производни уметак за израду калупа који се састоји од 70% А6 алатног челика и волфрамовог карбида и 30% бакра. После термичке обраде умети имају тврдоћу између 46 и 50 HRC. Поступак је илустрован на слици 4.16.

Директни поступци за израду алата се деле на поступке директне израде алата и директне израде алата за прототипове. Директна израда алата подразумева израду алата или делова алата од метала *SLS*, *DMLS* и сличним поступцима. Директна израда алата је краћи поступак од индиректног поступка јер подразумева конструкцију алата, прављење *stl* фајла и израду алата адитивном производњом. Директна израда алата пружа одлична унапређења алата за дувану и бризгану пластику због могућности израде канала за хлађење који омогућују боље хлађење алата.

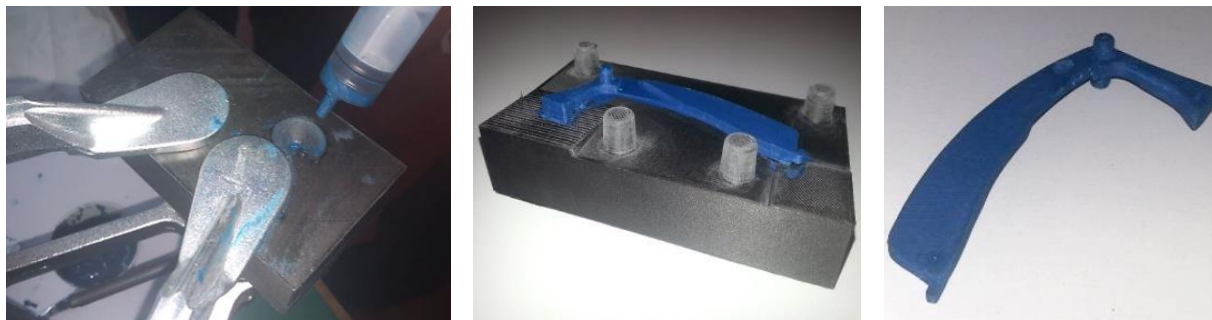
Директна израда алата за прототипове је поступак израде алата за мање серије и алати се често израђују од полимерних материјала. Пример директне израде алата за двокомпонентно ливење пластике дат је на слици 4.17, конструисан и израђен у Центру за виртуелну производњу у оквиру експеримента за мастер рад [Поповић, 2020]. Циљ рада је да се направи алат за ливење ручице. Ручица је скенирана и на основу облака тачака дефинисан је модел и затим је конструисан алат. Дефинисани су битни параметри алата, подеона раван, одушак и уливни канал.



Слика 4.17 Конструисан алат (лево) и израда алата на уређају Markforged Onyx Pro [Поповић, 2020]

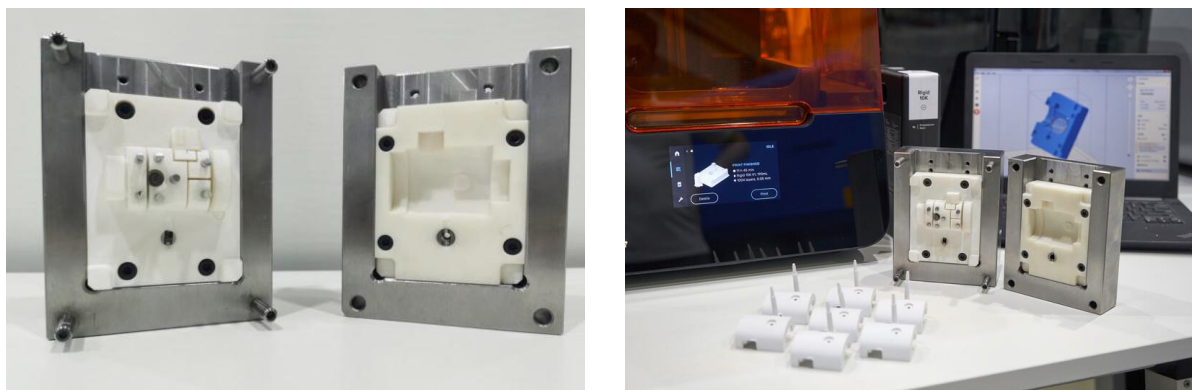
Алат за ливење пластике је израђен од материјала Оникс који представља комбинацију најлона и кратких угљеничних влакана. Коришћена је троугаона испуна са густином испуне 37%. Време израде алата је било 18ч 38 минута што је краће време него да је оваква гравура израђивана конвенционалним методама јер би то подразумевало употребу више машина, чиме је доказана оправданост коришћења адитивних технологија за израду алата за двокомпонентно ливење пластике.

После израде алата део је направљен ливењем двокомпонентне смеше, односно специјалне смоле за ливење Неукадур у комбинацији са очвршћивачем. Поступак ливења у адитивно произведеном алату је приказан на слици 4.18.



Слика 4.18 Ливење пластике (лево), део у алату (средина) и готов део (десно)
[Поповић, 2020]

Од директних поступака издваја се *AIM (ACES Injection Molding)* поступак. Уместо да се израђују мастер модели калупних шупљина АП технологијом око којег се излива материјал, такође је могуће изградити шупљину директно на 3D штампачу за стереолитографију. Ознака *ACES* означава *accurate clear epoxy solid*, прозирни епоксидни полимер. Калупи могу бити испуњени разним материјалима као што су термопластика, керамика, метали ниске температуре топљења и епоксид пуњен алуминијумом. Коришћењем алата направљених овим поступком могуће је направити до 100 делова са тачношћу $\pm 0,15 \div 0,3$ mm. Примењују се за мање делове, најчешће за прототипове алата за бризгање и ливачке шаблоне мање запремине. Пример алата приказан је на слици 4.19.



Слика 4.19 Алат направљен AIM поступком [Formlabs]

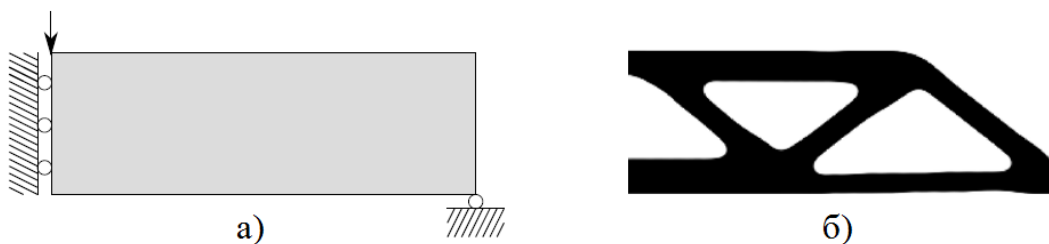
4.4 Тополошка оптимизација

4.4.1 Принципи тополошке оптимизације

Тополошка оптимизација (ТО) је математичка метода која се користи у фази концептуалног развоја производа са циљем што бољег искоришћења материјала. Полазни подаци за тополошку оптимизацију су концептуални модел машинског дела и ограничења која конструктор дефинише. Разматрана ограничења су геометријска, која описују минималне геометријске захтеве које део мора да испуни, и ограничења радних услова. Ограничења радних услова су описана кроз силе и оптерећења којима је део изложен.

Смањење масе машинских делова је тежња савремене индустрије па се у складу са тим на тржишту појавило више комерцијалних софтвера који су специјализовани за

тополошку оптимизацију. На основу 3D модела и дефинисаних оптерећења софтвер даје предлог облика дела. Софтвери који су заступљени у индустрији и истраживањима су *nTopology*, *Solidworks simulation*, *Altair Optistruct*, *Ansys mechanical* итд. Софтвери коришћењем методе коначних елемената праве мрежу на разматраном делу и на основу резултата симулације одређују у ком делу је расподела материјала адекватна односно на ком делу је могуће уклонити материјал тако да не угрози функцију дела а да маса дела буде смањена. Илустрација тополошке оптимизације дата је на слици 4.20. Уопштено гледано, тополошка оптимизација се заснива на много итерација распоређивања материјала све док се не пронађе најбоље решење.

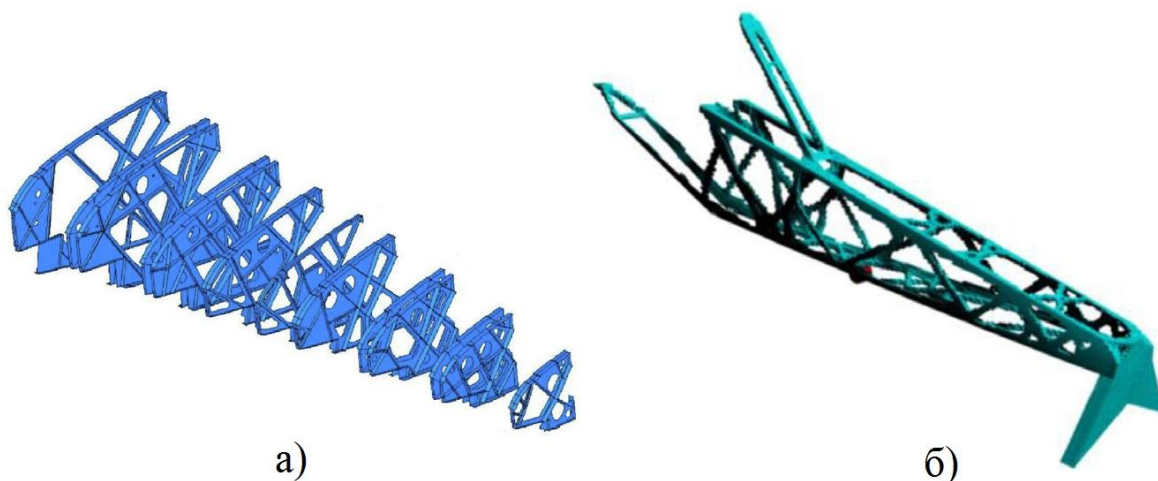


Слика 4.20 Пример тополошке оптимизације: а) део са оптерећењима и ослоњцима
б) део након тополошке оптимизације [Clausen, 2016]

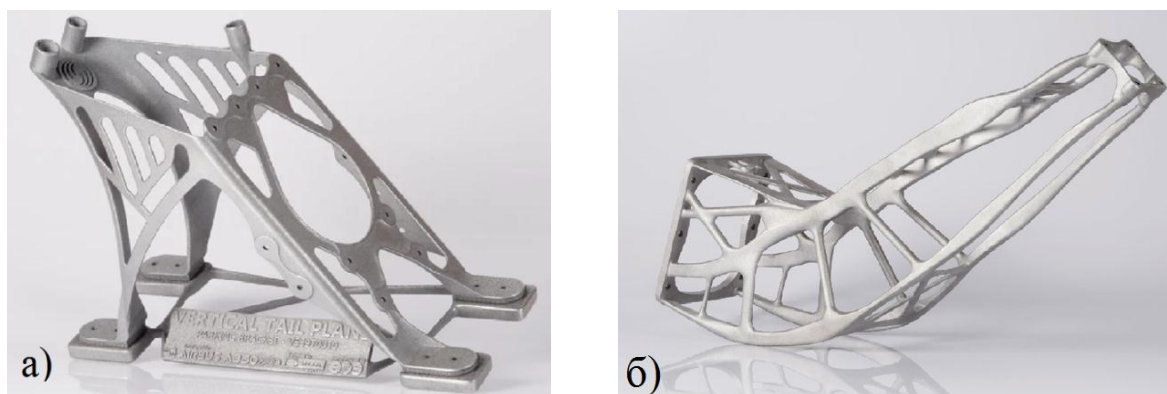
Поред наведених предности тополошка оптимизација има и неке недостатке. Део који је оптимизован на овај начин често је тешко направити стандардним технологијама попут обраде резањем због постојања унутрашњих шупљина неправилних облика. Међутим, тополошки оптимизован дизајн је изузетно погодан за примену у адитивној производњи. Тополошка оптимизација је велику примену нашла у области адитивне производње где се смањењем масе дела значајно смањује и време израде и трошкови што повећава конкурентност. Примена ТО је нарочито пожељна у процесима адитивне производње метала. Проблем при оптимизацији делова који се израђују од полимера је у томе што често трошкови оптимизације могу да превазиђу трошкове производње. Појавом софтвера који имају модуле за тополошку оптимизацију и који су у великој мери аутоматизовани примена ТО постаје применљива и у подручју оптимизације делова од полимера.

Тополошка оптимизација је највећу примену нашла у авио индустрији, аутомобилској и индустрији медицинских уређаја. Резултат анализе су сложени облици делова који имају најбољи однос крутости и масе и минималну количину употребљеног материјала. Бројни су примери успешне примене тополошке оптимизације у индустрији. Применом тополошке оптимизације компанија *General electric* је смањила масу корпе мотора за 84% и тиме уштедела 31 милион долара [Morgan, 2014].

Неки примери су приказани на слици 4.21, при чему је на слици 4.21 а) приказан оптимизовани носач носа авиона а на слици 4.21 б) оптимизовани пилон авиона. Примери тополошки оптимизованих делова из привреде приказани су на слици 4.22. На слици 4.22 а) приказан је носач каблова за *Airbus A350* коме је маса смањена за 30%. На слици 4.22 б) приказан је носач антене чија је маса смањена са 1,6 kg на 0,94 kg. Оба дела произведена су коришћењем АП технологије селективног ласерског топљења.

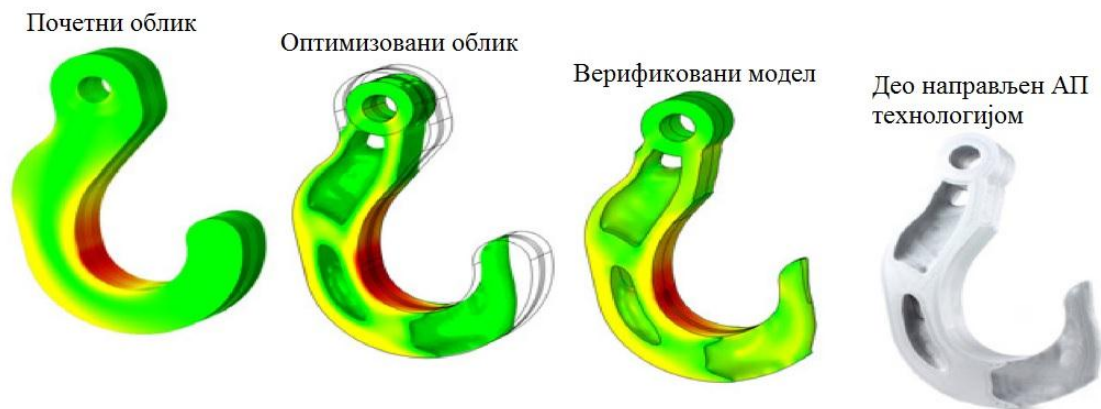


Слика 4.21 Примери употребе ТО у индустрији: а) носач носа авиона б) пилон авиона [Zhu, 2020]



Слика 4.22 Примери тополошки оптимизованих делова који су направљени АП технологијом: а) носач каблова б) носач антене [Zhu, 2020]

Процес тополошке оптимизације приказан је на слици 4.23. После дефинисања почетног изгледа урађена је анализа оптерећења коришћењем МКЕ методе и део је тополошки оптимизован. Након потврде да оптимизовани део може да задовољи услове оптерећења део је направљен помоћу АП технологије.



Слика 4.23 Пример тополошке оптимизације [Prathyusha, 2022]

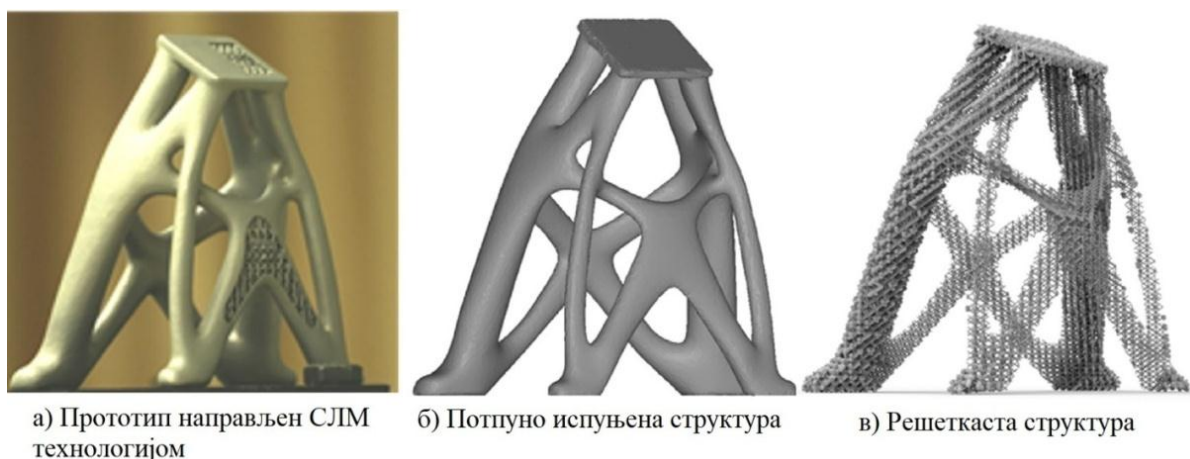
Након тополошке оптимизације у одређеном софтверу потребно је добијену геометрију експортирати у формату који је погодан за адитивну производњу. Најчешће се користи формат *stl*, док је као замена могућа употреба *AMF* формата.

Тренутна истраживања везана за примену тополошке оптимизације у комбинацији са адитивном производњом могуће је поделити у два правца:

- први је пројектовање мултихијерархијских структура прилагођених потребама адитивне производње и
- други је интеграција ограничења која постоје у адитивној производњи у сам процес тополошке оптимизације.

Пример интеграције ограничења АП технологија у процес тополошке оптимизације приказан је кроз оптимизацију алата за савијање у последњем делу рада.

У последње време истраживања су све више усмерена на примену решеткастих структура. Решеткасте структуре је немогуће направити стандардним производним технологијама попут обраде резањем, деформисањем или заваривањем док применом адитивних технологија њихова употреба постаје примамљива. На слици 4.24 приказане су неке решеткасте структуре које су добијене коришћењем адитивних технологија на индустријском примеру. Приказана је структура носача чија је унутрашњост решеткаста структура. Овом оптимизацијом маса носача је смањена за 17%.

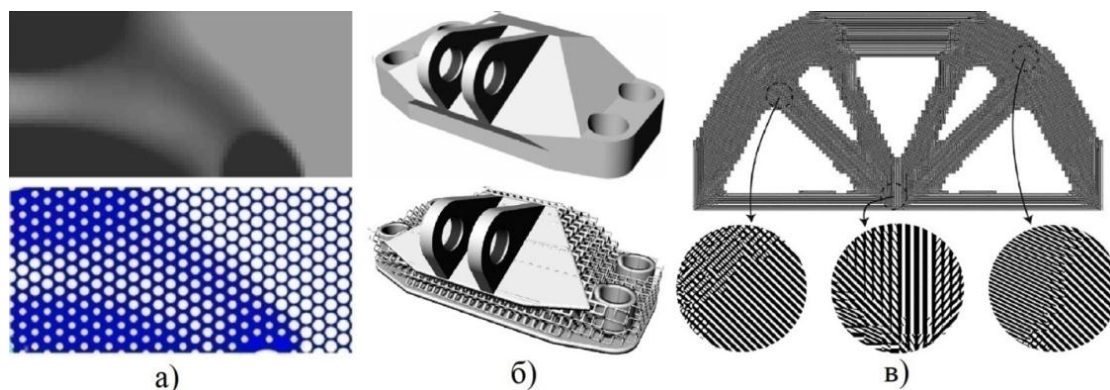


Слика 4.24 Оптимизација носача [Zhu, 2020]

Већина истраживања на пољу тополошке оптимизације усмерена су на:

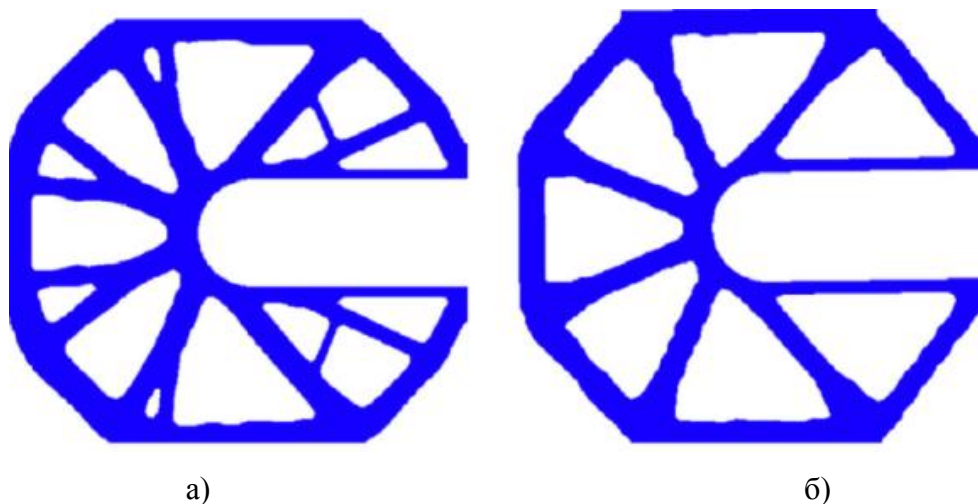
- структурни дизајн који представља комбинацију мапирања и методе густине,
- структурни дизајн потпорних структура и
- оптимизацију макро и микроструктуре засновану на хомогенизацији.

Мапирање у комбинацији са методом густине представља варијанту *SIMP* методе и расподела густине тежи континуитету. На слици 4.25 а) приказана је оптимизована расподела густине једноставно оптерећене греде са решеткастом испуном. На слици 4.25 б) приказан је метод у којем се само функционалне запремине испуњене решеткастом структуром оптимизују док су функционалне површине заштићене. На слици 4.25 в) приказана је структура материјала која варира од тачке до тачке да би структура имала боље перформансе. За овакав начин тополошке оптимизације користи се метода коначних елемената.



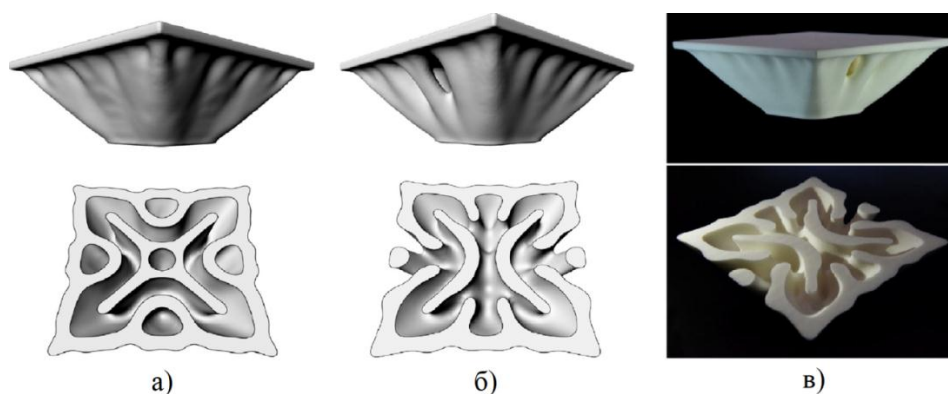
Слика 4.25 Примери тополошки оптимизованих делова: а) тополошки оптимизована греда са шестоугаоном испуном, б) оптимизован носач мотора са решеткастом испуном и в) оптимизована структура моста [Zhu, 2020]

Увођење ограничења максималног распона, при ком је могуће штампати део без потпорних структура, у процес тополошке оптимизације је веома важно да би оптимизован део било могуће произвести технологијама адитивне производње [Zhu, 2020]. Посебну пажњу треба обратити на дужину мостова (*bridging*), малих отвора (*small holes*) и танких зидова (*thin walls*). Ограничење максималног распона се веома често користи у тополошкој оптимизацији са приступом густине. Дефинишу се минимална дужина на потпуно испуњеном и шупљем делу (*Heaviside step filter*). Ово ограничење може бити експлицитно дефинисано као минимално растојање између два дела и интегрисано је у софтверска решења која се користе за тополошку оптимизацију. Пример оптимизације машинског дела са поштовањем максималног распона урађеног у софтверу *Altair optistruct* приказан је на слици 4.26.



Слика 4.26 Тополошка оптимизација дела: а) без ограничења максималног распона б) са ограничењем максималног распона [Prathyusha, 2022]

Често се дешава да је немогуће уклонити потпорне структуре или прах када код штампаних делова постоје затворене шупљине. Због ових разлога неопходно је избећи конструкцију делова са затвореним шупљинама. У [Li, 2016] предложен је метод виртуелних температура којим се овај проблем у тополошкој оптимизацији избегава. Пример тополошке оптимизације са разматрањем ограничења повезаности приказан је на слици 4.27.



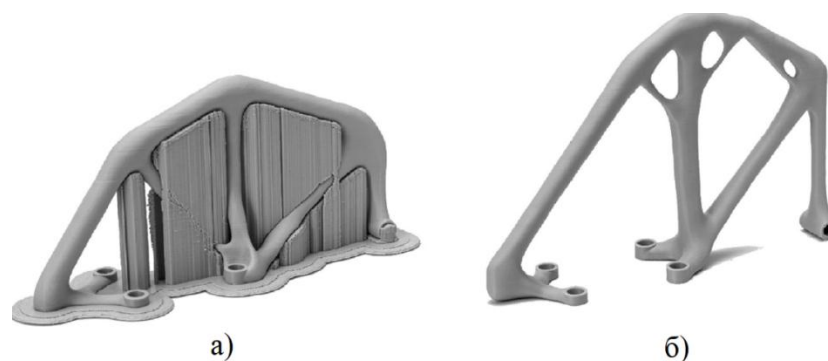
Слика 4.27 Пример тополошке оптимизације: а) без ограничења повезаности б) са ограничењима повезаности и в) 3D штампани модел [Prathyusha, 2022]

У многим АП технологијама (нарочито у FDM) често је неопходно користити потпорне структуре. Коришћење потпорних структура доводи до повећања потрошње материјала и времена израде као и цене дела због значајних трошкова постпроцесирања. Новија истраживања усмерена су ка томе да се омогући оптимизација делова на такав начин да потпорне структуре не буду неопходне. Циљ многих истраживања је конструкција потпорних структура које би могле да смање потрошњу материјала и времена израде. На слици 4.28 а) приказана је тополошки оптимизована потпорна структура а на слици 4.28 б) потпорна структура у облику дрвета која омогућава лакше уклањање и мање време израде [Zhu, 2020].



Слика 4.28 Иновативне потпорне структуре: а) тополошки оптимизоване б) потпорне структуре у облику дрвета [Zhu, 2020]

Повезивање ограничења препуста и тополошке оптимизације је веома значајна тема у новим истраживањима из ове области. На слици 4.29 је дато поређење дела чији облик није оптимизован и захтева потпорну структуру (4.29а) и тополошки оптимизованог облика који не захтева потпорну структуру (4.29б). Ограничења дужине и ограничења препуста могу бити интегрисана у процес тополошке оптимизације кроз методу густине.



Слика 4.29 Облик оптимизованог дела: а) који захтева потпорну структуру и б) који не захтева (self-support) [Zhu, 2020]

Према [Brackett, 2011], четири су главна разлога зашто је битно смањење количине потпорног материјала:

- коришћењем потпорних структура повећава се потрошња материјала који најчешће није могуће поново употребити, а количина утрошеног потпорног материјала може бити до 70% основног материјала,
- постављање потпорних структура зависи од оријентације модела на радном столу и често је потребно значајно искуство и знање лица које припрема део за штампу,
- уклањање потпорних структура захтева ручни рад и доста времена нарочито у процесима штампања метала и
- потреба за ручним уклањањем потпорних структура захтева да постоји физички приступ делу где су потпорне структуре.

Хоризонтално растојање које је могуће постићи без употребе потпорних структура зависи од угла нагиба, коришћене технологије, материјала и коришћеног штампача. На пример, за угао од 30° могуће је постићи дужину 20 mm, док је за угао од 25° могуће постићи 15 mm. За угао 45° (правило угла 45°) не постоје ограничења дужине [Brackett, 2011].

4.4.2 Методе тополошке оптимизације

Методе тополошке оптимизације се веома брзо развијају. Прву студију о тополошкој оптимизацији објавили су Бендсо (Bendsoe) и Кикучи (Kikuchi) 1988. године [Sigmund, 2013]. Постоји више различитих метода оптимизације попут методе густине (density), методе нивоа (level set), методе тополошких извода (topological derivative), фазног поља (phase field), еволуционарне (evolutionary) и друге [Sigmund, 2013]. Све методе имају за циљ одређивање како распоредити материјал да би механичке особине структуре биле задовољавајуће. У почетку је метода примењивана само на чврстим материјалима али се сада примењује и у области флуида, акустике, електромагнетике.

Тополошка оптимизација одређује оптимални распоред материјала тако што минимизира циљну функцију ограничену са једним или више ограничења C_k (запреминско ограничење $C_0 < 0$; и низ других ограничења $C_k < 0$, $k=1 \dots N$). Распоред материјала по запремини описана је променљивом густине $\rho(x)$, функције $\lambda(x)$ или функције нивоа $\psi(x)$ у зависности од методе која се користи [Yago, 2022].

Расподела материјала у простору је описана променљивом густине $\rho(x)$ која може имати вредност 0 (шупљина) или 1 (пун материјал) у свакој тачки домена Ω

[Sigmund, 2013]. Сигмунд (Sigmund) и Мауте (Maute) су проблем тополошке оптимизације описали једначинама:

$$\min: F = F(u(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(u(\rho), \rho) dV; \quad 4.6$$

$$G_0(\rho) = \int_{\Omega} \rho(x) dV - V_0 \leq 0; \quad 4.7$$

$$G_i(u(\rho), \rho) \leq 0, j = 1, \dots, M; \quad 4.8$$

$$\rho(x) = 0 \text{ или } 1, \text{ за свако } x \in \Omega, \quad 4.9$$

где је са F означена циљна функција, са G_0 запреминско ограничење са M могућих ограничења и са $\rho(x)$ је означена променљива густине.

Оптимизацију је могуће урадити на два начина, оптимизацијом облика или методом густине. Ова два приступа се називају и Лагранжов и Ојлеров приступ. Лагранжов приступ подразумева дефинисање нових рупа на оптимизованом делу. Сличан метод назван метод мехурова (*bubble method*) је у раду предложио Ешенхауер. Метода подешеног нивоа (*level set*) се такође заснива на промени граница уместо рада са локалним променљивама густине.

Применом методе густине проблем тополошке оптимизације се решава поделом домена на велики број коначних елемената и расподела густине се дефинише са N елемената или чворних променљивих. Проблем оптимизације се у овом случају дефинише [Sigmund, 2013]:

$$\min F(u(\rho), \rho) = \sum_i \int_{\Omega_i} f(u(\rho_i), \rho_i) dV; \quad 4.10$$

$$G_0(\rho) = \sum_i v_i \rho_i - V_0 \leq 0; \quad 4.11$$

$$G_j(u(\rho), \rho) \leq 0, j = 1, \dots, M; \quad 4.12$$

$$\rho_i = 0 \text{ или } 1, i = 1, \dots, N; \quad 4.13$$

где је ρ променљиви вектор дужине N .

Метода густине заснована је на закону енергије или *SIMP*-у (*Simplified isotropic material with penalisation*). Веза између променљиве густине и карактеристике материјала дата је изразом [Sigmund, 2013]:

$$E(\rho_i) = g(\rho_i) E_0 = \rho_i^p E_0, g(\rho_i) = \rho_i^p, \quad 4.14$$

где је p параметар пенализације и E_0 Јунгов модул еластичности. Када је $p=1$ проблем оптимизације има јединствено решење. За вредности $p > 1$ пожељно је користити 0-1 решења. Ако је вредност p превелика или премала долази до пребрзе конвергенције ка локалном минимуму. Најбоља конвергенција ка употреби решења 0-1 је у случају $p = 3$.

Столпе и Сванберг су увели *RAMP* (*Rational Approximation of Material Properties*) методу која је веома слична *SIMP*, према којој је:

$$E(\rho_i) = \frac{\rho_i}{1 + q(1 - \rho_i)} E_0, \quad g(\rho_i) = \frac{\rho_i}{1 + q(1 - \rho_i)}, \quad 4.15$$

где је q параметар пенализације. Разлог за увођење *RAMP* приступа је осигуравање конвергенције проблема ка 0-1 решењу.

Постоје бројне методе интерполације материјала које имају исту сврху, да обезбеде континуалну интерполацију између пуног и шупљег простора и све оне се означавају истом скраћеницом *SIMP*. Алтернатива употреби имплицитног *SIMP* је експлицитни који се добија додавањем услова (α је тежински фактор):

$$\alpha \int_{\Omega} \rho(1 - \rho) dV. \quad 4.16$$

Метода *SIMP* се на основу ограничења која се користе дели на једноструки, двоструки и троструки *SIMP*. Ограничења променљивих густине уводе се преко филтера осетљивости у једноструком *SIMP*-у. Филтер осетљивости мења осетљивост елемента да буде просечна вредност околних елемената у радијусу r_{min} . Филтер осетљивости има и одређене недостатке. Увођењем радијуса r_{min} нестаје сива зона између пуних и шупљих делова запремине.

Алтернатива коришћењу филтера осетљивости је коришћење експлицитних ограничења и шема пенализације у облику градијента или периметарских ограничења [Sigmund, 2013], која могу бити записана у облику:

$$\alpha \int_{\Omega} \|\nabla \rho\|_q dV, \quad 4.17$$

где је q нормала градијента поља густине.

Варијација експлицитне пенализације је сређена експлицитна пенализација:

$$\alpha \int_{\Omega} \bar{\rho}(1 - \bar{\rho}) dV, \quad 4.18$$

где се $\bar{\rho}$ односи на просек густине у фиксираним околним елементима у радијусу r_{min} , и ово ограничење омогућава дизајн 0-1.

Поред једноструког *SIMP*-а користи се и двоструки. У овој методи алтернатива коришћењу филтера осетљивости је коришћење филтера густине [Sigmund, 2013], према којем се дефинише физичка густина елемента $\bar{\rho}$ као просек променљивих у радијусу r_{min} . Филтер је могуће записати као Хелмхолцов (*Helmholtz*) тип дифузног оператора [Sigmund, 2013]:

$$-r^2 \Delta \bar{\rho} + \bar{\rho} = \rho, \quad 4.19$$

где је r дужина периметра који се односи на радијус r_{min} . Када се користи филтер густине приступ називамо приступ са два поља тј. двоструки *SIMP* зато што се користе поље променљиве ρ и поље густине $\bar{\rho}$.

Трећи приступ се назива *SIMP* са три поља или пројекциона шема, и предложен је да би била избегнута сива зона која је повезана са већ изложеним филтерима. Назив *SIMP* са три поља је дат јер приступ ради са пољем променљиве ρ , пољем густине $\bar{\rho}$ и пољем пројекције $\hat{\rho}$.

Методу која користи тополошке изводе предложио је Ешенхауер (*Eschenauer*) и назвао је метода мехура. Метода се заснива на предвиђању утицаја увођења бесконачно малих отвора у одређеној тачки x у домену Ω и генерисању нових отвора на основу постојеће. Суштина методе је одређивање неког отвора који ће представљати шупљину и на основу њега вршити оптимизацију, односно сав простор који је могуће променити из пуног материјала у шупљину.

У приступу подешеног нивоа граница разматрања дефинисана је контуром нултог нивоа функције $\phi(x)$ и структура је дефинисана доменом где функција нивоа има позитивне вредности [*Sigmund, 2013*]:

$$\rho = \begin{cases} 0: \forall x \in \Omega: \phi < 0, \\ 1: \forall x \in \Omega: \phi \geq 0. \end{cases} \quad 4.20$$

Најчешће се за дефинисање функције подешеног нивоа користи Хамилтон – Јакоби једначина:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -Vn \cdot \nabla \phi, \quad 4.21$$

или за $n = (\nabla \phi) / (|\nabla \phi|)$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + V|\nabla \phi| = 0, \quad 4.22$$

где је t време које представља време развоја облика током процеса оптимизације док је V функција брзине. Пошто функција подешеног нивоа делује само на постојећим површинама на почетном облику, применом функције није могуће направити нове отворе. Да би овај проблем био решен, тј. да би било могуће креирати нове отворе, једначина Хамилтон – Јакоби је проширена [*Sigmund, 2013*]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + V|\nabla \phi| - D(\phi) - R(\phi) = 0, \quad 4.23$$

где је D дифузни оператор, R изворни услов, V функција брзине, t псеудо време које представља развој дизајна у процесу оптимизације, $\nabla \phi$ је градијент функције подешеног нивоа.

У [*Sigmund, 2013*] наведен је пример нелинеарног дифузионог модела који су предложили Олсон и Крејс који се користи у комерцијалном софтверу *Comsol*:

$$D = \gamma \nabla \cdot \left(\epsilon \nabla \phi - \frac{1}{\epsilon} (1 + \phi)(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right). \quad 4.24$$

Нагиб функције могуће је контролисати регулисањем параметара γ и ϵ .

Приступ фазног поља се заснива на раду са променљивама густине са циљем минимизирања функције [*Sigmund, 2013*]:

$$\bar{F}(u(\rho), \rho) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\varepsilon} w(\rho) + \varepsilon |\nabla \rho|^2 \right) dV + \eta F, \quad 4.25$$

где је $w(\rho)$ двострука функција која узима вредност 0 за $\rho = 0$ и вредност 1 за $\rho = 1$. Употребом двоструке функције омогућено је да интерполациона функција $g(\rho)$ може да буде представљена као линеарна функција од ρ . Тежински фактор је означен са η а дебљина између фаза ε . Извод претходне функције је:

$$\overline{F_{\rho}} = \frac{1}{\varepsilon} w_{\rho} - \varepsilon \Delta \rho + \eta F_{\rho}, \quad 4.26$$

где $'\rho$ значи извод по ρ . Ову функцију је могуће минимизирати коришћењем Кан – Халијардове једначине [Sigmund, 2013]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (M \nabla \overline{F_{\rho}}), \quad 4.27$$

где је M коефицијент дифузије. Пошто је наведена једначина диференцијална једначина четвртог реда пожељно је раздвојити је на две једначине:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (M \nabla \mu), \quad 4.28$$

$$\mu = \frac{1}{\varepsilon} w_{\rho} - \varepsilon \Delta \rho + F_{\rho}, \quad 4.29$$

где је μ помоћно поље.

У раду [Sigmund, 2013] наведено је да постоји све више научних радова у којима су представљени начини коришћења приступа подешеног нивоа са могућношћу увођења нових отвора током процеса оптимизације. Ова метода је спроведена заменом $-V|\nabla \phi|$ у једначини (4.22) са циљем минимизирања функције:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial \bar{F}}{\partial \phi}. \quad 4.30$$

Функција је дефинисана као сума еластичне енергије и дифузионог услова:

$$\bar{F} = \int_{\Omega} f H(\phi) dV - \int_{\Omega} \frac{1}{2} \tau |\nabla \phi|^2 dV. \quad 4.31$$

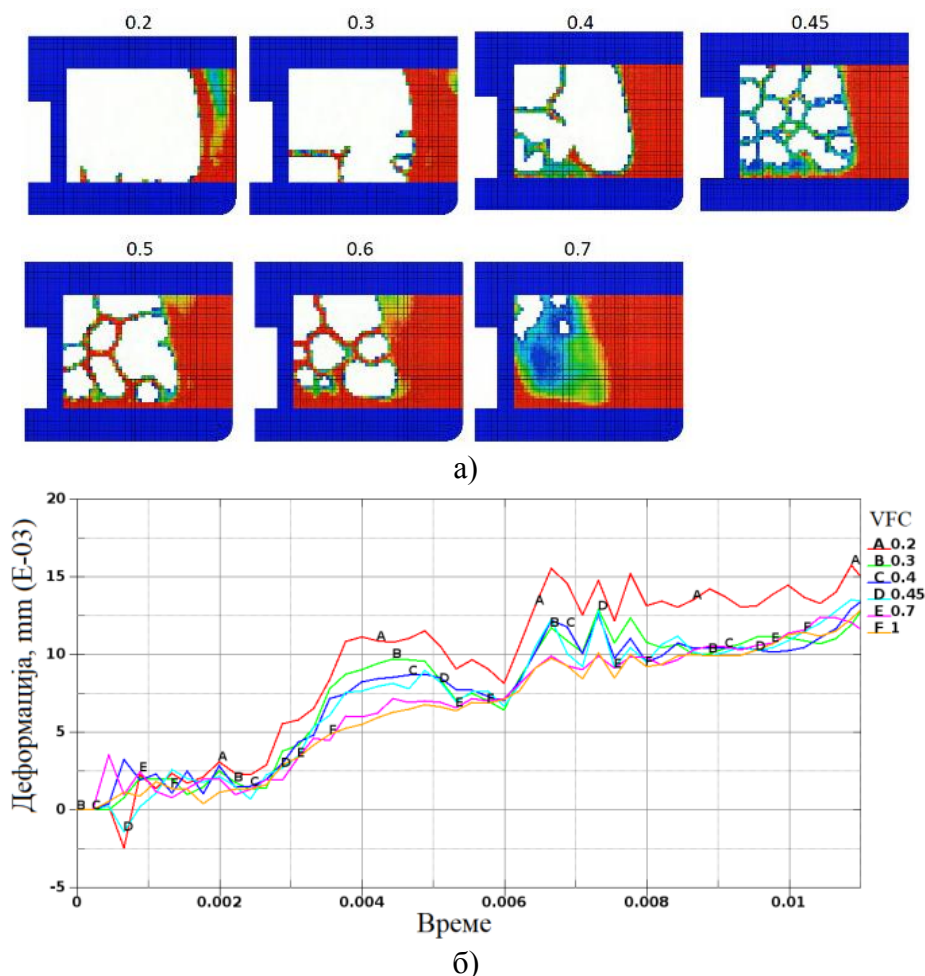
4.4.3 Примери тополошке оптимизације компоненти алата

Производња алата од метала адитивним технологијама је веома скупа па примена тополошке оптимизације омогућава значајне уштеде. У оквиру овог подељка представљени су примери делова алата који су тополошки оптимизовани и затим израђени адитивним технологијама.

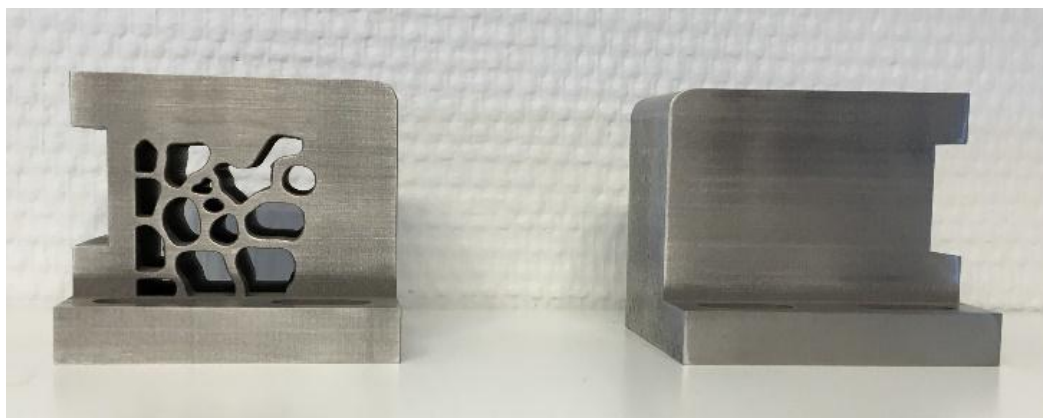
Пример коришћења адитивно произведених и тополошки оптимизованих алата дат је у [Asnafi, 2019]. Алати за двоугаоно савијање и просецање су израђени применом адитивне PBF технологије од челика 1.2709 и затим је обликован лим од челика DP600

дебљине 2 mm. Доказ да алат за савијање задовољава је 50000 савијених делова без појаве огреботина на површини. За алат за просецање мерило је 100000 просечених делова са максималном вредношћу грата од 0,2 mm. Нумеричком анализом оптерећења алата за савијање, применом методе коначних елемената, направљене су варијанте алата са различитим вредностима ограничења запремине. Све варијанте су нумерички тестиране и одређене су деформације које се јављају. Резултати су приказани на слици 4.30. На основу детаљне анализе направљен је алат са коефицијентом ограничења запремине 0,45. На слици 4.31 приказани су алати направљени *PBF* технологијом, тополошки оптимизован и потпуно испуњени. Пошто је задовољен услов броја савијања потврђено је да оптимизовани облик задовољава све услове. Тополошки оптимизован и потпуно испуњен алат за просецање приказани су на слици 4.32. Тврдоћа варира између 54 и 56 HRC. Са овим алатом урађено је 100000 операција просецања. Тополошки оптимизован алат лакши је за 47% од потпуно испуњеног.

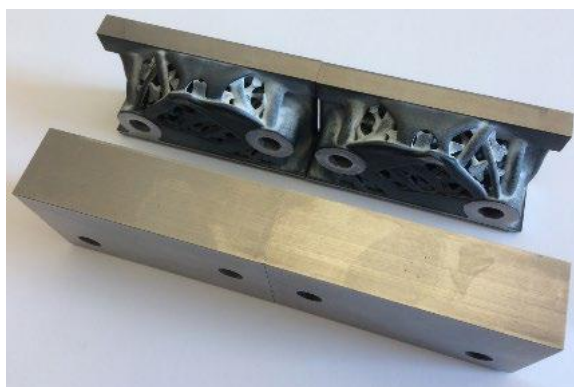
Анализа времена израде и цене израде једног дела корачног алата приказана је у [Asnafi, 2019]. Закључено је да је за производњу конвенционалним методама потребно 8 радних дана и 2370 евра. За алат направљен коришћењем адитивне технологије *PBF* 3,7 дана и 2825 евра. Алат је штампан са решеткастом структуром и дебљином спољашњег зида 1,5 mm. Иако има нешто већу цену израда алата адитивном технологијом је оправдана због скраћења времена израде јер управо та 4,3 дана уштеде могу бити кључна за избегавање кашњења производње. Алат је приказан на слици 4.33.



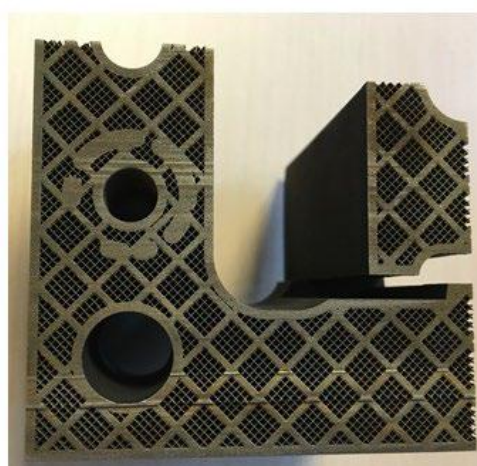
Слика 4.30 Концепције тополошки оптимизованог алата: а) у зависности од ограничења запремине и б) зависност деформације алата за сваку од концепција [Asnafi, 2019]



Слика 4.31 Тополошки оптимизовани алат за двоугаоно савијање [Asnafi, 2019]



Слика 4.32 Тополошки оптимизован алат за просецање [Asnafi, 2019]



Слика 4.33 Део корачног алата направљен применом адитивне технологије [Asnafi, 2019]

5. Испитивање карактеристика полимерних материјала адитивно третираних применом *FDM* технологије

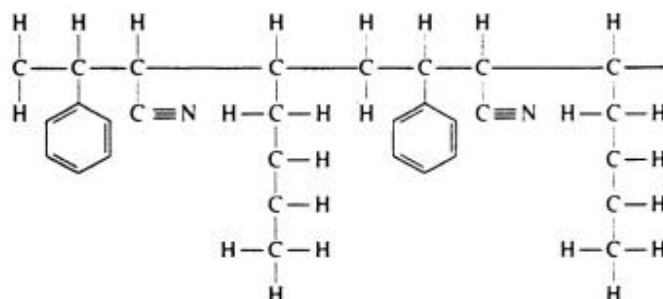
Делови произведени адитивном *FDM* технологијом се све више користе у индустрији. Овом технологијом се праве различити држачи, ослонци а у послење време чак и делови стезног прибора попут меких пакнова. Делови произведени адитивном *FDM* технологијом током рада су изложени различитим оптерећењима па су њихове механичке карактеристике постале веома важне. Бројна истраживања о механичким карактеристика полимерних материјала који се користе у адитивној производњи су спроведена, делом представљена у другом поглављу, на основу којих је потврђен утицај процесних параметара *FDM* технологије на њихове механичке карактеристике. Испитивања полимерних адитивно третираних материјала су дефинисана стандардима и за одређивање механичких карактеристика користе се испитивања затезањем, притискивањем, савијањем и други специјализовани тестови. Анализом литературе која је дата у другом поглављу одређени су параметри који имају утицај на механичке карактеристике полимерних адитивно третираних материјала као што су угао штампања, облик испуне, густина испуне, брзина штампања и положај штампања. Циљ експерименталних истраживања приказаних у овом поглављу је одређивање појединачних и спрегнутих утицаја наведених параметара за постизање оптималних вредности механичких карактеристика материјала, након адитивне производње, како би се изабрали они који дају најбоље карактеристике и функционалности компоненти алата за обраду лима савијањем.

5.1 Избор материјала и АП технологије

При избору адитивне технологије која је коришћена за израду алата и узорака узети су у обзир доступност технологије, цена материјала, механичке карактеристике материјала и додатни захтеви попут комплексности постпроцесирања. Изабрана је технологија депоновања топљеног материјала познатија као *FDM* или *FFF* технологија. *FDM* технологија спада међу најстарије адитивне технологије и веома је заступљена у привреди, науци, образовању [Jakovljević, 2022] али и код хоби корисника. С обзиром да је прегледом литературе закључено да делови произведени *FDM* технологијом могу имати задовољавајуће механичке карактеристике а имајући у виду да је ова технологија међу најчешће примењеним, изабрана је *FDM* технологија са циљем да резултати испитивања буду што шире примењени. Као што је наведено у уводу коришћена су два материјала, *ABS* и Оникс, уз додатно испитивање материјала Оникс ојачаног стакленим влакнима.

ABS (акрилонитрил бутадиен стирен) је термопластични материјал који се користи у индустрији кућних апарата, за израду унутрашњих делова у ауто индустрији и веома је заступљен у поступцима *3D* штампе [Britannica]. Спада у материјале високе издржљивости и могуће је израдити fine детаље. У *FDM* технологији користи се у облику жице. *ABS* спада у најчешће коришћене материјале за адитивну производњу због своје приступачности, цене и механичких карактеристика. *ABS* је аморфни

кополимер и састоји се од три мономера: акрилонитрила, бутадиена и стирена [Omnexus]. Производи се процесом кополимеризације и у зависности од удела наведених мономера зависе његове карактеристике [Smith, 2017]. Хемијска формула ABS-а је $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Коришћењем пигмената ABS се производи у различитим бојама а његова природна боја је непрозирна бела боја коју још називају боја слоноваче. Молекуларна структура ABS-а приказана је на слици 5.1.



Слика 5.1 Молекуларна структура ABS-а [Omnexus]

ABS има важно место у индустрији због својих добрих особина. Чврст је и трајан односно отпоран на утицаје температуре и хемикалија. Међу полимерним материјалима важи за материјал са добром ударном жилавошћу. Ове карактеристике чине га веома погодним за примену у адитивној производњи. Веома је отпоран на појаву абразивног хабања, постојан је и на нижим температурама и делови израђени од ABS-а имају постојаност димензија [Omnexus]. Карактеристике ABS-а приказане су у табели 5.1.

Табела 5.1 Карактеристике материјала ABS [Omnexus]

Температура извијања (Heat deflection temperature)	84°C
Модул савијања	1600 – 2400 MPa
Савојна чврстоћа	77 MPa
Модул еластичности	1800 - 3200 MPa
Затезна чврстоћа	30 - 43 MPa
Издужење при достизању напона на граници течења	1,7 – 6 %
Издужење при кидању	10 – 50 %
Ударна жилавост (на собној температури)	200 - 215 J/m
Ударна жилавост (на сниженој температури)	20 – 160 J/m
Тврдоћа	100, метода Шор Д
Диелектрична константа	2,7 – 3,2

Недостаци материјала ABS су висока температура топљења што доводи до савијања при хлађењу, као и потреба да радни сто буде загрејан и зато је конструкција штампача компликована. Као недостатак често се наводе штетна испарења приликом загревања па је препоручено да се штампачи налазе у просторијама које се проветравају. Постоји неколико препорука како смањити савијање делова, загревањем радног стола и коришћењем веће температуре екструдера за првих неколико слојева. Друга опција за повећање адхезије је прављење ABS суспензије тако што се мали делови ABS материјала (најчешће од отпада) мешају са ацетоном и смеша се наноси на радни сто. Такође на тржишту постоји неколико производа који се користе за повећање адхезије. Недостаци материјала ABS који су уочени при експлоатацији су слаба

отпорност на временске услове (због тога се пре свега користи за израду делова ентеријера), лоша постојаност при дејству пламена, површина се упркос добром квалитету лако гребе и делови од ABS-а лако пуцају од концентрације напона.

Оникс је композитни материјал црне боје који се користи у FDM технологији. Заштићени је производ компаније *Markforged* а по саставу је најлон са додатком кратких угљеничних влакана. Његова чврстоћа је око 40% већа од чврстоће ABS-а и има високу жилавост и хемијску отпорност [*Markforged*]. Повећање механичких карактеристика могуће је постићи додавањем континуалних влакана, угљеничних или стаклених. Пречник угљеничних влакана је 0,38 mm а стаклених 0,34 mm. Карактеристике материјала приказане су у табели 5.2.

Табела 5.2 Карактеристике материјала Оникс и стаклених влакана [*Markforged*]

	Оникс	Стаклена влакна
Температура извијања (<i>Heat deflection temperature</i>)	145°C	
Модул савијања	3000 MPa	22000 MPa
Савојна чврстоћа	71 MPa	200 MPa
Модул еластичности	2400 MPa	21000 MPa
Затезна чврстоћа	40 MPa	590 MPa
Издужење при кидању	25%	3,8%
Ударна жилавост	330 J/m	2600 J/m
Густина	1,2 g/cm ³	1,5 g/cm ³
Модул притискивања		24000 MPa
Притисна чврстоћа		180 MPa

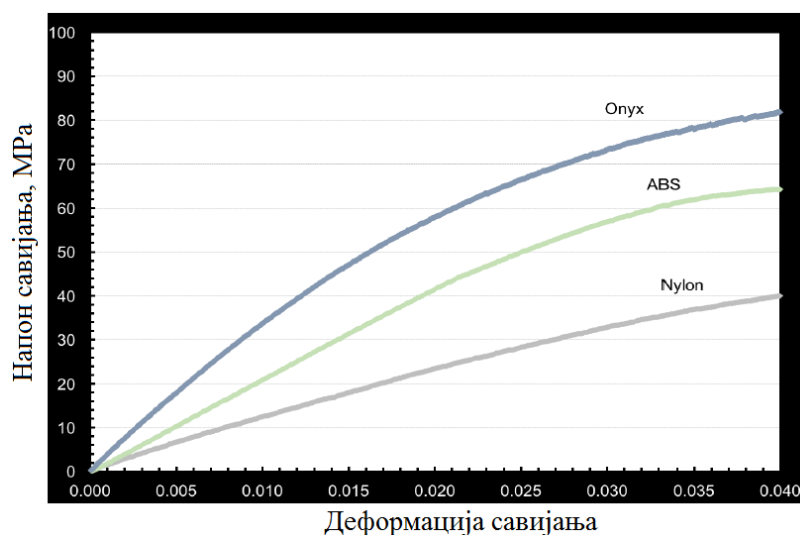
Произвођач материјала Оникс је дао резултате испитивања материјала и они су приказани на сликама 5.2 и 5.3. На слици 5.2 упоредно су приказани резултати теста савијања за Оникс, најлон и ABS. Оникс има боље карактеристике у односу на ABS и најлон. Посебно је интересантно размотрити разлику између Оникса и најлона и закључити колико ојачавање кратким угљеничним влакнима доприноси побољшању механичких карактеристика.

За ојачавање делова од Оникса користе се различите врсте ојачавајућих влакана: угљенична, влакна од кевлара, стаклена влакна и стаклена влакна за повишене температуре. Угљенична влакна имају најповољнији однос механичких карактеристика и масе од свих коришћених влакана [*Markforged*].

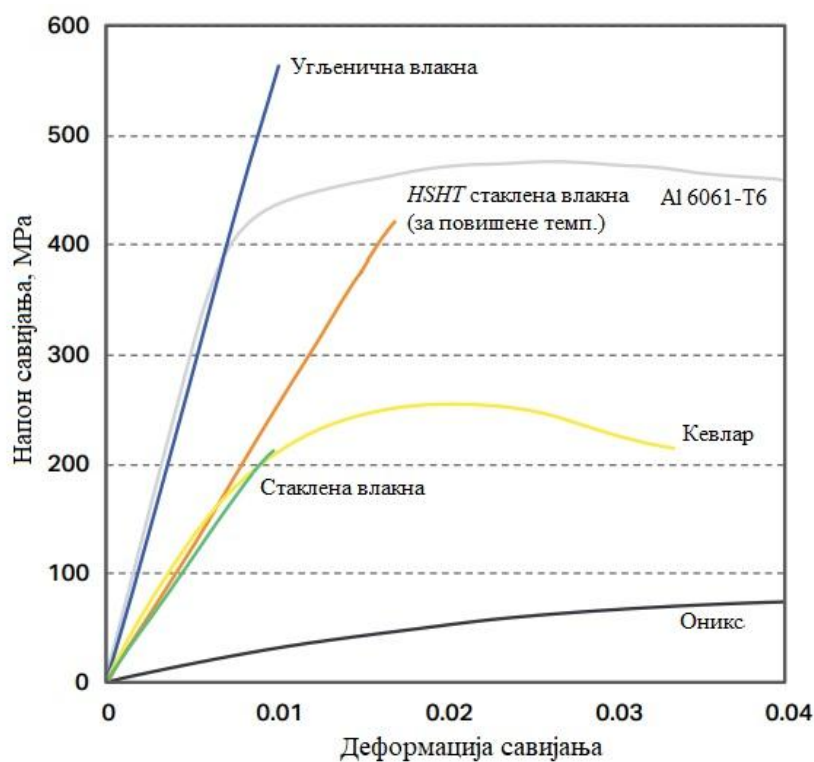
Према наводима произвођача угљенична влакна су шест пута чвршћа и осамнаест пута крућа од Оникса а делови ојачани на овај начин имају задатак да замене делове од алуминијума.

Кевлар је веома издржљив, крут као стаклена влакна и деформабилнији од њих, а намењен је за израду делова који су изложени променљивом оптерећењу. Стаклена влакна су најчешће коришћена и њиховом применом постиже се висока чврстоћа по прихватљивој цени.

Стаклена влакна су 2,5 пута чвршћа и осам пута крућа од Оникса. Упоређење савојне чврстоће за ојачавајуће материјале и основни материјал Оникс приказани су на слици 5.3.



Слика 5.2 Упоредне карактеристике материјала који се користе у FDM технологији [Markforged]



Слика 5.3 Упоредни дијаграми напон-деформација за ојачавајућа влакна [Markforged]

Све групе експеримената приказаних у овом поглављу су означене у зависности од коришћеног материјала: M1 (ABS), M2 (Оникс) и M3 (Оникс са стакленим влакнима).

5.2 Стандарди за испитивање полимерних материјала

Тест затезања је дефинисан стандардом *ASTM D638 (ISO 527)* а тест притискивања стандардом *ASTM D695 (ISO 604)*. Облик и димензије епрувета приказане су на слици 5.4.



Слика 5.4 Облик и димензије узорака за: а) тест затезања Т б) тест притискивања са цилиндричним узорком C1 в) тест притискивања са узорком у облику квадрa C2

Експериментална испитивања су изведена према стандарду *ASTM D638* тип 1 (*ISO 527*) за тест затезања и *ASTM D695* за тест притискивања. Тестом затезања *ASTM D638* испитују се механичке карактеристике круте пластике са дебелинама узорка од 1 до 14 mm. Стандард дозвољава употребу пет различитих узорака који се разликују по димензијама односно утрошеном материјалу. Најчешће се користи епрувета дужине 115 mm, ширине 13 mm и мерне дужине 50 mm (тип 1). Веома важну улогу при тестирању имају стезне чељусти. За испитивање пластике најпогодније су пнеуматске стезне чељусти. Најважније је да притисак стезања не буде превелик и да не изазове сабијање епрувете што нарочито може бити проблем код узорака који имају решеткасту структуру. Са друге стране, сила стезања мора да буде довољно велика да спречи проклизавање узорка између чељусти. Епрувете су израђене према димензијама стандардом предвиђеним за тип 1 као што је приказано на слици 5.4. Овај тип односно ове димензије епрувете су изабране да би дужина била довољна да се оствари поуздано стезање на универзалној машини за испитивање материјала.

Тест притискивања је изведен према стандарду *ASTM D695* који је еквивалентан стандарду *ISO 604*. Овим тестом одређују се карактеристике круте пластике са или без ојачања. Користе се узорци стандардних димензија, $\varnothing 12,7 \times 25,4$ mm или узорак

квадратног пресека 12,7x12,7x25,4 mm. Сврха коришћења квадратних узорака је одређивање утицаја положаја јер би у случају коришћења цилиндричних епрувета било потребно користити ослонце што није препоручљиво при тестирању.

У зависности од врсте теста уведене су додатне ознаке, са *T* је означен тест затезања (*tension*), са *C1* тест притискивања (*compression*) када се користи цилиндрична епрувета и са *C2* када се користи епрувета у облику квадра (*compression*).

5.3 Припрема узорака и експериментална опрема

За израду узорака коришћена су два 3D штампача: *Markforged Onyx Pro* и *Makerbot replicator 2X*. Изглед штампача приказан је на слици 5.5 а карактеристике су дате у табели 5.3.



а)



б)

Слика 5.5 Коришћени 3D штампачи: а) *Makerbot replicator 2X* и б) *Markforged Onyx Pro*

Табела 5.3 Карактеристике коришћених 3D штампача

	<i>Makerbot replicator 2X - MB</i>	<i>Markforged Onyx Pro - MF</i>
Технологија	<i>FDM</i>	<i>FDM</i>
Пречник млазнице	0,4 mm	0,4 mm
Материјали	<i>ABS, PLA</i>	најлон, оникс
Ојачавајући материјал	/	стаклена влакна
Дебљина слоја	0,1 mm – 0,3 mm	0,1 mm – 0,2 mm
Загревање радног стола	до 115°C	не загрева радни сто

Оба штампача користе *FDM* технологију и користе се у Центру за виртуелну производњу, Факултета инжењерских наука. Штампач *Makerbot replicator 2X* спада у штампаче средњег ценовног ранга. Има могућност загревања стола до 115°C. Користи материјале *ABS* и *PLA*. Штампач *Markforged Onyx Pro* припада групи нешто скупљих штампача и користи материјал Оникс и има могућност да користи ојачавајућа стаклена влакна. Слично односу цена два наведена штампача постоји разлика у цени материјала које они користе, при чему је Оникс неколико пута скупљи од *ABS*-а.

Испитивање узорака тестовима затезања и притискивања урађено је у Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале Факултета

инжењерских наука. За испитивање је коришћена универзална машина за испитивање *Zwick/Roell Z100*. Изглед машине за испитивање приказан је на слици 5.6. Карактеристике машине дате су у табели 5.4.



Слика 5.6 Универзална машина за испитивање *Zwick/Roell Z100*

Табела 5.4 Карактеристике машине *Zwick/Roell Z100*

Димензије носећег рама	Висина: 2369 mm Ширина: 960 mm Максимална висина: 2484 до 3294 mm.
Погонски систем, брзина и тачност	Брзина главе (V_{nom}): 0,0005 to 200 mm/min Прецизност подешене брзине: 0,003 % of V_{nom} Прецизност положаја : 0,0206 μ m Тачност позиционирања: < 1,0 μ m
Мерно – управљачка електроника	Опсег мерења: 0,2 до 165% номиналне мерне вредности Брзина снимања података: 500 Hz Резолуција при 100% номиналне вредности мерења: 162 000 тачака (на 500 Hz)
Мерење силе	Номинална сила (V_{nom}): 100 kN Опсег мерења: DIN EN ISO 7500-1 grade 1: 400,00 Н до 100,00 kN DIN EN ISO 7500-1 grade 0.5: 2,00kN до 100,00 kN Резолуција машине: 0,16% до 0,4 % V_{nom} Резолуција силе: 1 N

Сви узорци који су испитивани направљени су на 3D штампачима, *Makerbot replicator 2X* и *Markforged Onyx Pro*. Да би била потврђена поновљивост за сваку варијанту штампана су по три узорка. Узорци од ABS-а су израђени на штампачу *Makerbot replicator 2X* са коришћењем рафта. Узорци од Оникса су израђени на уређају *Markforged Onyx Pro* и при штампању је коришћен додаток брим. За повећање адхезије при штампању уређај *Makerbot replicator 2X* може да користи само рафт а *Markforged Onyx Pro* брим. Рафт представља слој материјала на коме се део штампа. Брим је слој

материјала који се штампа око дела и додатно га причвршћује за подлогу. Приказ узорак на радном столу дат је на слици 5.7.



а)



б)

Слика 5.7 Узорци на радном столу штампача направљени од: а) ABS-а и б) Оникса

Изглед узорак од ABS-а након уклањања рафта приказан је на слици 5.8 а) и б). Иако сваки софтвер за 3D штампање даје потрошњу материјала, пре тестирања сваки од узорак је измерен на прецизној ваги (слика 5.8 в). Мерна дужина је нацртана на сваком узорку тако што две линије представљају границе мерног дела.



а)



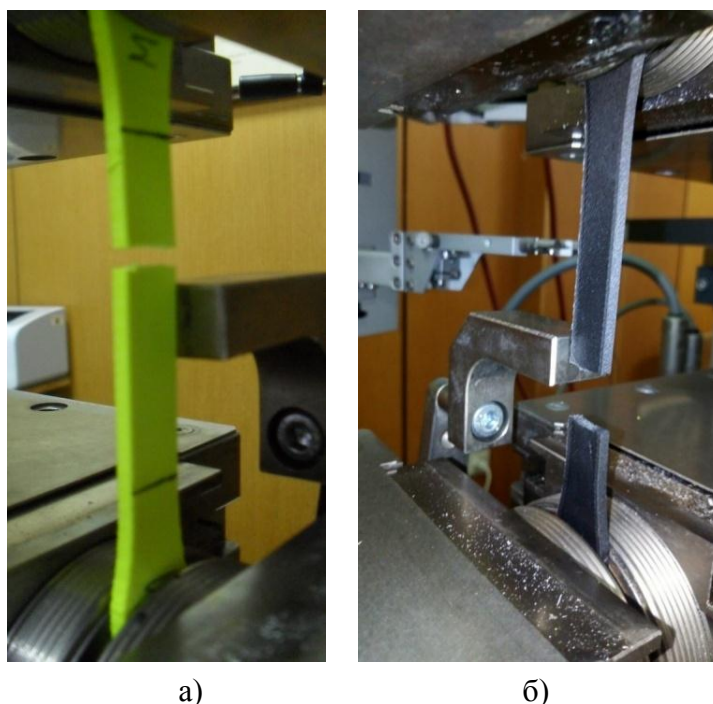
б)



в)

Слика 5.8 Узорци од ABS-а за: а) тест затезања б) тест притискивања и в) током мерења масе узорка пре тестирања

После мерења узорка урађено је испитивање тестовима затезања и притискивања на машини за испитивање материјала. Стезање епрувета је остварено помоћу пнеуматских стезача. Притисак стезања за узорке од ABS-а је био око 4 бара а за узорке од Оникса између 2,5-3 бара. При тесту затезања, у тренутку кидања епрувете машина прекида рад и било је нарочито интересно посматрати растојање између делова узорка јер то растојање заправо је мера еластичности материјала, јер се еластична деформација ослобађа престанком деловања затежуће силе. Узорци после лома приказани су на слици 5.9. Код узорка од ABS-а уочене су значајно мање еластичне деформације него код узорка израђених од Оникса. Током спровођења експеримента у софтверу *testXpert* могуће је пратити и регистровати зависност деформационе силе од издужења. С обзиром да се у већини научних радова дијаграм затезања приказује као технички напон – издужење такав приступ је примењен и у овом раду.



Слика 5.9. Узорци на машини непосредно после теста затезања од материјала: а) ABS и б) Оникс

5.4 Избор утицајних параметара адитивне производње

Експеримент је подељен на три дела, у првом делу су испитане механичке карактеристике материјала ABS, у другом делу материјала Оникс и у трећем делу карактеристике материјала Оникс са ојачањем стакленим влакнима. Делови експеримента су редом означени са M1 (ABS), M2 (Оникс) и M3 (Оникс са ојачањем) а план експеримента детаљно је објашњен у табели 5.5.

Утицај параметара FDM штампе предмет је бројних истраживања. Анализа кључних фактора који имају утицај на квалитет и механичке карактеристике делова направљених овом технологијом приказана је у [Petruse, 2019]. Један од закључака истраживања је да је при коришћењу стандарда ASTM D638 најпогодније користити узорке са димензијама дефинисаним према типу 1 као што је коришћено у овој дисертацији. Аутори су разматрали утицај дебљине слоја, угла штампања, положаја оријентације штампања, густине и облика испуне, брзине штампања, температуре

штампања и протока материјала. При изради узорака утицај на квалитет поред наведених параметара могу имати и квалитет материјала (влажност, одступање пречника жице), стање главе штампача и млазнице (пре свега рад мотора) и проток материјала који зависи од трења које се јавља између материјала и унутрашње површине млазнице. Ови непредвидиви фактори често могу да доведу до одређених одступања па и до грешке током штампања. Уколико је материјал влажан може доћи до појаве мале количине дима услед испарења и то може угрозити квалитет површина и повезивање између слојева. Уопштено гледано било каква неправилност може довести до различитих вредности протока материјала што ће узроковати различито повезивање слојева.

У оквиру експерименталног истраживања у овој дисертацији разматрани су следећи утицајни параметри: угао штампања, оријентација положаја штампања, облик испуне, густина испуне, брзина штампања, дебљина слоја и ојачање. Експерименти су подељени на неколико целина због сагледавања спрегнутих утицаја појединих параметара. На пример, при проучавању утицаја угла штампања узорци су штампани са густином испуне 100% и варирана је дебљина слоја јер израда узорака са одређеним обликом испуне не би имала смисла пошто у том случају угао штампања нема утицај. У другој групи експеримената различити облици испуне су испитани при различитим густинама испуне.

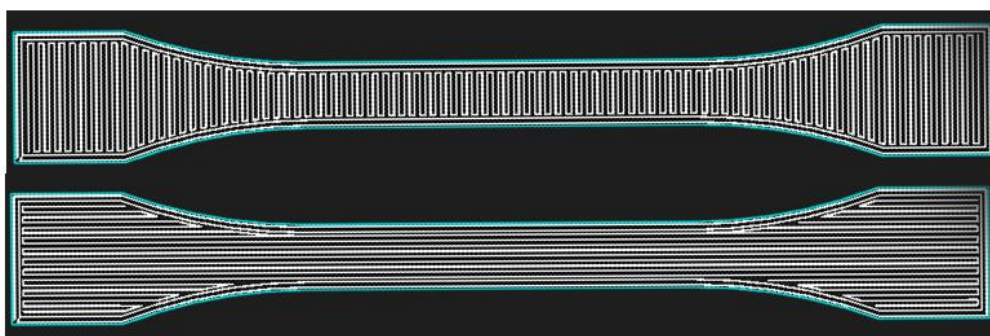
У табели 5.5 приказани су утицајни параметри процеса који утичу на механичке карактеристике делова произведених *FDM* адитивном технологијом. Анализом прелиминарних експерименталних резултата (пробни експерименти) и публикованих радова параметри наведени у табели су издвојени као значајни и обухваћени су планом експеримената. На основу ознака и нивоа вредности варираних параметара адитивне производње приказаних у табели формиране су шифре појединачних експеримената.

Табела 5.5 Утицајни параметри адитивне *FDM* производње

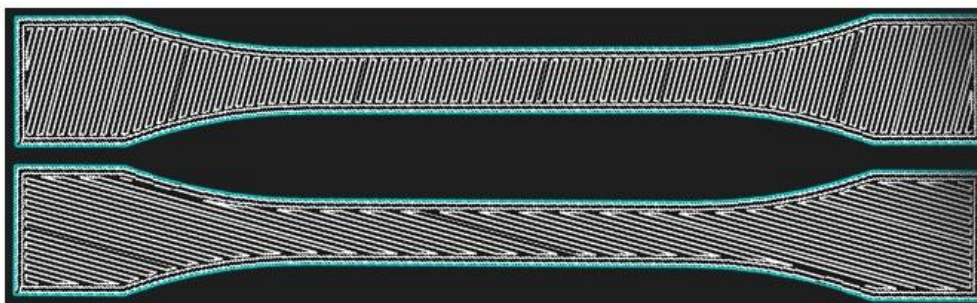
1. Материјал	<i>M1</i> – <i>ABS</i> ; <i>M2</i> – Оникс; <i>M3</i> – Оникс+стаклена влакна;
2. Угао штампања	<i>U1</i> =0°; <i>U2</i> =15°; <i>U3</i> =30°; <i>U4</i> =45°;
3. Оријентација штампања	<i>O1</i> – положен; <i>O2</i> – усправан
4. Облик испуне	<i>I1</i> – троугаони; <i>I2</i> – квадратни; <i>I3</i> – шестоугаони; <i>I4</i> – таласасти; <i>I5</i> – пун
5. Густина испуне	<i>P1</i> - 10%; <i>P2</i> - 40%; <i>P3</i> - 70%; <i>P4</i> - 100%; <i>P5</i> – минимална густина за <i>MF</i> , <i>P6</i> – препоручена густина за <i>MF</i> , <i>P7</i> – максимална густина за <i>MF</i> ;
6. Брзина штампања	<i>B1</i> – 20 mm/s; <i>B2</i> – 55 mm/s; <i>B3</i> – 90 mm/s; <i>B4</i> – <i>MF</i> брзина;
7. Дебљина слоја	<i>S1</i> =0,1 mm; <i>S2</i> =0,2 mm; <i>S3</i> =0,3 mm;
8. Број конц. прстенова	<i>K1</i> =2; <i>K2</i> =4
9. Број ојачаних слојева	<i>L1</i> =2; <i>L2</i> =4; <i>L3</i> =6;
Дебљина горњег и доњег слоја (100% испуна)	0,8 mm

5.4.1 Тумачење утицајних параметара

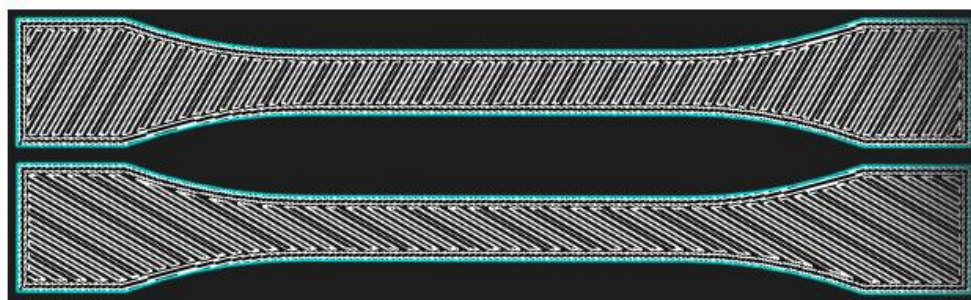
Угао штампања (*Raster angle*) је веома битан параметар и представља угао који правац штампања заклапа са правцем *x* осе радног стола. На слици 5.10 приказани су углови штампања чији утицај је испитиван у овој дисертацији.



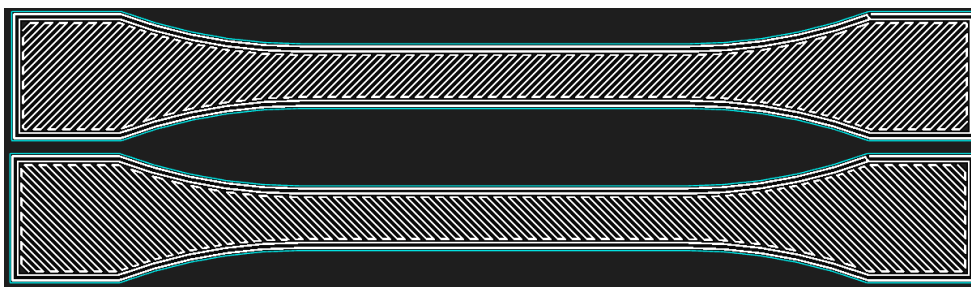
а) 0°/90°



б) 15°/-75°



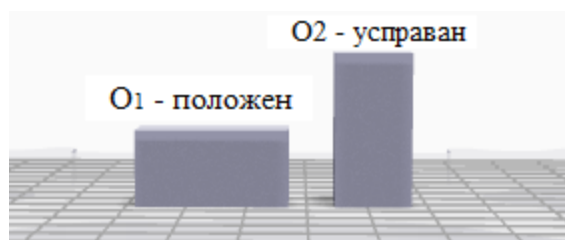
в) 30°/-60°



г) 45°/-45°

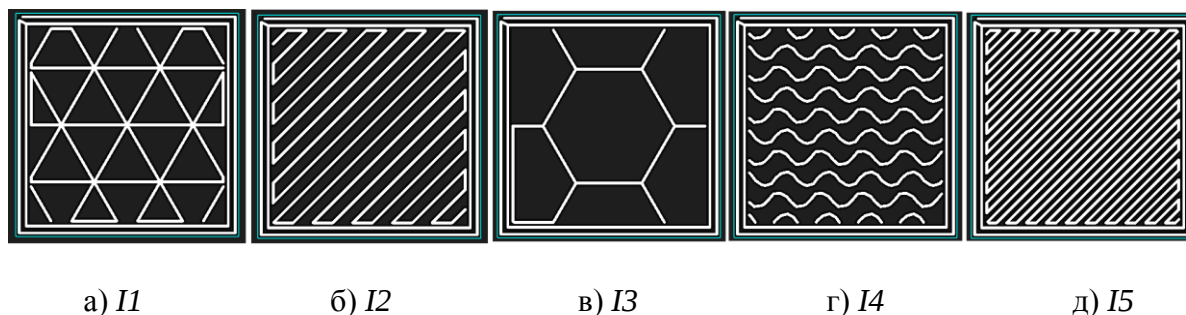
Слика 5.10 Параметар угао штампања: а) U1 б) U2 в) U3 г) U4

Утицај оријентације штампања узорака у односу на сто за штампу је испитан у оквиру групе експеримената М1. Анализирана су два положаја: положен и усправан (слика 5.11). Циљ тестирања утицаја оријентације је установити да ли и колико има утицаја раван штампања на механичке карактеристике адитивно произведеног материјала.



Слика 5.11 Положај узорака при штампању

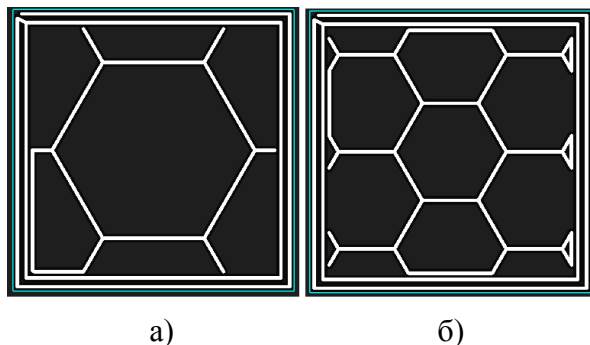
Облик испуне представља облик шаблона испуне која се налази унутар штампаног дела. Облик испуне има значајан утицај на време штампања, потрошњу материјала, масу, чврстоћу, флексибилност итд. Сваки од облика има своје предности и недостатке. Истраживање [Agrawal, 2023] је показало да облик испуне има значајан утицај на затезне механичке карактеристике и да је најповољнији облик испуне концентрични који не подржавају многи софтвери 3D штампача, затим следе троугаони и квадратни облик. Шестоугаона испуна опонаша облик пчелињег саћа и теоретски је време штампања у овом случају најмање. Троугаони и квадратни облик испуне су доступни за израду на већини штампача и показали су да су погодни за остваривање добрих карактеристика адитивно произведених делова. У оквиру овог испитивања користи се пет различитих облика испуне (слика 5.12): троугаони (I1), квадратни (I2), шестоугаони (I3), таласаста (I4) и потпуно испуњен (I5). Поред ових стандардних и најчешће коришћених облика у пракси постоје многи други облици које је могуће дефинисати у софтверима као што су *Simplify*, *Ultimaker Cura* итд, при чему неки од њих имају одређени практични значај док су неки облици креирани да би били занимљиви.



Слика 5.12 Коришћени облици испуне: а) троугаони б) квадратни в) шестоугаони г) таласаста и д) потпуна испуна

Проценат испуне или густина испуне одређује количину материјала који се користи за штампање унутрашњости дела односно утиче на удео запремине узорка који је испуњен материјалом [Tripathy, 2022]. Већа вредност густине испуне значи да ће више материјала бити утрошено и претпоставка [Alvarez, 2016] је да ће чврстоћа дела бити већа. У истраживању [Vicente, 2016] је испитиван утицај облика и густине испуне на механичке карактеристике ABS-а и закључено је да густина испуне има већи утицај на механичке карактеристике него облик испуне. При избору густине испуне треба водити рачуна о намени делова. Делови који служе само за визуелни приказ штампају се са густином испуне 10% или 20%, док се делови који трпе значајнија оптерећења штампају са већом густином испуне [Xometry]. Поређење унутрашњости призматичног дела са шестоугаоном испуном при различитим вредностима густине испуне дато је на слици 5.13. У оквиру експерименталног дела дисертације варирањем различитих

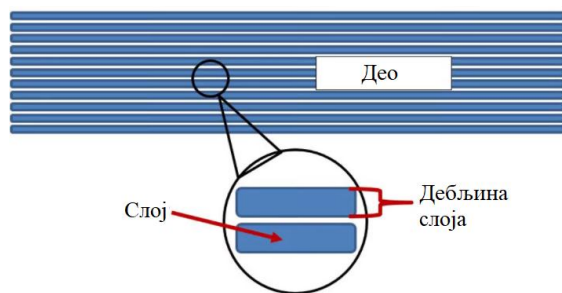
вредности густине испуне анализирано је да ли овај параметар и количина материјала у унутрашњости узорка има утицај на затезну и притисну чврстоћу. С обзиром да су у експерименталном делу испитани потпуно испуњени узорци (100%) и да је минимална препоручена густина испуне 10% одлучено је да се за израду узорака примене густине испуне $P1=10\%$, $P2=40\%$, $P3=70\%$ и $P4=100\%$, заправо да се опсег могућих вредности густине испуне 10 – 100% подели на делове са једнаким прираштајем. Додатно су за *Markforged Onyx Pro – MF* штампач примењене минимална, препоручена и максимална густина ($P5$, $P6$ и $P7$).



Слика 5.13 Шестоугаони облик испуне са густином испуне: а) 20% б) 60%

Брзина штампања је параметар који утиче на време штампања и квалитет површине и дефинише брзину рада корачних мотора и брзину екструдирања (мотори за покретање дуж x и y осе). Превише мала брзина штампања може да изазове дефекте на делу зато што млазница превише времена проводи у контакту са материјалом. Ако је брзина штампања превелика могу настати проблеми при хлађењу материјала, може настати недовољна попуњеност испуне или може доћи до слабе адхезије између слојева. За одређивање идеалне брзине за неки штампач користе се тестови са дефинисаном геометријом на основу којих се дефинише идеална брзина. Према студији [Kamer, 2022] у којој су испитани узорци од материјала *ABS* и *PLA* при брзини штампања од 20-40-60-80-100-120-140 mm/s брзина штампања је имала мали утицај на механичке карактеристике, тврдоћу и порозност код узорака од *ABS*-а. Сличан закључак изведен је у студији [Sukindar, 2017] где је утицај брзине и других параметара испитан на узорцима од *PLA*. У овом раду разматране су четири брзине штампања, у групи експеримената *M1* брзине 20 mm/s ($B1$), 55 mm/s ($B2$) и 90 mm/s ($B3$), док је у групи експеримената *M2* и *M3* коришћена стандардна брзина штампања ($B4$) јер штампач *Markforged Onyx Pro* не омогућава промену брзине штампања.

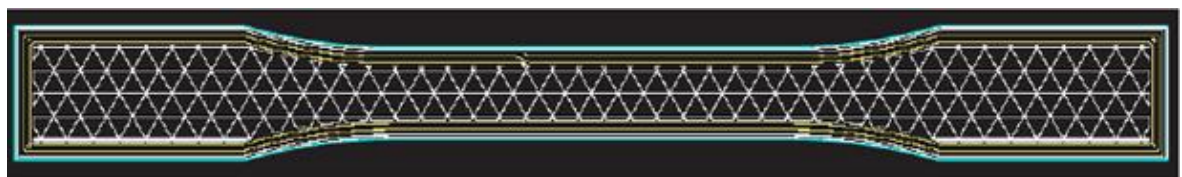
Дебљина слоја је битан параметар и представља тачну висину сваког екструдираниог слоја (слика 5.14). Дебљина слоја се подешава у софтверу машине и за *FDM* технологију креће се у границама између 0,05 mm и 0,4 mm. Повећањем дебљине слоја површинска резолуција дела је слабија док се време штампања смањује. Дебљина слоја је увек мања од пречника млазнице [Sood, 2010] и бира се у зависности од пречника млазнице и коришћеног материјала [Mohamed, 2015]. Истраживање [Bist, 2022] је показало да су највеће вредности затезне чврстоће код узорака од *ABS*-а постигнуте за дебљину слоја од 0,2 mm. У прегледном раду [Bouzaglou, 2023] истакнуто је да је дебљина слоја параметар који утиче на механичке карактеристике али да није могуће успоставити јасан тренд тог утицаја што се објашњава тиме да постоји спрегнут утицај са другим параметрима попут дебљине жице, квалитета израде и стања млазнице итд. У групи експеримената *M1* вариране су три вредности дебљине слоја од 0,1 mm ($S1$), 0,2 mm ($S2$) и 0,3 mm ($S3$).



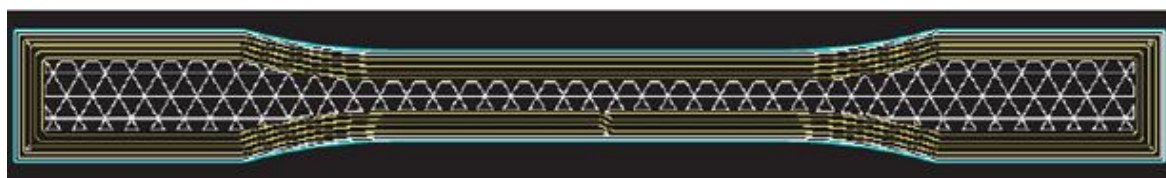
Слика 5.14 Дебљина слоја [all3dp]

Циљ серије експеримената М3 је одређивање утицаја ојачавајућих влакана на механичке карактеристике материјала. Штампач *Markfused Onyx Pro* има могућност ојачања стакленим влакнима док напредније верзије штампача пружају могућност ојачања угљеничним влакнима и кевларом. Параметри су приказани на слици 5.15, у примењеном софтверу (*Eiger*) за *MF* штампач могуће је варирати врсту ојачања континуалним стакленим влакнима као концентричну или линеарну, као и број ојачаних слојева и број ојачавајућих прстенова.

У експерименталном делу дисертације изведено је шест експеримената са концентричним обликом ојачања. Варирани су број концентричних ојачавајућих прстенова ($R=2$ или $R=4$) и број ојачаних слојева ($L=2$, $L=4$ и $L=6$), као што је приказано на слици 5.15.



а)



б)



в)



г)

Слика 5.15 Ојачање стакленим влакнима: а) 2 концентрична прстена ($R2Lx$) б) 4 концентрична прстена ($R4Lx$) в) 3D приказ ојачаних слојева ($R2L2$) г) 3D приказ ојачаних слојева ($R4L6$)

Количина ојачавајућег материјала зависи од броја ојачавајућих прстенова и броја ојачаних нивоа. Запремински удео влакана је фактор који значајно утиче на механичке карактеристике адитивно произведених делова [Hetrick, 2020]. У наведеном истраживању добијени су занимљиви резултати где су узорци од Оникса имали затезну чврстоћу око 30 МПа а са коришћењем угљеничних континуалних влакана вредност се повећавала па је за запремински удео ојачавајућих влакана од 56% добијена вредност затезне чврстоће од чак 450 МПа. Вредност затезне чврстоће од чак 560 МПа за Оникс ојачан угљеничним влакнима постигнута је у експериментима приказаним у раду [Ghebretinsae, 2019]. С обзиром да постоје два начина ојачавања узорака, концентрично и линеарно, потребно је одредити који од наведених модела ојачања пружа боље искоришћење ојачавајућих влакана. Тај проблем је била једна од тема истраживања у раду [Yu, 2019]. Анализом добијене чврстоће узорака закључено је да концентрично ојачање даје боље резултате.

5.5 План експерименталних истраживања

5.5.1 План експеримената за испитивање узорака од ABS-а (M1)

У првој групи експеримента узорци од ABS-а су испитани тестовима затезања и притискивања. Први део експеримента подељен је на пет подгрупа експеримената, уз циљано варирање утицајних параметара процеса. Сви узорци су израђени на штампачу *Makerbot replicator 2X*.

I Одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја – испитивање затезањем

Циљ ових експерименталних истраживања је одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја на механичке карактеристике материјала у оквиру *FDM* технологије. Узорци су штампани са густином испуне 100%. Вредности параметара и план експеримената дати су у табели 5.6. Експеримент је организован по моделу Тагучијеве матрице *L9* са два утицајна фактора, са по три нивоа вредности. Одзив параметара је анализиран по моделу веће-боље зато што је пожељно да вредности механичких карактеристика имају већу вредност. Вредност брзине штампања је константна за све експерименте (90 mm/s).

Табела 5.6 План *M1* експеримената - одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја – испитивање затезањем

Број експ.	Шифра експеримента	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>
M1-1	<i>MBM1TU1O1I5P4B3S1</i>	<i>U1</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S1</i>
M1-2	<i>MBM1TU1O1I5P4B3S2</i>	<i>U1</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S2</i>
M1-3	<i>MBM1TU1O1I5P4B3S3</i>	<i>U1</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S3</i>
M1-4	<i>MBM1TU3O1I5P4B3S1</i>	<i>U3</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S1</i>
M1-5	<i>MBM1TU3O1I5P4B3S2</i>	<i>U3</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S2</i>
M1-6	<i>MBM1TU3O1I5P4B3S3</i>	<i>U3</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S3</i>
M1-7	<i>MBM1TU4O1I5P4B3S1</i>	<i>U4</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S1</i>
M1-8	<i>MBM1TU4O1I5P4B3S2</i>	<i>U4</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S2</i>
M1-9	<i>MBM1TU4O1I5P4B3S3</i>	<i>U4</i>	<i>O1</i>	<i>I5</i>	<i>P4</i>	<i>B3</i>	<i>S3</i>

II Одређивање утицаја брзине штампања – испитивање затезањем

Утицај брзине штампања на механичке карактеристике материјала узорка испитан је у оквиру ове подгрупе експеримената. Епрувете су адитивно произведене са углом штампања $45^{\circ}/-45^{\circ}$, дебљином слоја 0,2 mm, а при различитим вредностима брзине штампања: 20 mm/s, 55 mm/s и 90 mm/s. Шифре и план експеримената дати су у табели 5.7. Сивом бојом су означене колоне које показују вредност параметра која је варирана.

Табела 5.7 План М1 експеримената - одређивање утицаја брзине штампања – испитивање затезањем

Број експ.	Шифра експеримента	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>
M1-10	MBM1TU4O1I5P4B1S2	U4	O1	I5	P4	B1	S2
M1-11	MBM1TU4O1I5P4B2S2	U4	O1	I5	P4	B2	S2
M1-12	MBM1TU4O1I5P4B3S2	U4	O1	I5	P4	B3	S2

III Одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање затезањем

Циљ овог дела експеримента је одређивање утицаја облика (патерна, шаблона) и густине испуне. Вариране су две вредности за облик и три за густину испуне па је шест експеримената изведено (табела 5.8). Константне су вредности угла штампања (*U4*), положаја (*O1*), брзине (*B3*) и дебљине слоја (*S2*).

Испитан је утицај два облика испуне, квадратног и шестоугаоног, и три вредности густине испуне 10%, 40% и 70%.

Табела 5.8 План М1 експеримената - одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање затезањем

Број експ.	Шифра експеримента	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>
M1-13	MBM1TO1I2P1B3S2	U4	O1	I2	P1	B3	S2
M1-14	MBM1TO1I2P2B3S2	U4	O1	I2	P2	B3	S2
M1-15	MBM1TO1I2P3B3S2	U4	O1	I2	P3	B3	S2
M1-16	MBM1TO1I3P1B3S2	U4	O1	I3	P1	B3	S2
M1-17	MBM1TO1I3P2B3S2	U4	O1	I3	P2	B3	S2
M1-18	MBM1TO1I3P3B3S2	U4	O1	I3	P3	B3	S2

IV Одређивање утицаја положаја, дебљине слоја и брзине штампања – испитивање притискивањем

У четвртм делу експеримента М1 је испитан утицај положаја штампања, дебљине слоја и брзине штампања на притисне карактеристике штампаних делова. Константне су вредности параметара угла штампања (*U4*), облика узорка (*C2*), облика (*I5*) и густине испуне (*P4*). Као што је наведено испитивање притискивањем се ради по стандарду *ASTM D695* према којем узорци могу бити цилиндричног облика $\varnothing 12,7 \times 25,4$ mm или у облику квадрa 12,7 mm x 12,7 mm x 25,4 mm. План експеримента дат је у табели 5.9. Разматрана су два положаја штампања (положен и усправан), две дебљине слоја (0,1 mm, 0,2 mm) и две вредности брзине штампања (20 mm/s, 90 mm/s).

Табела 5.9 План М1 експеримената - одређивање утицаја положаја, дебљине слоја и брзине штампања – испитивање притискивањем

Број експ.	Шифра експеримента	U	O	C	I	P	B	S
M1-19	MBM1C2U4O1I5P4B1S1	U4	O1	C2	I5	P4	B1	S1
M1-20	MBM1C2U4O1I5P4B3S1	U4	O1	C2	I5	P4	B3	S1
M1-21	MBM1C2U4O1I5P4B1S2	U4	O1	C2	I5	P4	B1	S2
M1-22	MBM1C2U4O1I5P4B3S2	U4	O1	C2	I5	P4	B3	S2
M1-23	MBM1C2U4O2I5P4B1S1	U4	O2	C2	I5	P4	B1	S1
M1-24	MBM1C2U4O2I5P4B3S1	U4	O2	C2	I5	P4	B3	S1
M1-25	MBM1C2U4O2I5P4B1S2	U4	O2	C2	I5	P4	B1	S2
M1-26	MBM1C2U4O2I5P4B3S2	U4	O2	C2	I5	P4	B3	S2

V Одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање притискивањем

У оквиру петог дела експеримента предмет истраживања је утицај облика и густине испуне на притисне карактеристике штампаних делова. Константне су вредности параметара облика узорка (C1), положаја (O2), брзине штампања (B3) и дебљине слоја (S2). Разматран је утицај два облика испуне, квадратног и шестоугаоног, и три вредности густине испуне (10%, 40%, 70%) као што је дато у табели 5.10.

Табела 5.10 План М1 експеримената - одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање притискивањем

Број експ.	Шифра експеримента	C	U	O	I	P	B	S
M1-27	MBM1C1O2I1P1B3S2	C1	/	O2	I1	P1	B3	S2
M1-28	MBM1C1O2I1P2B3S2	C1	/	O2	I1	P2	B3	S2
M1-29	MBM1C1O2I1P3B3S2	C1	/	O2	I1	P3	B3	S2
M1-30	MBM1C1O2I2P1B3S2	C1	/	O2	I2	P1	B3	S2
M1-31	MBM1C1O2I2P2B3S2	C1	/	O2	I2	P2	B3	S2
M1-32	MBM1C1O2I2P3B3S2	C1	/	O2	I2	P3	B3	S2

5.5.2 План експеримената за испитивање узорака од Оникса (M2)

У другој групи експеримената (M2) испитивани су узорци израђени од материјала Оникс без коришћења ојачавајућих стаклених влакана.

I Одређивање утицаја угла штампања – испитивање затезањем

При планирању експеримената са материјалом Оникс поштоване су препоруке произвођача да брзина штампања буде према препоруци произвођача. У оквиру прве групе експеримената са овим материјалом узорци су прављени само од материјала Оникс без употребе влакана за ојачање. У овом делу експеримента урађено је испитивање утицаја угла штампања на механичке карактеристике. Разматране су четири вредности угла штампања: 0°/90°, 15°/-75°, 30°/-60° и 45°/-45°. Узорци су штампани са густином испуне 100% на штампачу *Markforged Onyx Pro*. Константну вредност имају процесни параметри: положај штампања (O1), облик (I5) и густина

испуне ($P4$), брзина штампања ($B4$) и дебљина слоја ($S1$). Детаљан план експеримената дат је у табели 5.11.

Табела 5.11 План $M2$ експеримената – одређивање утицаја угла штампања

Број експ.	Шифра експеримента	U	O	I	P	B	S
M2-1	MFM2TU1O1I5P4B4S1	U1	O1	I5	P4	B4	S1
M2-2	MFM2TU2O1I5P4B4S1	U2	O1	I5	P4	B4	S1
M2-3	MFM2TU3O1I5P4B4S1	U3	O1	I5	P4	B4	S1
M2-4	MFM2TU4O1I5P4B4S1	U4	O1	I5	P4	B4	S1

II Одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање затезањем

За одређивање утицаја облика и густине испуне реализовано је осам експеримената уз варирање ова два параметра, док је девети урађен са пуним узорком (100%) ради упоређења механичких карактеристика. Разматрана су четири најчешће коришћена облика испуне које овај уређај подржава: троугаони, квадратни, шестоугаони и таласасти облик испуне. За сваки од наведених облика испуне софтвер уређаја омогућава опсег густине испуне па су коришћене две вредности: $P5$ који представља минималну густину испуне и $P6$ који представља препоручену густину испуне. Минимална вредност густине испуне $P5$ износи 28% за троугаони, 20% за квадратни, 18% за шестоугаони и 28% за таласасти облик испуне. Препоручена вредност густине испуне $P6$ износи 37% за троугаони, 50% за квадратни, 27% за шестоугаони и 40% за таласасти облик испуне. План ове подгрупе експеримената је приказан у табели 5.12.

Табела 5.12 План $M2$ експеримената – одређивање утицаја облика и густине испуне – тест затезања

Број експ.	Шифра експеримента	U	O	I	P	B	S
M2-5	MFM2TO1I1P5B4S1	U4	O1	I1	P5	B4	S1
M2-6	MFM2TO1I1P6B4S1	U4	O1	I1	P6	B4	S1
M2-7	MFM2TO1I2P5B4S1	U4	O1	I2	P5	B4	S1
M2-8	MFM2TO1I2P6B4S1	U4	O1	I2	P6	B4	S1
M2-9	MFM2TO1I3P5B4S1	U4	O1	I3	P5	B4	S1
M2-10	MFM2TO1I3P6B4S1	U4	O1	I3	P6	B4	S1
M2-11	MFM2TO1I4P5B4S1	U4	O1	I4	P5	B4	S1
M2-12	MFM2TO1I4P6B4S1	U4	O1	I4	P6	B4	S1
M2-13	MFM2TU4O1I5P4B4S1	U4	O1	I5	P4	B4	S1

III Одређивање утицаја облика и густине испуне – испитивање притискивањем

У оквиру четвртог дела експеримената $M2$ узорци израђени од Оникса су испитани тестом притискивања. Прво је испитан пун узорак а затим су према Тагучијевом експерименту (матрица $L9$) вариране по три вредности за облик (троугаони, шестоугаони и таласасти) и густину испуне ($P5$; $P6$; $P7$) као што је дато у табели 5.13. Максимална вредност густине испуне $P7$ има вредност 55% за троугаони, 62% за шестоугаони и 52% за таласасти облик испуне. Константне су вредности за

облик узорка (*C1*), положај штампања (*O2*), брзину штампања (*B4*) и дебљину слоја (*S1*). Као што је већ наведено, штампач *Markforged Onyx Pro* има могућност израде таласасте испуне.

Табела 5.13 План М2 експеримената – одређивање утицаја облика и густине испуне на притисне карактеристике – тест притискивања

Број експ.	Шифра експеримента	<i>C</i>	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>
M2-14	MFM2C1O1I1P5B4S1	C1	/	O2	I1	P5	B4	S1
M2-15	MFM2C1O1I1P6B4S1	C1	/	O2	I1	P6	B4	S1
M2-16	MFM2C1O1I1P7B4S1	C1	/	O2	I1	P7	B4	S1
M2-17	MFM2C1O1I3P5B4S1	C1	/	O2	I3	P5	B4	S1
M2-18	MFM2C1O1I3P6B4S1	C1	/	O2	I3	P6	B4	S1
M2-19	MFM2C1O1I3P7B4S1	C1	/	O2	I3	P7	B4	S1
M2-20	MFM2C1O1I4P5B4S1	C1	/	O2	I4	P5	B4	S1
M2-21	MFM2C1O1I4P6B4S1	C1	/	O2	I4	P6	B4	S1
M2-22	MFM2C1O1I4P7B4S1	C1	/	O2	I4	P7	B4	S1
M1-23	MFM2C1O1I5P4B4S1	C1	/	O2	I5	P4	B4	S1

5.5.3 План експеримената за испитивање узорака од Оникса ојачаних стакленим влакнима (М3)

У трећој групи експеримената (М3) испитивани су узорци израђени од материјала Оникс са додатком стаклених влакана. У овим експериментима варирани су број ојачавајућих прстенова и број ојачаних слојева за врсту концентричног ојачања. Анализом у софтверу штампача *Eiger* закључено је да је максималан број прстенова ојачања четири док сви слојеви могу бити ојачани. Број концентричних прстенова *K* има вредност два (*K1*) и четири (*K2*). Број ојачаваних слојева *L* има вредност два (*L1*), четири (*L2*) и шест (*L3*). Облик испуне је троугаони са густином испуне коју је произвођач препоручио (37%). Осим њих, константне вредности имају параметри положај штампања (*O1*), брзина штампања (*B4*) и дебљина слоја (*S1*). План је дат у табели 5.14, биће извршено испитивање шест типова узорака.

Табела 5.14 План М3 експеримената – одређивање утицаја концентричним ојачањем стакленим влакнима – тест затезања

Број експ.	Шифра експеримента	<i>T</i>	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>K</i>	<i>L</i>
M3-1	MFM3TO1I1P6B4S1K1L1	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K1	L1
M3-2	MFM3TO1I1P6B4S1K1L2	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K1	L2
M3-3	MFM3TO1I1P6B4S1K1L3	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K1	L3
M3-4	MFM3TO1I1P6B4S1K2L1	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K2	L1
M3-5	MFM3TO1I1P6B4S1K2L2	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K2	L2
M3-6	MFM3TO1I1P6B4S1K2L3	T	/	O1	I1	P6	B4	S1	K2	L3

5.6 Резултати експеримената

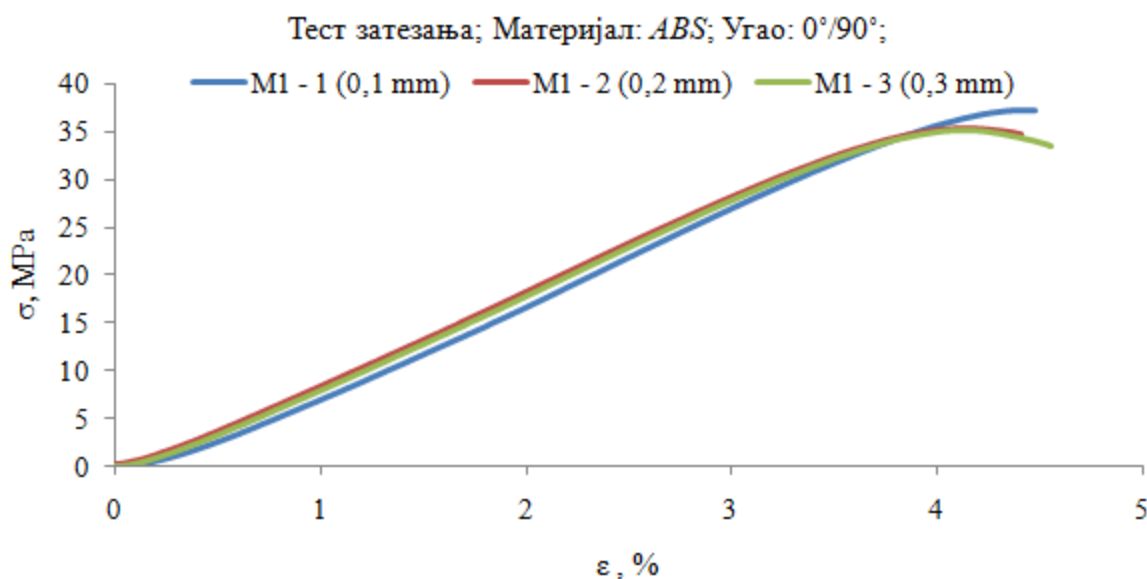
У овом одељку приказани су резултати сва три експеримента: M1, M2 и M3. Приказани су дијаграми технички напон – издужење и сви резултати су приказани табеларно. Технички напон је једнак количнику силе и почетне вредности површине попречног пресека. Издужење је изражено у процентима и једнако је количнику тренутне дужине мерног дела епрувете и почетне вредности. Приказани су резултати за напон на граници течења, затезну чврстоћу и настало издужење односно деформацију при кидању. С обзиром да је уочено да су узорци од ABS-а веома крти а да се узорци од Оникса разарају поступно са великом еластичном деформацијом, настало издужење је наведено и статистички приказано али није посебно анализирано. У табелама су наведене вредности деформације при кидању која је означена са ϵ и изражена у процентима. Пошто је сваки експеримент поновљен три пута за приказивање су одабрани дијаграми оног понављања чије вредности су најближе средњим вредностима. Резултати испитивања притискивањем приказани су у облику дијаграма напон – деформација. Приказани напон је технички, једнак је количнику силе сабијања и почетне вредности попречног пресека. Деформација односно скраћење узорка је изражена у процентима и једнака је количнику скраћења и почетне висине узорка.

5.6.1 Резултати M1 експеримената - испитивање узорака од ABS-а

I Одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја (M1) – тест затезања

У оквиру овог подељка експериментално је одређен утицај угла штампања и дебљине слоја. Укупно је урађено девет експеримената са по три понављања. Разматрана су три угла штампања $U1$ ($0^\circ/90^\circ$), $U3$ ($30^\circ/60^\circ$) и $U4$ ($45^\circ/45^\circ$).

На слици 5.16 приказани су дијаграми затезања за узорке израђене са оријентацијом $U1$ ($0^\circ/90^\circ$) са три различите дебљине слоја. Резултати су приказани у табели 5.15.



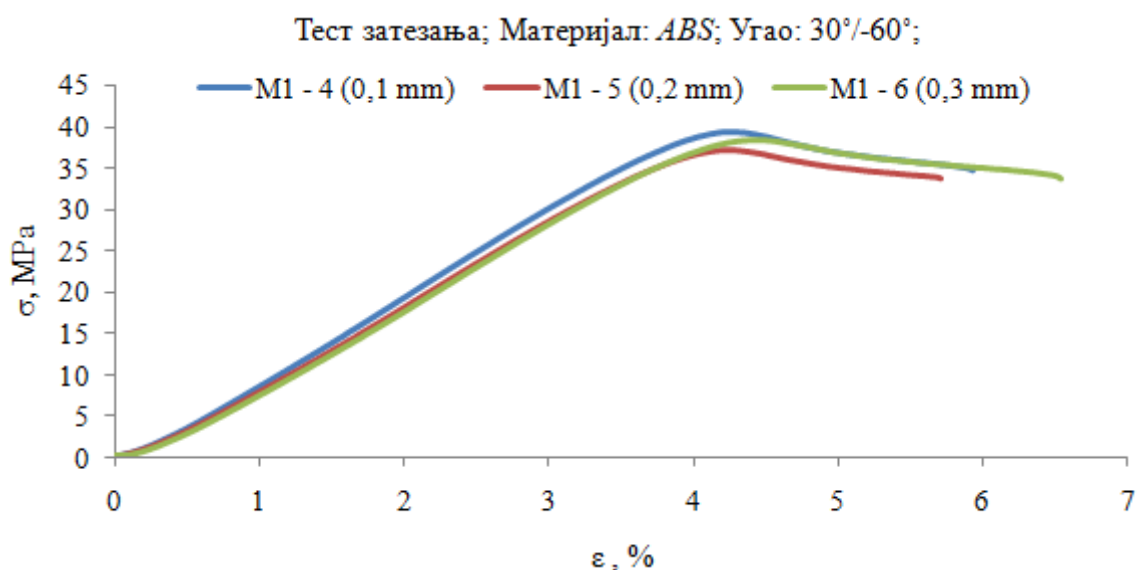
Слика 5.16 Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом $U1$ ($0^\circ/90^\circ$) за дебљину слоја 0,1 mm (M1-1), 0,2 mm (M1-2) и 0,3 mm (M1-3)

Табела 5.15 Резултати M1 експеримената за угао штампања U1

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ε , %	Маса, г
M1 - 1	MBM1TU1O1I5P4B3S1/1	37,15	37,15	4,47	8,99
	MBM1TU1O1I5P4B3S1/2	37,43	37,48	4,28	9,12
	MBM1TU1O1I5P4B3S1/3	36,93	36,94	4,35	9,17
	Средња вредност	37,17	37,19	4,36	9,09
M1 - 2	MBM1TU1O1I5P4B3S2/1	34,35	36,27	4,51	8,82
	MBM1TU1O1I5P4B3S2/2	35,24	35,41	4,41	8,57
	MBM1TU1O1I5P4B3S2/3	35,01	35,26	4,84	8,54
	Средња вредност	34,86	35,64	4,58	8,64
M1 - 3	MBM1TU1O1I5P4B3S3/1	34,78	35,09	4,52	8,38
	MBM1TU1O1I5P4B3S3/2	35,16	35,28	4,41	8,72
	MBM1TU1O1I5P4B3S3/3	35,04	35,10	4,54	8,68
	Средња вредност	34,99	35,15	4,49	8,59

На основу резултата приказаних у табели 5.15 намеће се закључак да за угао штампања $0^\circ/90^\circ$ смањење дебљине слоја штампања доводи до повећања затезне чврстоће. Разлика вредности затезне чврстоће за најмању (0,1 mm) и највећу дебљину слоја штампања (0,3 mm) је свега 2 МПа док је време штампања око три пута дуже. На основу ових података је закључено да није могуће постићи велико повећање вредности механичких карактеристика смањењем дебљине слоја. Дебљина слоја штампања има мали утицај на издужење узорака, средња вредност издужења је најмања за најмању вредност дебљине слоја док је за дебљине S2 и S3 нешто већа. Разлика између најмање и највеће средње вредности издужења је 0,22%. Детаљна анализа је дата у одељку анализе резултата.

Дијаграми затезања за угао штампања U3 ($30^\circ/-60^\circ$) дати су на слици 5.17. Вредности механичких карактеристика приказане су у табели 5.16.



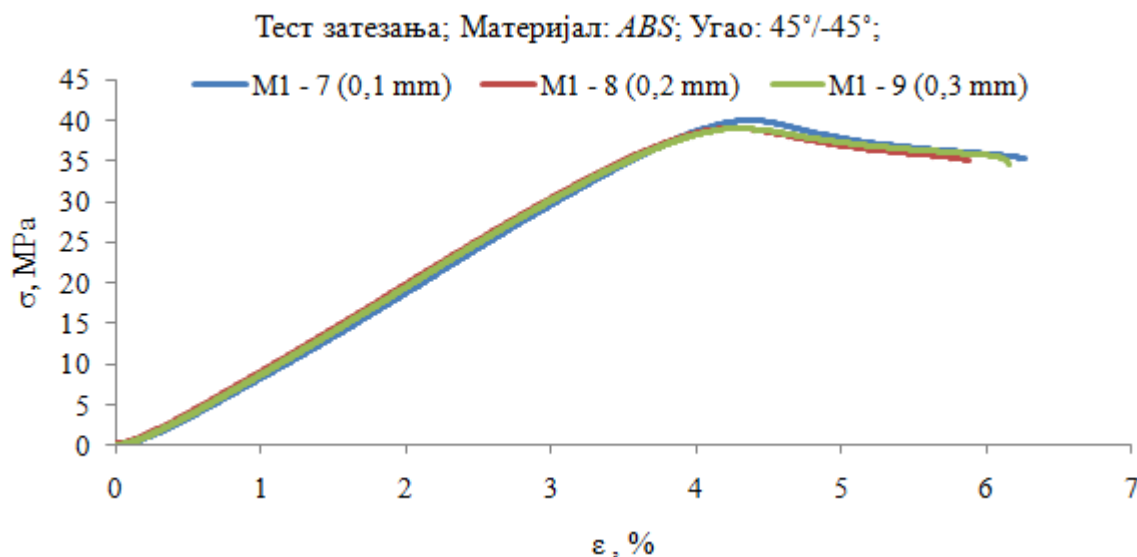
Слика 5.17 Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом U3($30^\circ/-60^\circ$) за дебљину слоја 0,1 mm (M1 - 4), 0,2 mm (M1 - 5) и 0,3 mm (M1 - 6)

Табела 5.16 Резултати M1 експеримената за угао штампања U3

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_m , МПа	ε , %	Маса, г
M1 – 4	MBM1TU3O1I5P4B3S1/1	38,43	39,21	6,15	9,06
	MBM1TU3O1I5P4B3S1/2	38,81	39,56	5,97	9,02
	MBM1TU3O1I5P4B3S1/3	39,10	39,27	5,93	9,04
	Средња вредност	38,78	39,35	6,02	9,04
M1 – 5	MBM1TU3O1I5P4B3S2/1	37,02	37,12	5,71	9,02
	MBM1TU3O1I5P4B3S2/2	37,11	37,55	5,82	9
	MBM1TU3O1I5P4B3S2/3	33,26	35,67	4,24	9,09
	Средња вредност	35,79	36,78	5,26	9,03
M1 – 6	MBM1TU3O1I5P4B3S3/1	38,16	38,28	6,85	9,24
	MBM1TU3O1I5P4B3S3/2	38,79	38,99	6,67	9,23
	MBM1TU3O1I5P4B3S3/3	38,29	38,39	6,53	9,23
	Средња вредност	38,41	38,55	6,68	9,23

Највећа вредност затезне чврстоће за оријентацију штампања U3 постигнута је за дебљину слоја 0,1 mm око 39,3 МПа, затим за дебљину 0,3 mm око 38,5 МПа а најмања вредност за дебљину слоја 0,2 mm око 36,8 МПа. Највеће издужење је измерено код узорака штампаних са дебљином слоја S3 а најмање са дебљином S2.

На слици 5.18 приказани су дијаграми затезања за угао штампања U4 (45°/-45°) и за три вредности дебљине слоја (0,1 mm; 0,2 mm; 0,3 mm). Са дијаграма затезања јасно се види да је деформација веома мала и да је материјал веома крт.



Слика 5.18 Дијаграми затезања за узорке са оријентацијом U4(45°/-45°) за дебљину слоја 0,1 mm (M1 - 7), 0,2 mm (M1 - 8) и 0,3 mm (M1 - 9)

Резултати експеримената приказани су у табели 5.17. Као што је наведено, материјал је веома крт, па је разлика између напона на граници течења и затезне чврстоће веома мала. Ако се анализира вредност затезне чврстоће закључак је да су

вредности сличне за све три вредности дебљине слоја. Највећа вредност је добијена за дебљину слоја 0,1 mm, па за дебљину слоја 0,2 mm и најмања за 0,3 mm. Разлика између највеће и најмање вредности је око 3,5% па се изводи закључак да дебљина слоја код ове оријентације нема превише велики утицај. Исти закључак важи за напон на граници течења и издужење.

Табела 5.17 Резултати M1 експеримената за угао штампања U4

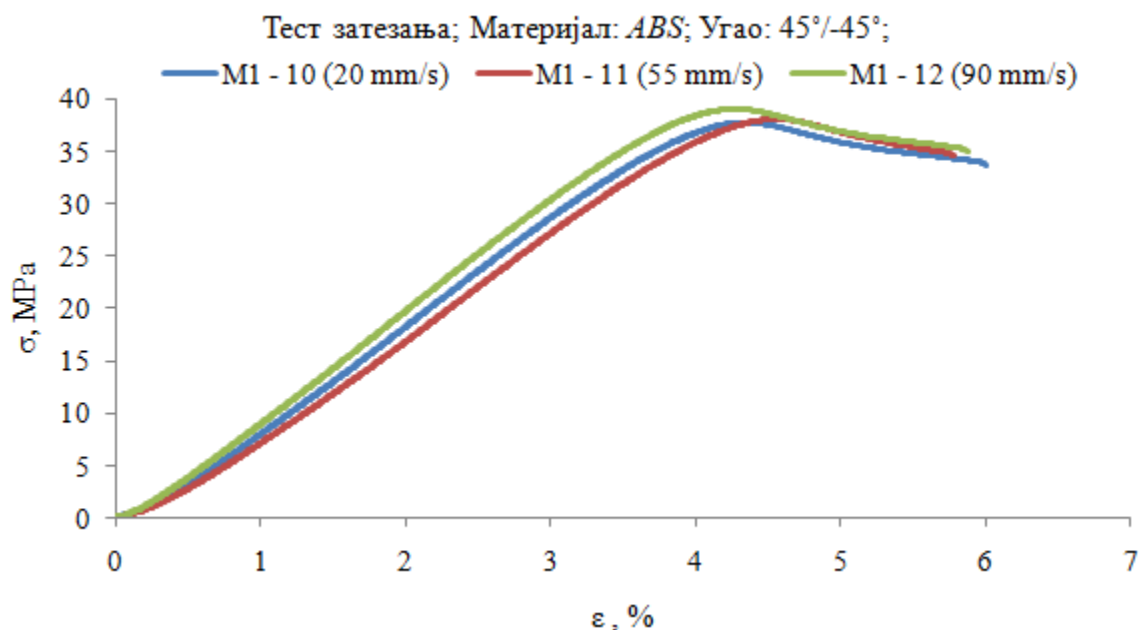
Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ε , %	Маса, г
M1 - 7	MBM1TU4O1I5P4B3S1/1	39,98	39,98	6,27	9,05
	MBM1TU4O1I5P4B3S1/2	40,77	40,79	7,06	9,03
	MBM1TU4O1I5P4B3S1/3	40,05	40,38	7,28	9,03
	Средња вредност	40,26	40,38	6,87	9,04
M1 - 8	MBM1TU4O1I5P4B3S2/1	37,90	39,20	8,44	9,00
	MBM1TU4O1I5P4B3S2/2	38,20	38,74	6,61	8,99
	MBM1TU4O1I5P4B3S2/3	38,64	39,00	5,87	8,99
	Средња вредност	38,24	38,98	6,97	9,00
M1 - 9	MBM1TU4O1I5P4B3S3/1	38,20	38,64	7,82	9,23
	MBM1TU4O1I5P4B3S3/2	38,28	39,15	5,65	9,23
	MBM1TU4O1I5P4B3S3/3	38,59	38,96	6,15	9,19
	Средња вредност	38,35	38,92	6,54	9,22

II Одређивање утицаја брзине штампања (M1) – тест затезања

Утицај брзине штампања на механичке карактеристике узорака одређен је тестом затезања. При изради узорака вариран је само параметар брзина штампања, са три вредности: 20 mm/s, 55 mm/s и 90 mm/s. Брзина B3 (90 mm/s) је брзина штампања коју произвођач препоручује, а друге две брзине B1 (20 mm/s) и B2 (55 mm/s) су изабране тако да се утврди да ли се применом мањих брзина, што подразумева мање вибрације, мењају механичке карактеристике. Веће вредности брзине од препоручене нису биле укључене у истраживање јер при већим брзинама долази до појаве вибрација и одлепљивања штампаног дела са радног стола.

На основу прегледа литературе претпоставка је да са смањењем брзине долази до повећања вредности механичких карактеристика. Анализа резултата експеримената обухвата зависност времена штампања и механичких карактеристика узорака од брзине штампања. Дијаграми затезања приказани су на слици 5.19.

Вредности механичких карактеристика и издужења приказане су у табели 5.18. Резултати експеримената показали су да брзина штампања делова од ABS-а нема велики утицај на механичке карактеристике штампаних делова. Вредности напона на граници течења и затезне чврстоће за све три брзине имају одступање мање од 2%. Једина уочена разлика је постигнуто издужење, за најмању брзину 20 mm/s износи 2,1%, за брзину од 55 mm/s је 2,09%, док је за брзину 90 mm/s вредност издужења 3,61%. Највећа вредност затезне чврстоће постигнута је у случају брзине B3 и износи 38,98 МПа док је та вредност за брзине B1 и B2 нешто мања и износи 38,22 МПа односно 38,04 МПа. Овакав резултат одговара резултатима који су представљени у прегледу литературе.



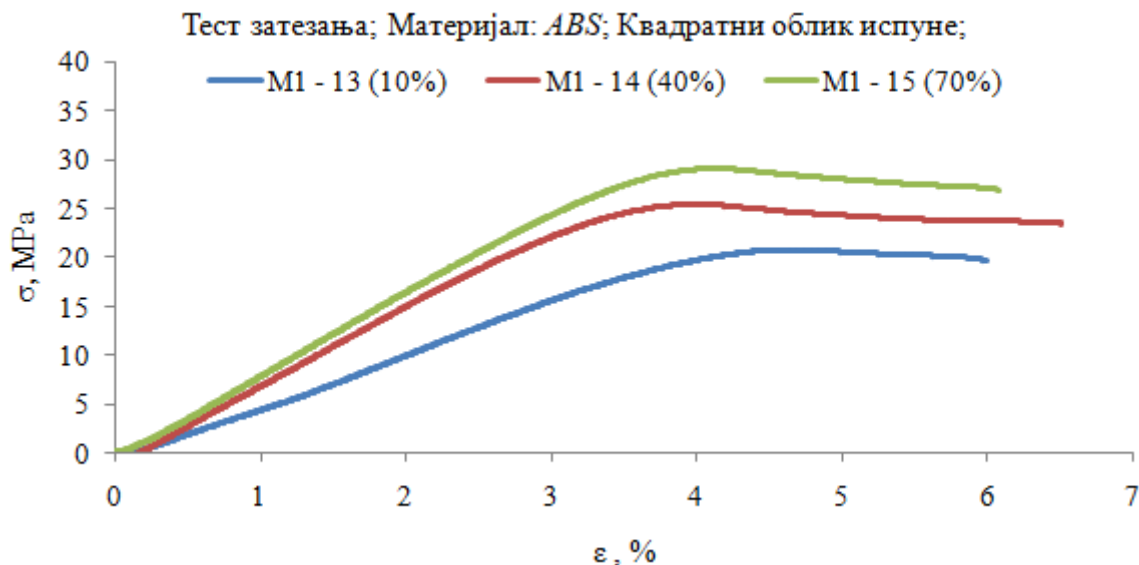
Слика 5.19 Дијаграми затезања за узорке израђене различитим брзинама штампања 20 mm/s (M1 – 10), 55 mm/s (M1 – 11) и 90 mm/s (M1 – 12)

Табела 5.18 Резултати M1 експеримената са различитим брзинама штампања

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	ϵ , %	Маса, г
M1 – 10	MVM1TU4O1I5P4B1S2/1	38,05	38,18	5,13	8,97
	MVM1TU4O1I5P4B1S2/2	38,33	38,76	6,25	8,98
	MVM1TU4O1I5P4B1S2/3	37,41	37,71	6,01	8,95
	Средња вредност	37,93	38,22	5,8	8,96
M1 – 11	MVM1TU4O1I5P4B2S2/1	36,89	37,90	4,79	8,9
	MVM1TU4O1I5P4B2S2/2	37,31	38,17	6,82	8,95
	MVM1TU4O1I5P4B2S2/3	37,98	38,04	5,78	8,84
	Средња вредност	37,39	38,04	5,79	8,89
M1 – 12	MVM1TU4O1I5P4B3S2/1	37,90	39,20	8,44	9
	MVM1TU4O1I5P4B3S2/2	38,20	38,74	6,61	8,99
	MVM1TU4O1I5P4B3S2/3	38,64	39,00	5,87	8,99
	Средња вредност	38,25	38,98	6,97	8,99

III Одређивање утицаја облика и густине испуне (M1) – тест затезања

У овом делу подељка биће анализиран утицај облика и густине испуне на механичке карактеристике узорака израђених од ABS-а. Узорци су израђени са квадратним и шестоугаоним обликом испуне и густином испуне од 10%, 40% и 70%. Дијаграми затезања узорака са квадратном испуном приказани су на слици 5.20.



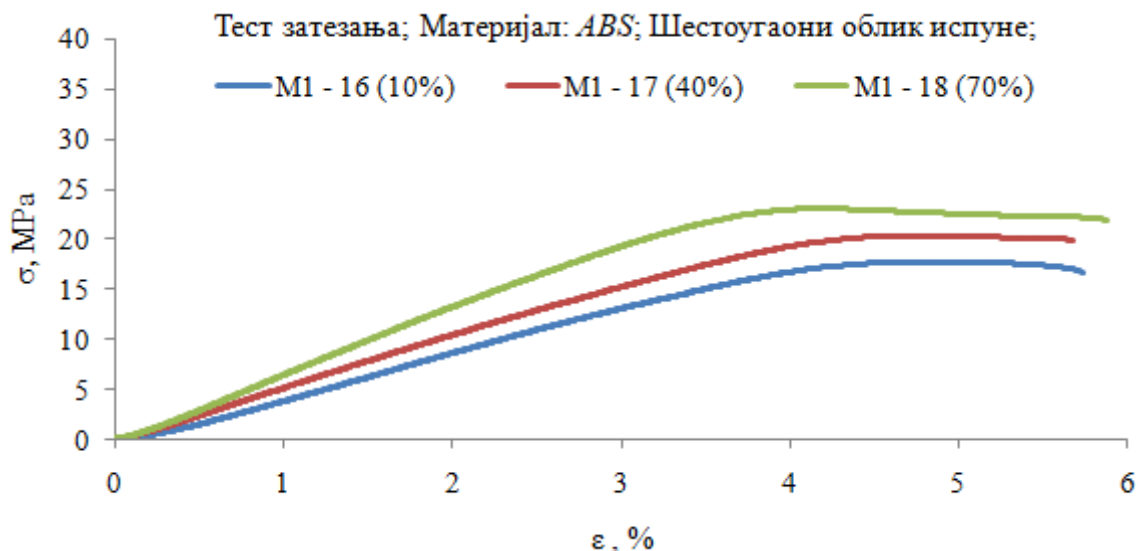
Слика 5.20 Дијаграми затезања за узорке са квадратном испуном са густином испуне 10% (M1 – 13), 40% (M1 – 14) и 70% (M1 – 15)

Резултати M1 експеримента са квадратним обликом испуне дати су у табели 5.19. Из табеле се види да је поновљивост резултата добра. Као и у осталим случајевима када су испитивани узорци израђени од ABS-а издужење није превише велико. На основу добијених резултата јасно се види да са повећањем густине испуне долази до повећања вредности напона на граници течења и затезне чврстоће.

Табела 5.19 Резултати M1 експеримената за квадратну испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г
M1 – 13	MBM1TO1I2P1B3S2/1	16,40	20,90	4,52	5,57
	MBM1TO1I2P1B3S2/2	18,43	19,51	4,82	5,6
	MBM1TO1I2P1B3S2/3	20,74	20,78	5,99	5,56
	Средња вредност	18,52	20,39	5,11	5,57
M1 – 14	MBM1TO121P2B3S2/1	23,34	25,46	4,45	6,74
	MBM1TO121P2B3S2/2	23,63	25,06	4,53	6,68
	MBM1TO121P2B3S2/3	23,46	25,40	6,5	6,68
	Средња вредност	23,47	25,31	5,16	6,7
M1 - 15	MBM1TO1I2P3B3S2/1	27,14	29,29	5,69	7,83
	MBM1TO1I2P3B3S2/2	26,95	29,08	6,07	7,82
	MBM1TO1I2P3B3S2/3	27,20	28,85	3,99	7,77
	Средња вредност	27,09	29,07	5,25	7,81

Дијаграми затезања узорка са шестоугаоном испуном приказани су на слици 5.21. Као и за квадратни облик испуне вариране су три вредности густине испуне од 10%, 40% и 70%.



Слика 5.21 Дијаграми затезања за узорке са шестоугаоном испуном са густином испуне 10% (M1 - 16), 40% (M1 - 17) и 70% (M1 - 18)

Резултати су приказани у табели 5.20. Као и у случају са квадратним обликом испуне добијени су слични резултати осим вредности издужења при кидању које је у случају квадратне испуне мање. И у овом случају већим вредностима густине испуне одговарају веће вредности механичких карактеристика.

Табела 5.20 Резултати M1 експеримената за шестоугаону испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г
M1 - 16	MBM1TO1IP1B3S2/1	16,34	17,07	4,31	5,54
	MBM1TO1IP1B3S2/2	16,64	17,80	6,25	5,55
	MBM1TO1IP1B3S2/3	16,41	17,70	5,73	5,58
	Средња вредност	16,46	17,52	5,43	5,55
M1 - 17	MBM1TO1IP2B3S2/1	18,09	19,70	5,28	6,39
	MBM1TO1IP2B3S2/2	18,60	20,34	5,68	6,39
	MBM1TO1IP2B3S2/3	18,67	20,35	5,73	6,33
	Средња вредност	18,45	20,13	5,56	6,37
M1 - 18	MBM1TO1IP3B3S2/1	20,55	22,65	6,08	7,13
	MBM1TO1IP3B3S2/2	20,65	23,05	5,88	7,08
	MBM1TO1IP3B3S2/3	21,14	23,61	5,72	7,09
	Средња вредност	20,78	23,10	5,89	7,1

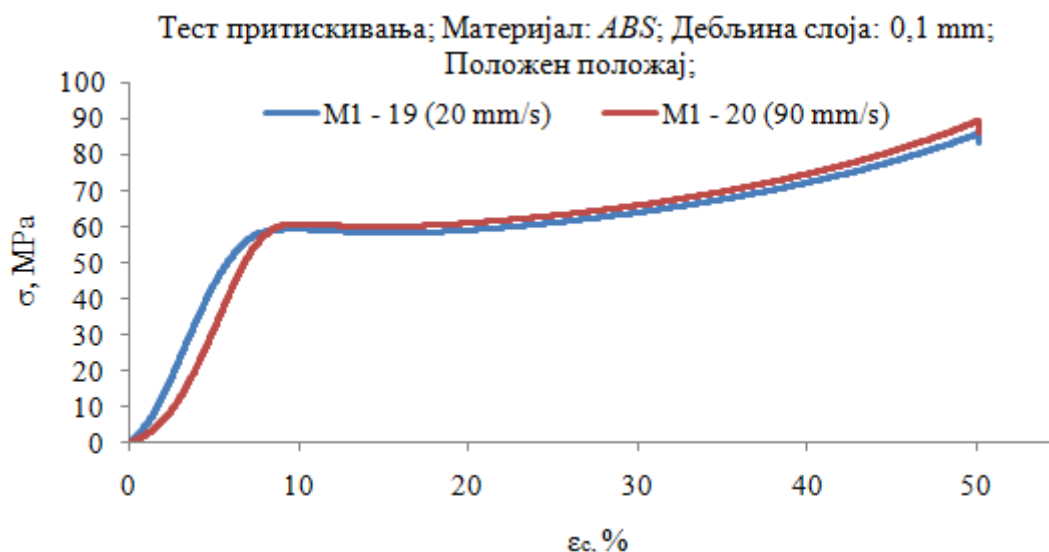
IV Одређивање утицаја положаја штампања, брзине штампања и дебљине слоја штампања (M1) – тест притискивања

У овом делу експерименталног испитивања одређени су утицаји положаја штампања, брзине штампања и дебљине слоја применом теста притискивања. Као што је у плану експеримента наведено за параметар положај штампања разматран је

положен О1 и усправан О2 положај узорка, за брзину штампања вредности 20 mm/s (B1) и 90 mm/s (B3) и за дебљину слоја штампања 0,1 mm (S1) и 0,2 mm (S2).

На слици 5.22 приказани су дијаграми притискивања узорака израђених у положеном положају са 100% вредношћу густине испуне, дебљином слоја 0,1 mm и две брзине штампања. Резултати експеримента приказани су у табели 5.21.

Резултати експеримената показали су да код узорака штампаних у положеном положају брзина штампања нема велики утицај, за најмању брзину штампања 20 mm/s вредност притисног напона износи 86,1 МПа док за највећу разматрану брзину 90 mm/s износи 89,3 МПа.

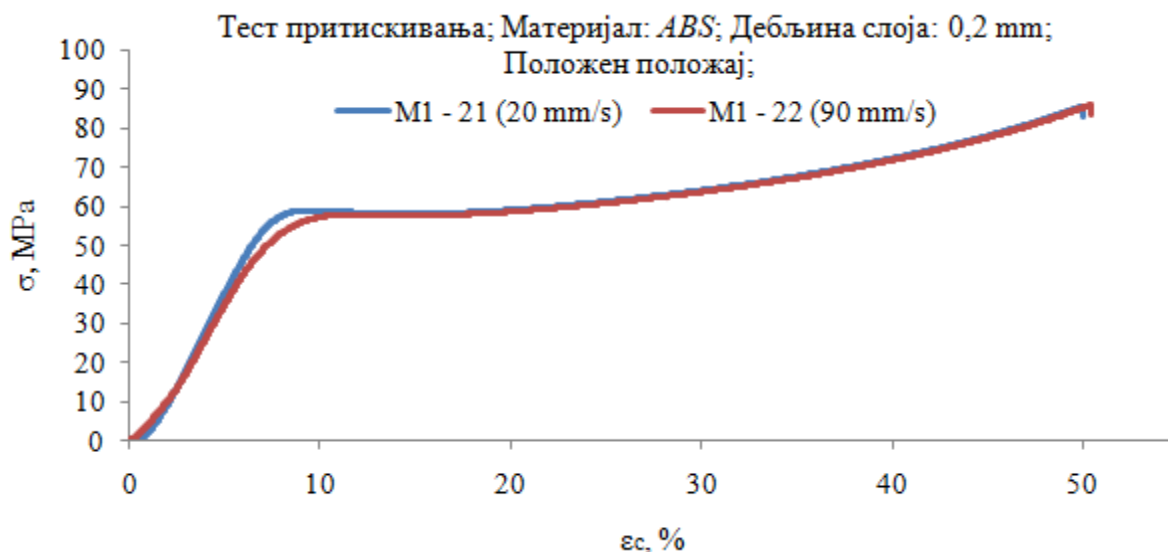


Слика 5.22 Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O1I5P4S1 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 19) и 90 mm/s (M1 - 20)

Табела 5.21 Резултати M1 експеримената са променљивом брзином штампања – тест притискивања

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 - 19	MBM1C2U4O1I5P4B1S1/1	87,09	12,69	4,29
	MBM1C2U4O1I5P4B1S1/2	85,51	12,72	4,33
	MBM1C2U4O1I5P4B1S1/3	85,78	12,72	4,25
	Средња вредност	86,12	12,71	4,29
M1 - 20	MBM1C2U4O1I5P4B3S1/1	89,32	12,71	4,38
	MBM1C2U4O1I5P4B3S1/2	90,28	12,72	4,35
	MBM1C2U4O1I5P4B3S1/3	88,27	12,71	4,38
	Средња вредност	89,29	12,72	4,37

У наставку експеримента испитан је утицај брзине штампања на узорцима израђеним са истим процесним параметрима као у претходном експерименту само што је у овом случају дебљина слоја штампања 0,2 mm (S2). Дијаграми притискивања приказани су на слици 5.23.



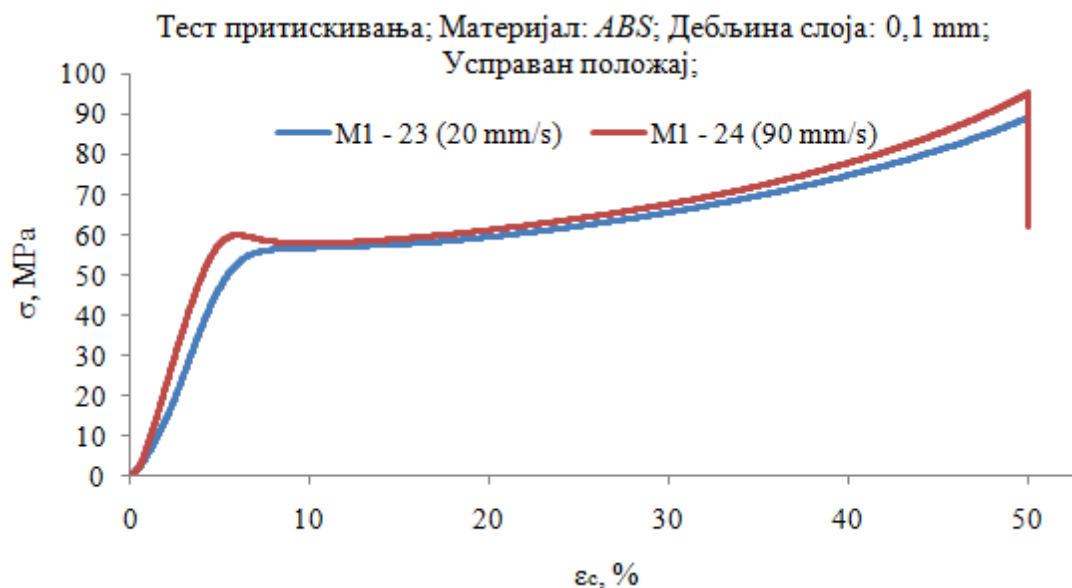
Слика 5.23 Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима OII5P4S2 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 21) и 90 mm/s (M1 - 22)

Табела 5.22 Резултати M1 експеримента за узорке са константним параметрима OII5P4S2

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 - 21	MBM1C2U4O1I5P4B1S2/1	86,71	12,71	4,3
	MBM1C2U4O1I5P4B1S2/2	85,60	12,71	4,32
	MBM1C2U4O1I5P4B1S2/3	84,70	12,72	4,33
	Средња вредност	85,67	12,71	4,31
M1 - 22	MBM1C2U4O1I5P4B3S2/1	86,00	12,82	4,35
	MBM1C2U4O1I5P4B3S2/2	84,44	12,70	4,4
	MBM1C2U4O1I5P4B3S2/3	86,41	12,70	4,39
	Средња вредност	85,62	12,74	4,38

На основу резултата који су приказани у табели 5.22 закључује се да код узорака штампаних са дебљином слоја 0,2 mm у положеном положају брзина штампања нема утицај на притисни напон.

Следећа четири експеримента урађена су са узорцима који су штампани у усправном положају са варирањем вредности дебљине слоја и брзине штампања. Прва два експеримента урађена су са узорцима који су израђени потпуно испуњени и са дебљином слоја 0,1 mm, док су вредности брзине штампања вариране. Дијаграми притискивања приказани су на слици 5.24. Резултати теста притискивања приказани су у табели 5.23.



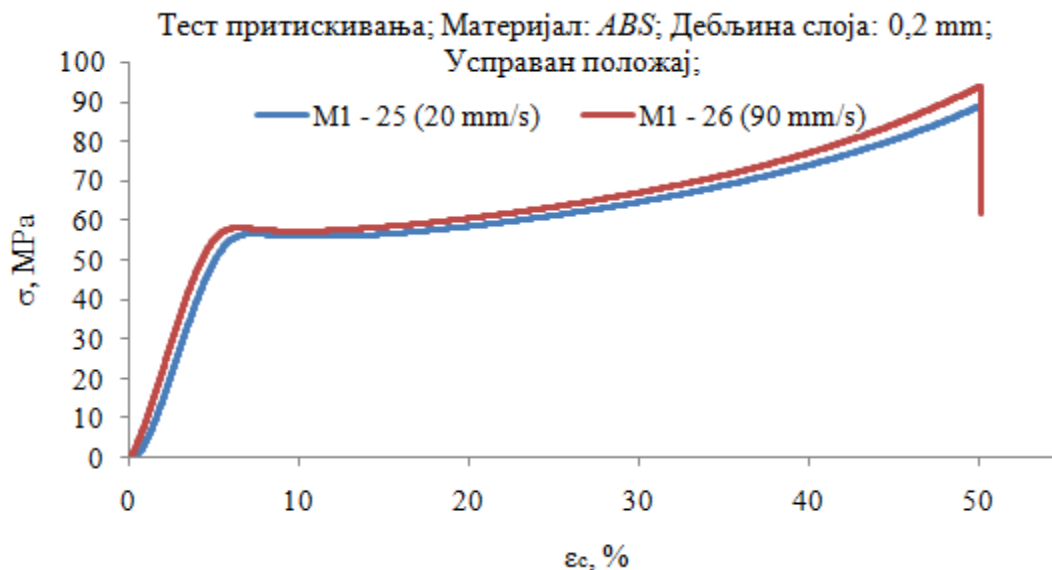
Слика 5.24 Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S1 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 23) и 90 mm/s (M1 - 24)

Табела 5.23 Резултати M1 експеримената за узорке са константним параметрима O2I5P4S1 – тест притискивања

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 – 23	MBM1C2U4O2I5P4B1S1/1	90,31	12,70	4,64
	MBM1C2U4O2I5P4B1S1/2	88,94	12,70	4,64
	MBM1C2U4O2I5P4B1S1/3	88,66	12,70	4,18
	Средња вредност	89,30	12,70	4,48
M1 - 24	MBM1C2U4O2I5P4B3S1/1	93,77	12,72	4,19
	MBM1C2U4O2I5P4B3S1/2	95,16	12,72	4,38
	MBM1C2U4O2I5P4B3S1/3	95,66	12,72	4,27
	Средња вредност	94,87	12,72	4,28

Резултати експеримента показују да брзина штампања код узорака израђених са константним параметрима O2I5P4S1 има умерени утицај, за брзину B1 вредност притисног напона износи око 89,3 МПа а за брзину B3 око 94,9 МПа. Ако упоредимо вредност притисног напона са случајем када су узорци штампани у положеном положају приметимо да су вредности у случају штампања у усправном положају веће од 5 до 10%.

Последњи експеримент у овом одељку урађен је са узорцима који су штампани у положају O2, са потпуном испуном (P4) и дебљином слоја од 0,2 mm док је брзина штампања варирана. Дијаграми притискивања приказани су на слици 5.25. Вредности добијене експериментом приказане су у табели 5.24.



Слика 5.25 Дијаграми притискивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S2 при брзини штампања 20 mm/s (M1 - 25) и 90 mm/s (M1 - 26)

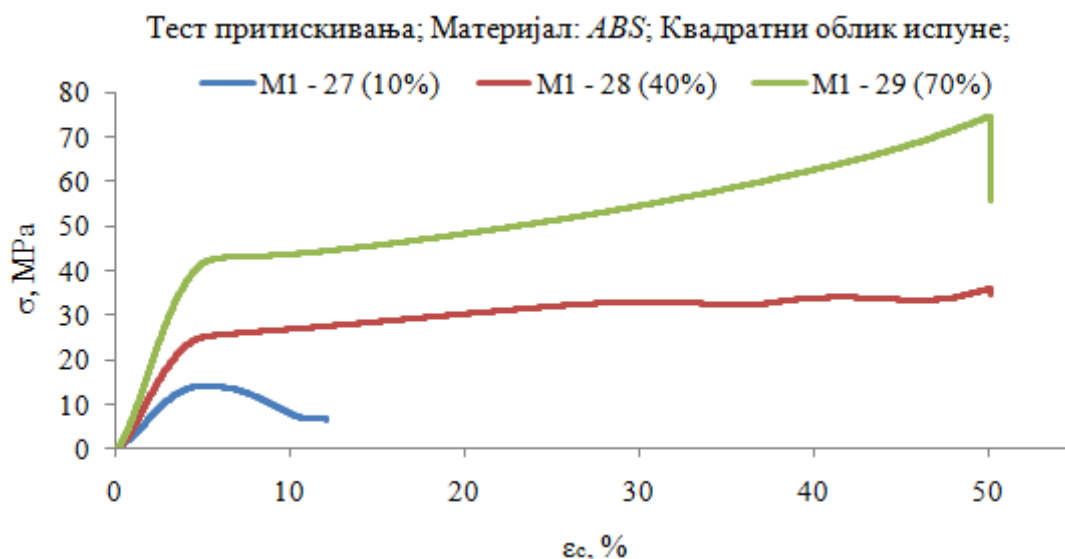
Табела 5.24 Резултати испитивања за узорке са константним параметрима O2I5P4S2

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 – 25	MBM1C2U4O2I5P4B1S2/1	88,83	12,70	4,45
	MBM1C2U4O2I5P4B1S2/2	88,50	12,70	4,54
	MBM1C2U4O2I5P4B1S2/3	89,07	12,70	4,33
	Средња вредност	88,80	12,70	4,44
M1 - 26	MBM1C2U4O2I5P4B3S2/1	93,91	12,71	4,33
	MBM1C2U4O2I5P4B3S2/2	94,40	12,71	4,38
	MBM1C2U4O2I5P4B3S2/3	92,91	12,72	4,48
	Средња вредност	93,74	12,72	4,39

Као и у претходном експерименту, узорци израђени са већом брзином штампања имају већу вредност напона. Детаљна анализа утицаја појединих параметара дата је у одељку који се бави анализом резултата.

V Одређивање утицаја облика и густине испуне (M1) – тест притискивања

За израду узорака коришћени су квадратни и шестоугаони облик испуне и густине испуне 10%, 40% и 70%. Дијаграми притискивања за узорке са квадратним обликом испуне приказани су на слици 5.26.



Слика 5.26 Дијаграми притискивања за узорке са квадратном испуном са густином испуне 10% (M1 - 27), 40% (M1 - 28) и 70% (M1 - 29)

Код узорка са густином испуне 10% долази до пада вредности деформационе силе након достизања максималне силе тј. притисне чврстоће. Ова појава се објашњава ниском вредношћу густине испуне па због значајног слободног простора унутар узорка долази до лома унутрашње структуре и значајног сабијања. Код узорка са већим вредностима густине испуне долази до значајног пораста притисног напона. Резултати су приказани у табели 5.25.

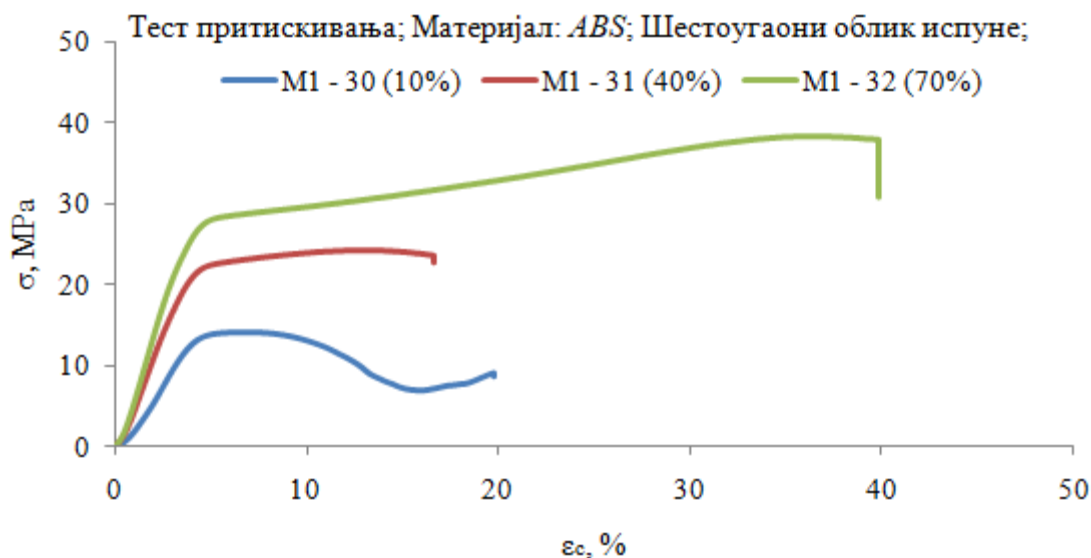
Табела 5.25 Притисне карактеристике узорка са квадратном испуном

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 – 27	MBM1C1O2I2P1B3S2/1	13,59	1,31	1,27
	MBM1C1O2I2P1B3S2/2	14,33	1,29	1,29
	MBM1C1O2I2P1B3S2/3	13,95	1,34	1,26
	Средња вредност	13,95	1,31	1,27
M1 – 28	MBM1C1O2I2P2B3S2/1	39,32	12,72	2,10
	MBM1C1O2I2P2B3S2/2	35,91	12,72	2,09
	MBM1C1O2I2P2B3S2/3	35,06	12,99	2,11
	Средња вредност	36,76	12,81	2,1
M1 - 29	MBM1C1O2I2P3B3S2/1	75,88	12,72	2,88
	MBM1C1O2I2P3B3S2/2	73,88	12,71	2,82
	MBM1C1O2I2P3B3S2/3	74,67	12,71	2,84
	Средња вредност	74,81	12,71	2,85

Експерименти са узорцима са густином испуне од 40% и 70% показали су значајно веће вредности напона. Резултати експеримената недвосмислено показују да код узорка са квадратним обликом испуне повећањем вредности густине испуне

долази до повећања вредности напона. Експерименти су у ова два случаја прекинути на приближно 12,7 mm јер није било смисла настављати експеримент зато што би сила непрестано расла. Ова претпоставка је изведена из чињенице да долази до гњечења термопластичног материјала. Због ових разлога погодно је поредити деформације различитих узорака при истој вредности силе притискивања као и вредност силе при истим вредностима деформације.

После узорака израђених са квадратном испуном испитивани су узорци са шестоугаоном испуном. Као и у претходном експерименту коришћене су три густине испуне од 10%, 40% и 70%. Дијаграми притискивања дати су на слици 5.27.



Слика 5.27 Дијаграми притискивања за шестоугаони облик испуне са густином испуне 10% (M1 - 30), 40% (M1 - 31) и 70% (M1 - 32)

Табела 5.26 Притисне карактеристике узорака са шестоугаоном испуном

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M1 - 30	MVM1C1O2I3P1B3S2/1	14,36	1,69	1,31
	MVM1C1O2I3P1B3S2/2	14,03	1,76	1,31
	MVM1C1O2I3P1B3S2/3	14,14	1,74	1,28
	Средња вредност	14,17	1,73	1,3
M1 - 31	MVM1C1O2I3P2B3S2/1	23,12	2,67	1,91
	MVM1C1O2I3P2B3S2/2	24,71	2,99	1,85
	MVM1C1O2I3P2B3S2/3	24,15	3,25	1,87
	Средња вредност	23,99	2,97	1,87
M1 - 32	MVM1C1O2I3P3B3S2/1	36,16	8,52	2,28
	MVM1C1O2I3P3B3S2/2	38,42	9,23	2,34
	MVM1C1O2I3P3B3S2/3	49,33	13,06	2,28
	Средња вредност	41,30	10,27	2,3

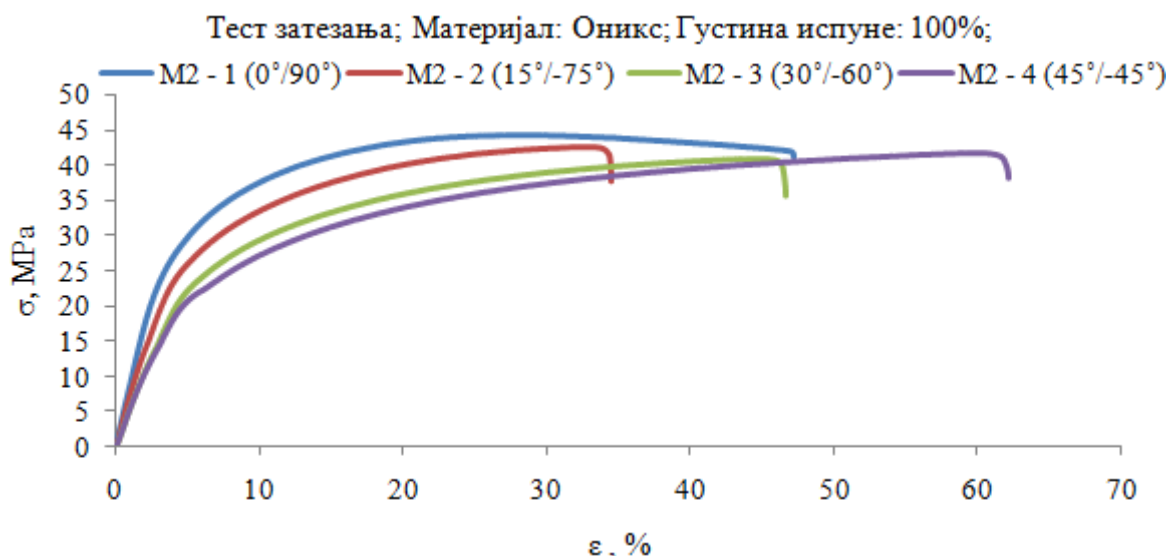
Резултати испитивања приказани су у табели 5.26. Повећањем густине испуне долази до повећања вредности напона. За најмању густину испуне од 10% вредност напона износи 14,17 МПа, за узорке са густином испуне од 40% вредност напона је значајно већа и износи око 24 МПа док је за густину испуне од 70% вредност највећа и износи преко 40 МПа. Поновљивост резултата је задовољавајућа осим у експерименту са густином испуне од 70%, где је при испитивању једног узорка измерена већа вредност напона.

5.6.2 Експеримент M2 - испитивање узорака од Оникса

Узорци од Оникса испитани су тестовима затезања и притискивања. Одређени су утицаји угла штампања, оријентације штампања, облика и густине испуне.

I Одређивање утицаја угла штампања (M2) – тест затезања

Дијаграми затезања за четири експеримента којима је испитиван утицај угла штампања приказани су на слици 5.28. Разматране су четири оријентације тј. угла штампања: $0^\circ/90^\circ$, $15^\circ/75^\circ$, $30^\circ/60^\circ$ и $45^\circ/45^\circ$. Сви узорци су потпуно испуњени материјалом јер испитивање узорака са решеткастом структуром не би имало смисла.



Слика 5.28 Дијаграми затезања за узорке са углом штампања $0^\circ/90^\circ$ (M2 - 1), $15^\circ/75^\circ$ (M2 - 2), $30^\circ/60^\circ$ (M2 - 3) и $45^\circ/45^\circ$ (M2 - 4)

Вредности механичких карактеристика испитаних узорака дате су у табели 5.27. У табели су за сваки узорак засебно приказане вредности затезне чврстоће, напона течења, укупне деформације преузете из софтвера машине и масе.

Резултати приказани у табели 5.27 показују да је еластична деформација веома велика. У случају првог узорка средња вредност укупне деформације очитана из софтвера машине за испитивање материјала показује 47,21% док је ручно измерена вредност значајно мања и износи око 10%. Пре испитивања затезањем на сваком узорку обележена је мерна дужина (50 mm) и после испитивања је мерено растојање између реперних тачака. После разарања узорка на машини види се да је услед нестајања еластичних деформација настало растојање између делова узорка. Изглед узорка након

нестајања еластичне деформације и узорак спремних за мерење после разарања дати су на слици 5.29.

Табела 5.27 Резултати М2 експеримента – утицај угла штампања

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ε , %	Маса, г
М2 – 1	MFM2TU1O1I5P4B4S1/1	21,03	44,11	47,21	9,22
	MFM2TU1O1I5P4B4S1/2	23,30	44,05	52,09	9,22
	MFM2TU1O1I5P4B4S1/3	24,47	43,72	43,96	9,20
	Средња вредност	22,93	43,96	47,75	9,21
М2 – 2	MFM2TU2O1I5P4B4S1/1	22,16	41,79	32,97	9,28
	MFM2TU2O1I5P4B4S1/2	20,70	42,55	34,43	9,28
	MFM2TU2O1I5P4B4S1/3	20,74	42,37	39,03	9,09
	Средња вредност	21,2	42,23	35,48	9,22
М2 – 3	MFM2TU3O1I5P4B4S1/1	19,63	40,66	44,37	9,38
	MFM2TU3O1I5P4B4S1/2	19,48	40,95	46,65	9,29
	MFM2TU3O1I5P4B4S1/3	18,80	40,62	49,79	9,25
	Средња вредност	19,3	40,74	46,94	9,31
М2 – 4	MFM2TU4O1I5P4B4S1/1	16,19	38,98	56,19	9,18
	MFM2TU4O1I5P4B4S1/2	16,67	42,14	66,63	8,95
	MFM2TU4O1I5P4B4S1/3	17,25	41,78	62,11	9,29
	Средња вредност	16,7	40,96	61,64	9,14



а)



б)

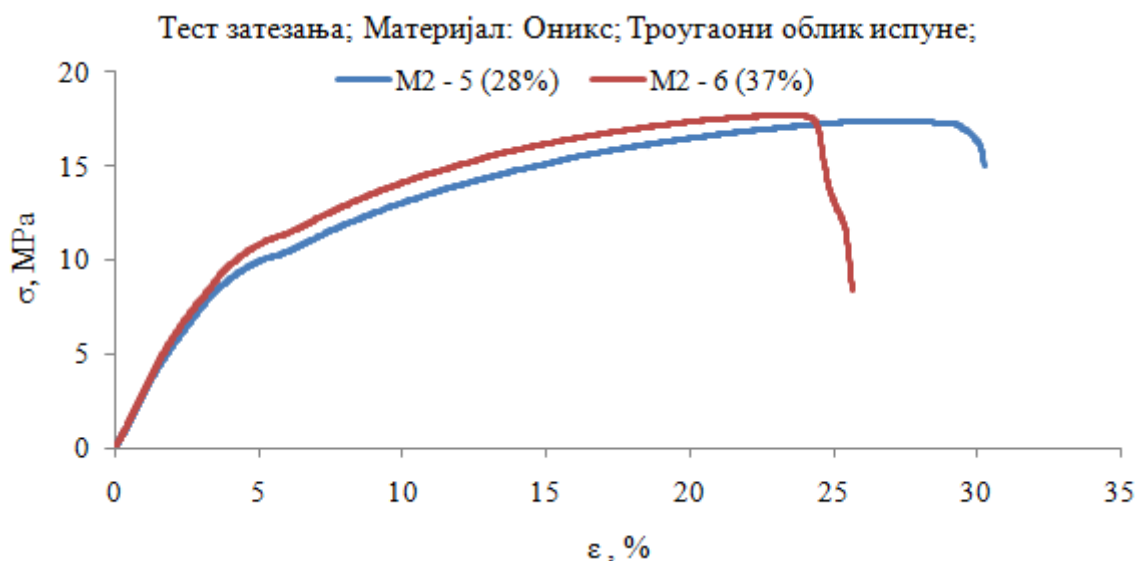
Слика 5.29 Узорци од Оникса: а) после разарања на машини и б) после завршетка испитивања

Резултат који је најзанимљивији за анализу је свакако вредност затезне чврстоће. Највећа вредност затезне чврстоће измерена је у случају оријентације $U1$ односно угла штампања $0^\circ/90^\circ$, затим следи оријентација $U2$ ($15^\circ/-75^\circ$), и на крају оријентације $U3$ ($30^\circ/-60^\circ$) и $U4$ ($45^\circ/-45^\circ$) са приближно истим вредностима. Резултати су показали да је утицај угла штампања мали јер је разлика између највеће и најмање вредности мања од 10%.

II Одређивање утицаја облика и густине испуне – тест затезања

У овом делу експеримента урађено је осам експеримената чији је циљ утврђивање утицаја облика испуне и густине испуне на механичке карактеристике. Анализирана су четири облика испуне: троугаони, квадратни, шестоугаони и таласasti. Софтвер којим се управља процесом штампања на штампачу *Markforged* зове се *Eiger* и за сваки облик испуне има дефинисану максималну, препоручену и минималну густину испуне, па је у оквиру ове групе експеримената анализирана могућност уштеде материјала коришћењем препоручене и минималне густине испуне. За троугаони облик испуне минимална вредност густине испуне је 28%, препоручена 37% а максимална 55%. За шестоугаони облик испуне минимална вредност густине испуне је 18%, препоручена 27% а максимална 62%. Код таласастог облика испуне минимална вредност густине испуне је 28%, препоручена 40% а максимална 52%. Минимална вредност густине испуне за квадратни облик је 20% а препоручена 50%.

Прво је анализиран утицај густине испуне код троугаоне испуне. Дијаграми затезања приказани су на слици 5.30.



Слика 5.30 Дијаграми затезања за троугаону испуну са минималном (M2 - 5) и препорученом густином испуне (M2 - 6)

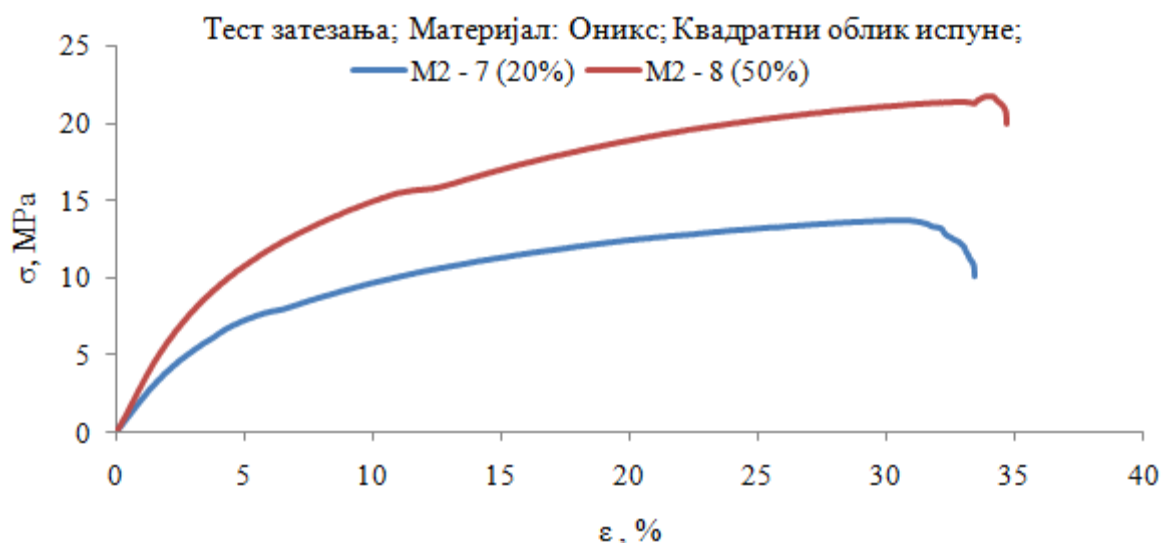
Резултати испитивања приказани су у табели 5.28. Резултати експеримената показују да је разлика вредности затезне чврстоће када се користе минимална и препоручена густина испуне веома мала и износи око 0,3 МПа. Са дијаграма затезања јасно се види разлика при прекиду, тј. да је при мањој густини испуне лом жилавији. Током експеримената примећено је да лом настаје постепено, тј. да долази до раздвајања материјала и формирања такозваних крокодилских чељусти, односно

поступног еластичног раздвајања материјала. И у овим експериментима се, као и у претходним са пуним епруветама, уочава праволинијски део дијаграма који би код метала представљао подручје важења Хуковог закона али је примећено да не постоји потпуна аналогија.

Табела 5.28 Резултати М2 експеримената за троугаону испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_m , МПа	ϵ , %	Маса, г
М2 - 5	MFM2TO1I1P5B4S1/1	7,51	17,87	29,32	5,55
	MFM2TO1I1P5B4S1/2	7,26	17,37	30,26	5,45
	MFM2TO1I1P5B4S1/3	7,00	16,84	34,65	5,27
	Средња вредност	7,25	17,36	31,41	5,42
М2 - 6	MFM2TO1I1P6B4S1/1	8,40	17,78	23,95	5,81
	MFM2TO1I1P6B4S1/2	8,53	17,64	25,68	5,88
	MFM2TO1I1P6B4S1/3	8,52	17,57	26,29	5,74
	Средња вредност	8,48	17,66	25,31	5,81

Након троугаоног облика испуне испитан је правоугаони облик. Дијаграми затезања приказани су на слици 5.31.



Слика 5.31 Дијаграми затезања узорка са квадратним обликом испуне, са минималном (М2 - 7) и препорученом (М2 - 8) густином испуне

Резултати за узорке са правоугаоном испуном дати су у табели 5.29. Резултати експеримената са узорцима са правоугаоном испуном показују значајну разлику у вредности затезне чврстоће и напона течења. Као и у случају троугаоне испуне уочава се да почетни део дијаграма није у потпуности праволинијски и да није једноставно раздвојити еластичну и пластичну деформацију. Због тога је у експерименту са препорученом правоугаоном испуном направљен додатни експеримент. Узорак је оптерећен затезањем до подручја које је испод вредности затезне чврстоће и затим је извршено растерећење. Циљ експеримента је био да се провери да ли подручје на дијаграму лево од тачке максималне силе представља еластично подручје. Након

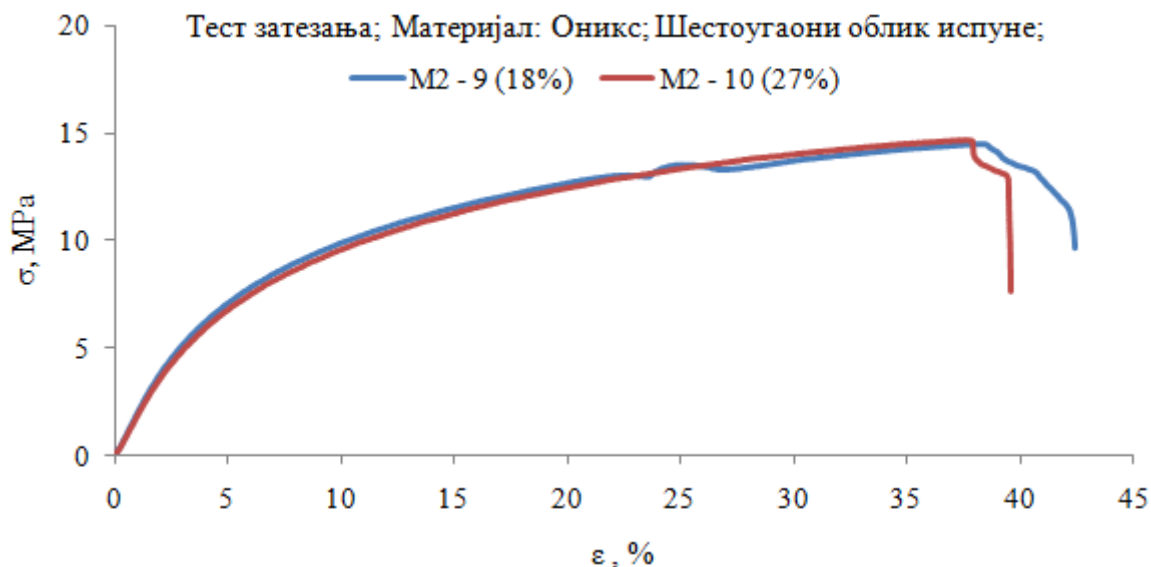
растерећења измерена је пластична деформација од око 2 mm чиме је само потврђена теза да није једноставно одвојити подручје еластичних и пластичних деформација код полимерних материјала. Експеримент је настављен са истим узорком и добијена вредност затезне чврстоће је у складу са очекивањима.

Табела 5.29 Резултати М2 експеримената за квадратну испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г
М2 - 7	MFM2TO1I2P5B4S1/1	6,39	14,54	30,96	4,96
	MFM2TO1I2P5B4S1/2	6,00	12,42	28,88	4,38
	MFM2TO1I2P5B4S1/3	6,13	13,72	33,43	4,71
	Средња вредност	6,17	13,56	31,09	4,68
М2 - 8	MFM2TO1I2P6B4S1/1	13,81	21,70	34,63	6,68
	MFM2TO1I2P6B4S1/2	13,81	20,93	34,89	6,73
	MFM2TO1I2P6B4S1/3	13,89	21,12	34,01	6,66
	Средња вредност	13,83	21,25	34,51	6,69

Трећи облик испуне који је анализиран је шестоугаони облик испуне. Шестоугаона испуна се веома често користи у адитивној производњи због омогућавања уштеде материјала и скраћења времена израде. Шестоугаона основа се често у литератури назива и шестоугаоно саће јер је идеја о коришћењу овог облика виђена у природи тј. узор има у пчелињем саћу. Дијаграми затезања дати су на слици 5.32.

Резултати испитивања узорака са шестоугаоном испуном приказани су у табели 5.30. На основу резултата експеримената са узорцима са шестоугаоном испуном може се закључити да се смањивањем густине испуне не долази до смањивања вредности механичких карактеристика па је уштеда материјала у потпуности оправдана. Настало издужење је веома слично, узорци штампани са густином испуне $P5$ имају веће издужење него узорци штампани са густином испуне $P6$ за 1%.



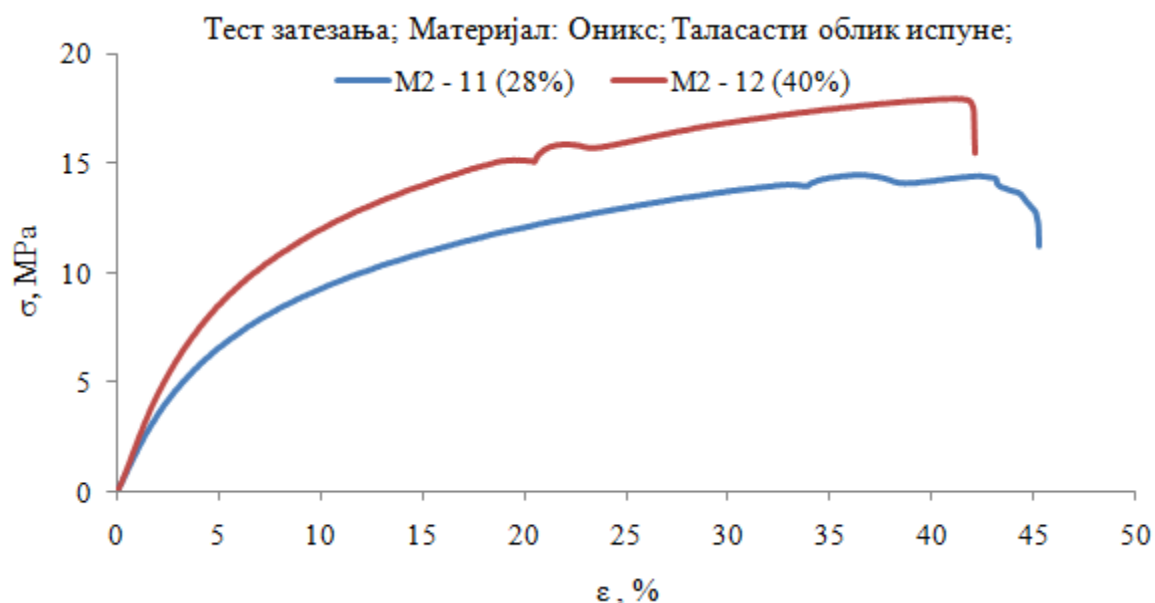
Слика 5.32 Дијаграми затезања за шестоугаони облик испуне са минималном (М2 - 9) и препорученом густином испуне (М2 - 10)

Табела 5.30 Резултати М2 експеримената за шестоугаону испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г
М2 - 9	MFM2TO1I3P5B4S1/1	7,59	13,86	37,67	4,18
	MFM2TO1I3P5B4S1/2	11,96	15,54	44,02	4,29
	MFM2TO1I3P5B4S1/3	12,02	14,52	42,39	4,38
	Средња вредност	10,52	14,64	41,36	4,28
М2 - 10	MFM2TO1I3P6B4S1/1	/	13,10	39,82	4,47
	MFM2TO1I3P6B4S1/2	/	14,64	39,52	4,48
	MFM2TO1I3P6B4S1/3	13,48	14,85	41,85	4,49
	Средња вредност	13,48	14,19	40,4	4,48

Последњи облик испуне који је анализиран је таласасти облик. Произвођачи 3D штампача и универзални софтвери омогућавају нове облике испуне који нису конвенционални. Неки од њих су направљени забаве ради док је таласасти облик испуне направљен као облик испуне који може да буде користан и задовољи захтеве професионалаца. Дијаграми затезања узорака израђених са таласастим обликом испуне приказани су на слици 5.33.

Резултати испитивања приказани су у табели 5.31. Резултати испитивања затезањем узорака са таласастом испуном показали су да овај облик испуне задовољава услове коришћења за професионалне намене. Вредности карактеристика се не разликују значајно од других облика испуне.



Слика 5.33 Дијаграми затезања за таласасти облик испуне са минималном (М2 - 11) и препорученом густином испуне (М2 - 12)

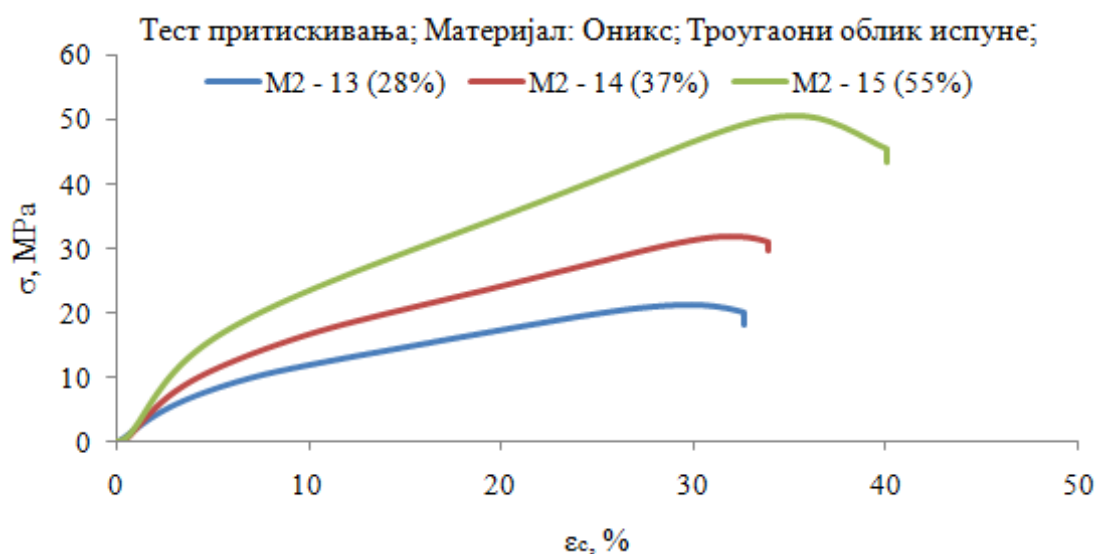
Табела 5.31 Резултати М2 експеримената за таласасту испуну

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	A, %	Маса, г
М2 – 11	MFM2TO1I4P5B4S1/1	12,96	14,83	48,85	4,99
	MFM2TO1I4P5B4S1/2	12,97	14,48	45,25	4,9
	MFM2TO1I4P5B4S1/3	12,96	14,85	46,28	4,91
	Средња вредност	12,96	14,72	46,79	4,93
М2 - 12	MFM2TO1I4P6B4S1/1	13,82	18,30	37,91	5,89
	MFM2TO1I4P6B4S1/2	13,81	18,44	46,73	5,94
	MFM2TO1I4P6B4S1/3	13,82	17,94	42,14	5,98
	Средња вредност	13,81	18,22	42,26	5,94

III Одређивање утицаја облика и густине испуне – тест притискивања

Циљ испитивања притискивањем је одређивање утицаја облика и густине испуне на максималну вредност притисног напона. Идеја да се овакво испитивање обави проистиче из размишљања да ће полимерни алат израђен адитивном технологијом трпети значајна притисна оптерећења. Експеримент је организован у десет различитих експеримената. Варирана су три различита облика испуне (троугаони, шестоугаони и таласасти), као и три вредности густине испуне (минимална, препоручена и максимална). Ове варијације утицајних параметара дефинишу девет експеримената док је у десетом експерименту испитивана пуна епрувета што ће омогућити поређење притисних карактеристика.

Први експерименти су спроведени са узорцима са троугаоном испуном. Дијаграми притискивања за сва три експеримента приказани су на слици 5.34. Анализом дијаграма уочава се да повећањем густине испуне долази до значајног повећања напона. Уочена је прилично добра поновљивост резултата чиме се повећава њихова веродостојност.



Слика 5.34 Дијаграми притискивања за узорке са троугаоном испуном за минималну (M2 - 13), препоручену (M2 - 14) и максималну (M2 - 15) густину испуне

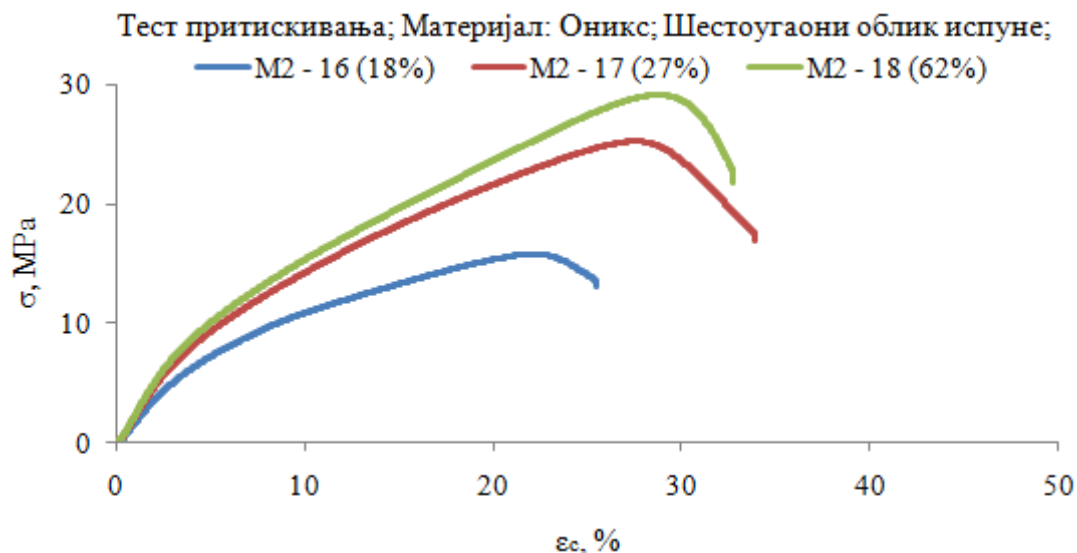
Резултати су приказани у табели 5.32. Вредност притисног напона за најмању вредност густине испуне износи око 21,5 МПа и забележена је при вредности деформације између 7 и 8 mm. Као и у претходно разматраним случајевима претпоставка је да је дошло до лома испуне и да због тога долази до пада вредности силе односно притисног напона. Значајно веће вредности притисног напона постигнуте су за друге две вредности густине испуне. За препоручену густину испуне измерена вредност притисног напона је 32,5 МПа. У случају максималне вредности густине испуне постигнута је највећа вредност напона од 52,75 МПа. Значајно је анализирати вредност деформације при достизању максималне вредности притисног напона која се повећава са повећањем вредности густине испуне. За минималну вредност густине испуне деформација износи око 7,5 mm, за препоручену 8 mm и за максималну 9 mm.

Табела 5.32 Притисне карактеристике узорака са троугаоном испуном

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M2 - 13	MFM2C1O2I1P5B4S1/1	22,15	8,01	1,83
	MFM2C1O2I1P5B4S1/2	21,05	7,40	1,82
	MFM2C1O2I1P5B4S1/3	21,29	7,58	1,84
	Средња вредност	21,49	7,66	1,83
M2 - 14	MFM2C1O2I1P6B4S1/1	35,76	9,27	2,03
	MFM2C1O2I1P6B4S1/2	31,70	8,08	2,01
	MFM2C1O2I1P6B4S1/3	30,25	8,09	2,05
	Средња вредност	32,57	8,48	2,03
M2 - 15	MFM2C1O2I1P7B4S1/1	50,19	9,96	2,44
	MFM2C1O2I1P7B4S1/2	57,64	9,76	2,41
	MFM2C1O2I1P7B4S1/3	50,44	8,91	2,47
	Средња вредност	52,75	9,54	2,44

Тест притискивања је потврдио закључке које су добијени тестом затезања да материјал Оникс има велику еластичност.

Друга група експеримената је реализована са шестоугаоним обликом испуне. Као и у случају троугаоног облика вариране су три вредности густине испуне. Дијаграми притискивања приказани су на слици 5.35. Подаци са резултатима испитивања узорака дати су у табели 5.33. И у случају коришћења шестоугаоног облика испуне закључци су слични као и у претходном случају. Повећањем густине испуне повећава се вредност притисног напона, за минималну вредност густине притисни напон има вредност 15,8 МПа, за препоручену вредност 24,69 МПа и за минималну вредност густине 26,73 МПа.



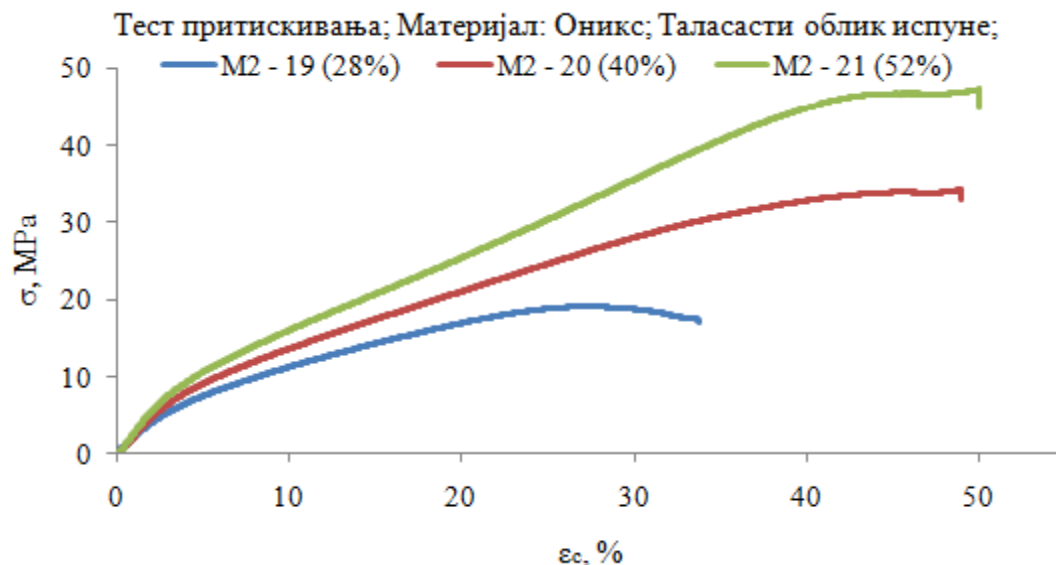
Слика 5.35 Дијаграми притискивања за узорке са шестоугаоном испуном за минималну (M2 - 16), препоручену (M2 - 17) и максималну густину испуне (M2 - 18)

Табела 5.33 Притисне карактеристике узорака са шестоугаоном испуном

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M2 - 16	MFM2C1O2I3P5B4S1/1	15,77	5,65	1,57
	MFM2C1O2I3P5B4S1/2	14,90	5,12	1,59
	MFM2C1O2I3P5B4S1/3	16,84	6,00	1,61
	Средња вредност	15,83	5,59	1,59
M2 - 17	MFM2C1O2I3P6B4S1/1	25,70	7,25	1,64
	MFM2C1O2I3P6B4S1/2	23,17	6,40	1,7
	MFM2C1O2I3P6B4S1/3	25,21	7,01	1,67
	Средња вредност	24,69	6,88	1,67
M2 - 18	MFM2C1O2I3P7B4S1/1	25,78	6,42	1,75
	MFM2C1O2I3P7B4S1/2	25,32	6,22	1,73
	MFM2C1O2I3P7B4S1/3	29,09	7,33	1,74
	Средња вредност	26,73	6,65	1,74

Вредност деформације при којој је настала највећа вредност напона за минималну густину испуне износи 5,59 mm, расте за препоручену вредност густине и износи 6,88 mm а затим се смањује за максималну вредност где је вредност деформације 6,65 mm. Објашњење за овакву вредност није могуће наћи без посматрања под микроскопом. Претпоставка је да због максималне вредности густине испуне и вероватно неког дефекта узрокованог влагом или грешке материјала долази до бржег лома.

Дијаграми притискивања за узорке са таласастом испуном приказани су на слици 5.36. Подаци са резултатима испитивања узорака дати су у табели 5.34.



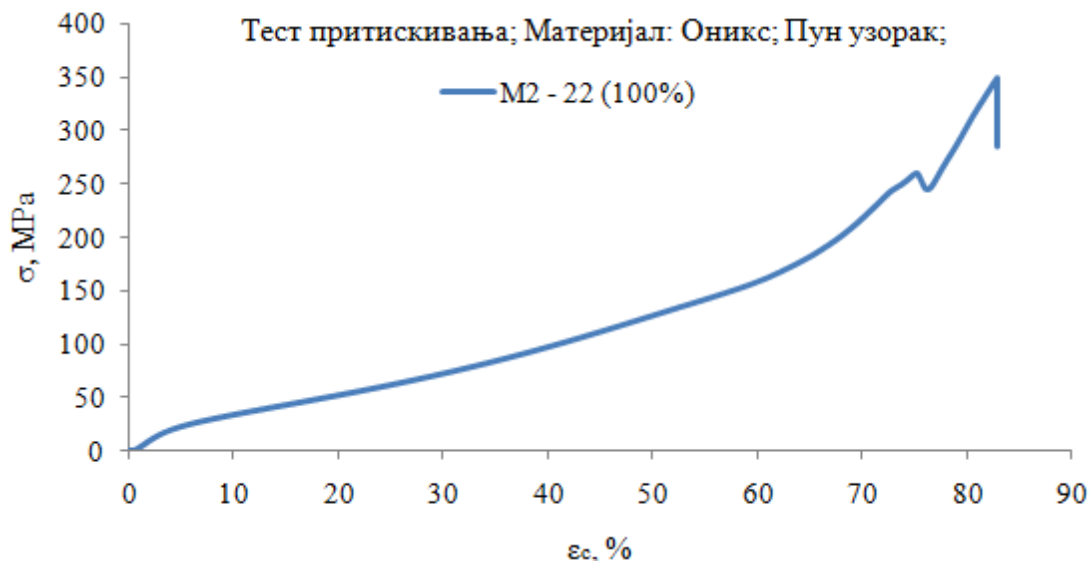
Слика 5.36 Дијаграми притискивања за узорке са шестоугаоном испуном за минималну (М2 - 19), препоручену (М2 - 20) и максималну густину испуне (М2 - 21)

Табела 5.34 Притисне карактеристике узорака са таласастом испуном

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
М2 – 19	MFM2C1O2I4P5B4S1/1	15,61	6,06	1,77
	MFM2C1O2I4P5B4S1/2	19,63	12,36	1,92
	MFM2C1O2I4P5B4S1/3	19,05	6,91	1,84
	Средња вредност	18,09	8,44	1,84
М2 – 20	MFM2C1O2I4P6B4S1/1	34,21	12,43	2,17
	MFM2C1O2I4P6B4S1/2	30,33	10,12	2,13
	MFM2C1O2I4P6B4S1/3	39,15	13,20	2,12
	Средња вредност	34,56	11,91	2,14
М2 - 21	MFM2C1O2I4P7B4S1/1	51,18	12,18	2,44
	MFM2C1O2I4P7B4S1/2	47,20	12,69	2,42
	MFM2C1O2I4P7B4S1/3	42,63	11,85	2,44
	Средња вредност	47,01	12,24	2,43

Током испитивања примећено је да код узорака са већом густином испуне после пада силе долази до поновног раста што се објашњава појавом гњечења еластичног материјала. Као и код осталих облика испуне и код узорака са таласастом испуном примећује се велики пораст силе притискивања повећањем густине испуне. Порастом густине испуне долази до повећања вредности напона и вредности деформације при којој та вредност напона настаје.

Последња група М2 експеримената реализована са цилиндричним узорком који је у потпуности испуњен. Дијаграм притискивања оваквог узорка приказан је на слици 5.37.



Слика 5.37 Дијаграм притискивања за пун цилиндрични узорак

Испитивање је показало да је материјал веома еластичан и до појаве прслина је дошло тек после двадесетак милиметара радног хода машине односно око 80% висине. Подаци добијени из софтвера машине приказани су у табели 5.35.

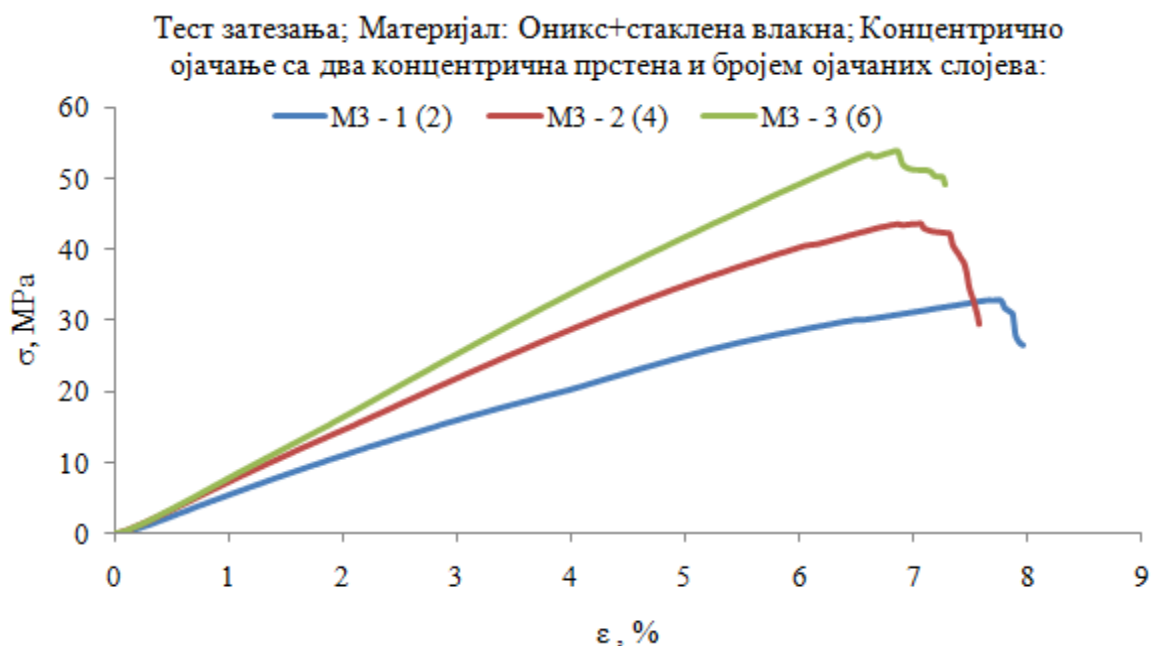
Табела 5.35 Притисне карактеристике пуних узорака

Експ.	Шифра експеримента	Напон, МПа	Вредност деформације, mm	Маса, г
M2 - 22	MFM2C1O2I5P4B4S1/1	349,59	21,03	3,24
	MFM2C1O2I5P4B4S1/2	255,35	20,01	3,36
	MFM2C1O2I5P4B4S1/3	500,82	22,02	3,14
	Средња вредност	368,58	21,02	3,25

5.6.3 Експеримент M3 - испитивање узорака од Оникса ојачаног стакленим влакнима – испитивање затезањем

Утицај ојачавајућих влакана одређен је експериментом у којем су коришћени узорци израђени са троугаоним обликом испуне са препорученом густином испуне (37%), ојачани концентрично стакленим влакнима. Вариран је број ојачаних слојева и број концентричних прстенова стаклених влакана. Дијаграми затезања за узорке израђене са два концентрична прстена приказани су на слици 5.38.

Испитивање како коришћење ојачања утиче на механичке карактеристике адитивно произведених узорака је веома важно јер употреба ојачавајућих влакана има све већу примену. Коришћена верзија уређаја, *Markforged Onyx Pro*, има могућност ојачања само стакленим влакнима док напредније варијанте уређаја могу користити угљенична и влакна од кевлара. Тежња је да потпуним ојачањем буде могућа брза производња делова који ће ојачани моћи да замене и делове од алуминијума. Због наведених разлога истраживања о утицају параметара ојачања на механичке карактеристике делова ће бити од великог значаја у будућности.



Слика 5.38 Дијаграми затезања за узорке са два концентрична прстена и 2 (МЗ - 1), 4 (МЗ - 2) и 6 (МЗ - 3) слојева ојачаних стакленим влакнима

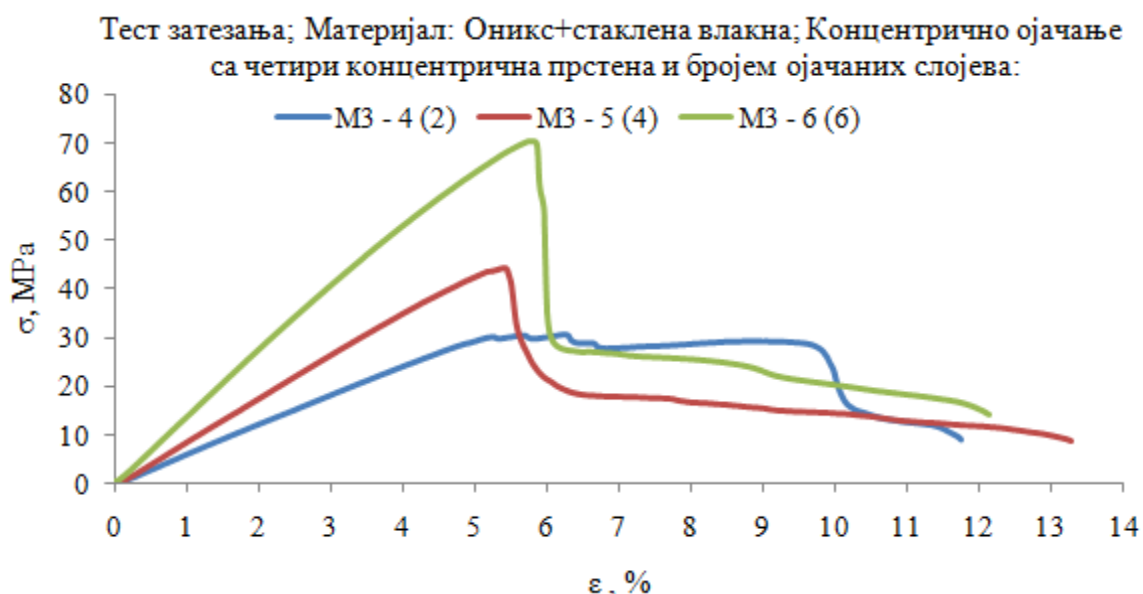
Табела 5.36 Резултати МЗ експеримента – утицај ојачавајућих влакана у 2 концентрична прстена

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$ МПа	R_m МПа	ϵ , %	Маса, г	Утрошена количина материјала (Оникс / стаклена влакна), cm^3
МЗ – 1	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L1/1	23,88	33,02	7,96	6,45	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L1/2	23,89	30,07	10,25	6,71	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L1/3	25,63	35,00	8,77	6,64	
	Средња вредност	24,46	32,69	8,99	6,6	7,47 cm^3 / 0,13 cm^3
МЗ – 2	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L2/1	32,52	44,28	7,73	6,55	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L2/2	29,80	40,05	7,17	6,81	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L2/3	31,45	43,56	7,58	6,76	
	Средња вредност	27,37	36,95	7,49	6,71	7,43 cm^3 / 0,26 cm^3
МЗ - 3	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L3/1	38,53	50,03	6,71	6,97	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L3/2	50,14	53,88	7,28	7,03	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K1L3/3	49,62	54,50	7,1	7,11	
	Средња вредност	32,48	41,27	7,03	7,04	7,39 cm^3 / 0,38 cm^3

Резултати теста затезања приказани су у табели 5.36. Поновљивост резултата је добра и нема већих одступања. Резултати показују да повећањем броја ојачаних слојева стакленим влакнима долази до повећања вредности затезне чврстоће и напона на граници течења. Средња вредност затезне чврстоће за узорак израђен са два ојачана слоја је 32,69 МПа, са четири ојачана слоја 36,95 МПа а за узорак са шест ојачаних

слојева 41,27 МПа. Утицај количине материјала је видљив али ће интересантна бити анализа односа вредности постигнутих механичких карактеристика и количине утрошеног материјала јер иако је у последњем случају употребљено три пута више ојачавајућих влакана вредност затезне чврстоће је повећана за око 25%.

У наставку истраживања испитани су узорци са четири концентрична прстена и променљивим бројем ојачаних слојева као у претходним експериментима. Узорци су штампани са четири концентрична прстена ојачања и са два, четири и шест ојачаних слојева стакленим влакнима. Дијаграми затезања приказани су на слици 5.39. Резултати експеримената приказани су у табели 5.37.



Слика 5.39 Дијаграми затезања за узорке са четири концентрична прстена и 2 (МЗ - 4), 4 (МЗ - 5) и 6 (МЗ - 6) слојева ојачаних стакленим влакнима

Табела 5.37 Резултати МЗ експеримента – утицај ојачавајућих влакана у 4 концентрична прстена

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г	Утрошена количина материјала (Оникс / стаклена влакна), cm^3
МЗ – 4	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L1/1	28,78	29,01	12,45	6,98	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L1/2	28,08	34,83	9,82	6,99	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L1/3	28,83	30,62	11,75	6,83	
	Средња вредност	28,56	31,49	11,34	6,93	7,70 cm^3 / 0,25 cm^3
МЗ – 5	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L2/1	38,47	43,57	9,71	7,23	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L2/2	39,29	56,52	6,82	6,95	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L2/3	41,04	44,22	13,28	6,73	
	Средња вредност	39,60	48,10	9,94	6,97	7,61 cm^3 / 0,50 cm^3

Табела 5.37 (наставак) - Резултати МЗ експеримента – утицај ојачавајућих влакана у 4 концентрична прстена

Експ.	Шифра експеримента	$R_{p0,2}$, МПа	R_M , МПа	ϵ , %	Маса, г	Утрошена количина материјала (Оникс / стаклена влакна), cm^3
МЗ - 6	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L3/1	52,94	70,27	12,11	7,45	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L3/2	47,45	70,63	5,92	7,24	
	MFM3TO1I1P6B4S1R1K2L3/3	52,74	66,78	8,7	7,36	
	Средња вредност	51,04	69,23	8,91	7,35	$7,52\text{cm}^3 / 0,75\text{cm}^3$

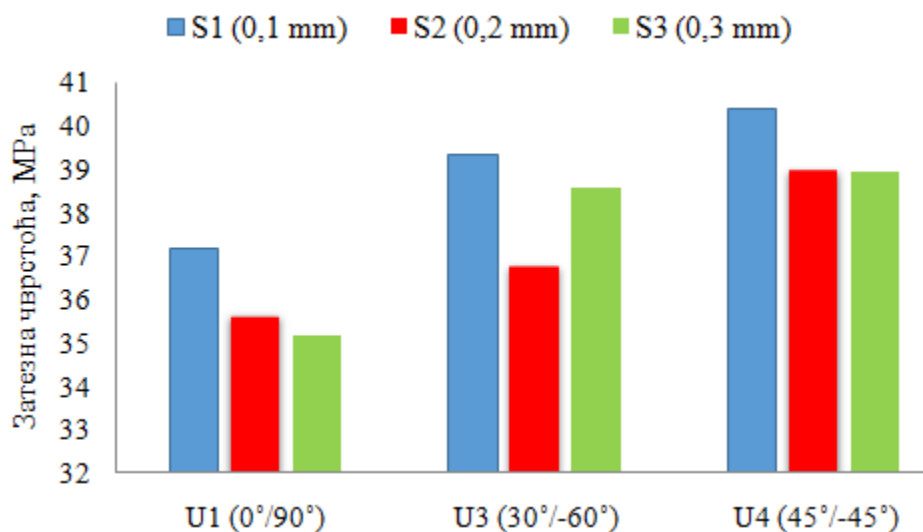
Повећање удела запремине стаклених влакана доводи до повећања напона на граници течења и затезне чврстоће. За случај када су ојачана само два слоја вредност затезне чврстоће просечно је 31,5 МПа, за случај са четири ојачана слоја 48,1 МПа, и за случај са шест ојачаних слојева вредност затезне чврстоће износи 69,2 МПа. Детаљна анализа и закључци како је најбоље користити ојачавајућа стаклена влакна дати су у наредном одељку где је приказана анализа резултата.

5.7 Упоредна анализа експерименталних резултата

5.7.1 Анализа резултата експеримента М1

Циљ прве групе експеримената био је одређивање утицаја угла штампања и дебљине слоја штампања на вредност затезне чврстоће. Испитани узорци израђени су од ABS-а на штампачу *Makerbot replicator 2X*. Резултати добијени експериментима графички представљени хистограмима дати су на слици 5.40.

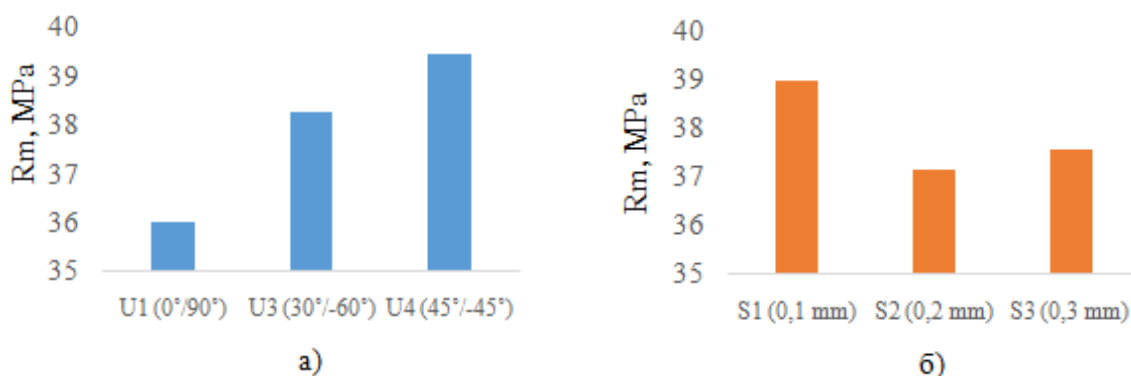
Анализирајући резултате експеримената долази се до закључка да је утицај угла штампања и дебљине слоја штампања релативно мали. Као што је поменуто у кратком осврту на резултате у одељку 5.5, разлика вредности је мања од 5%.



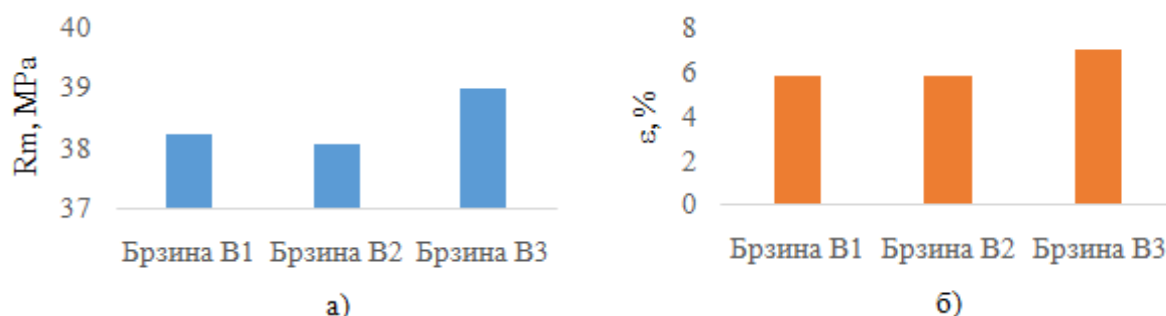
Слика 5.40 Вредност затезне чврстоће у зависности од вредности угла штампања

Упоређењем резултата закључено је да су највеће вредности постигнуте за угао штампања $U4$ ($45^\circ/-45^\circ$). Потребно је снимити само место прекида електронским микроскопом и тада ће бити јасније како долази до прекида влакана. Овакав закључак се поклапа са резултатима већине истраживања као и са препорукама произвођача. После оријентације $U4$ ($45^\circ/-45^\circ$) следе резултати за оријентацију $U3$ ($30^\circ/-60^\circ$) и најмање вредности су забележене за оријентацију штампања $U1$ ($0^\circ/90^\circ$). Повећањем угла штампања повећава се и вредност затезне чврстоће.

Највеће вредности затезне чврстоће забележене су за дебљину слоја 0,1 mm за сва три угла штампања. За угао штампања $U1$ повећање дебљине слоја доводи до смањења вредности затезне чврстоће. За угао штампања $U3$ вредност затезне чврстоће је највећи за дебљину слоја $S1$, следе резултати за дебљину слоја $S3$ и најмању вредност имају узорци штампани са дебљином слоја $S2$. У случају угла штампања $U3$ постоји одступање али као што је у прегледу литературе наведено често се дешава да не постоји јасан тренд односно да због неких специфичних карактеристика материјала или мањих неправилности рада штампача при одређеној оријентацији дође до појаве неког одступања. За угао штампања $U4$ највећу вредност имају узорци штампани са дебљином слоја $S1$, затим узорци штампани са $S2$ и $S3$ али је разлика између њих веома мала. Приказ вредности затезне чврстоће у зависности од угла штампања и дебљине слоја дат је на слици 5.41. Вредности наведене на слици су средње вредности резултата свих експеримената у којима се параметар појављује.



Слика 5.41 Упоредни приказ средње вредности затезне чврстоће у зависности од:
а) угла штампања б) дебљине слоја штампања

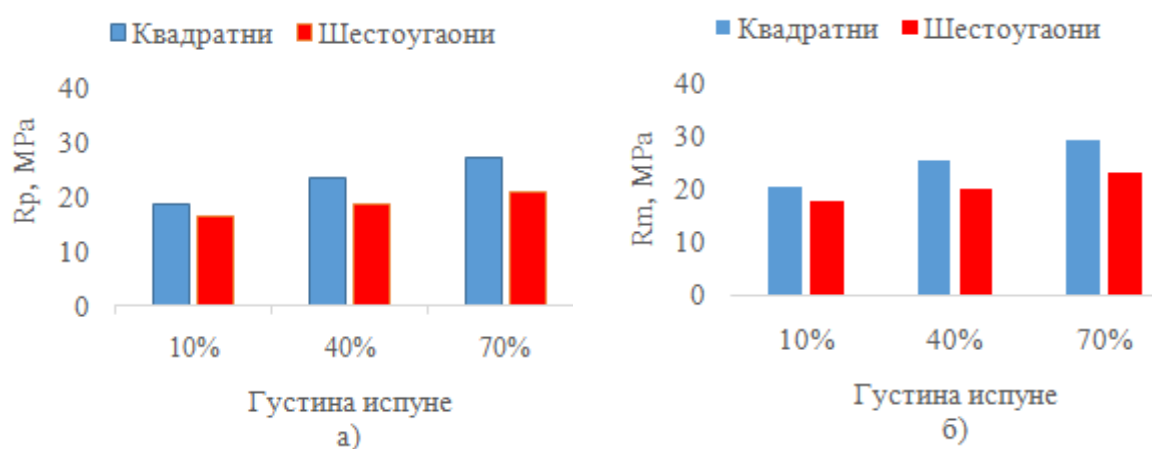


Слика 5.42 Зависност од брзине штампања: а) затезне чврстоће и б) издужења

У наредном делу експеримента циљ је био одређивање утицаја брзине штампања. Узорци су израђени са стандардном дебљином слоја (0,2 mm) да би само утицај брзине био утврђен. Резултати, који су графички приказани на слици 5.42, показују да брзина штампања нема утицај на механичке карактеристике што се поклапа

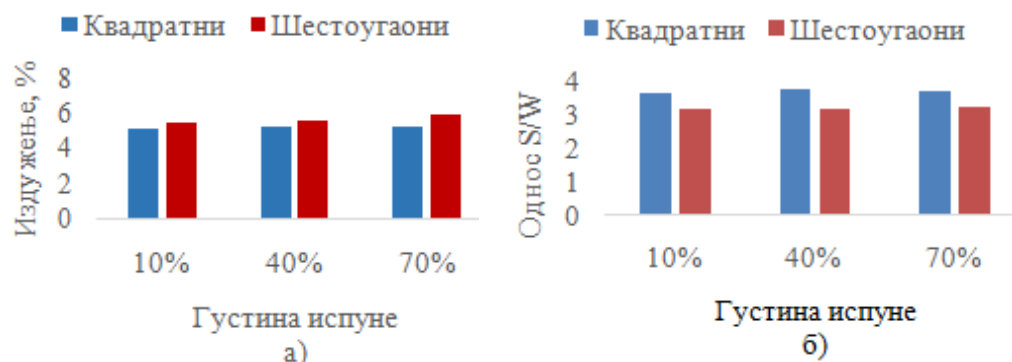
са наведеним литературним изворима. За брзине $B1$ и $B2$ издужење је скоро исто, око 2,1%, док је за брзину $B3$ измерено издужење 3,6%.

Утицај густине и облика испуне је одређен експериментом који је описан у поделељку 5.5.1. Добијени резултати показали су значајно мање вредности механичких карактеристика у односу на узорке који су у потпуности били испуњени материјалом и када је вредност затезне чврстоће била у опсегу 35 – 40 МПа. Вредност напона на граници течења за шестоугаони и квадратни облик испуне за три вредности густине испуне приказана је графички на слици 5.43 а). Повећањем густине испуне повећава се вредност напона на граници течења за оба облика испуне. Такође, повећањем густине испуне повећава се разлика између вредности напона за разматране густине испуне. Исти закључак је изведен и када је разматрана вредност затезне чврстоће. Већим вредностима густине испуне одговара већа вредност затезне чврстоће. Резултати су приказани на слици 5.43 б).



Слика 5.43 Вредности а) напона на граници течења и б) затезне чврстоће - у зависности од облика и густине испуне

Деформација је у случају узорка са 10% густине испуне скоро идентична за оба облика испуне и износи око 1,6%, за густину испуне од 40% значајно веће издужење постигнуто је код узорка са квадратним обликом испуне а у случају узорка са густином испуне од 70% шестоугаони облик испуне гарантује боље резултате. Резултати у облику хистограма приказани су на слици 5.44а.



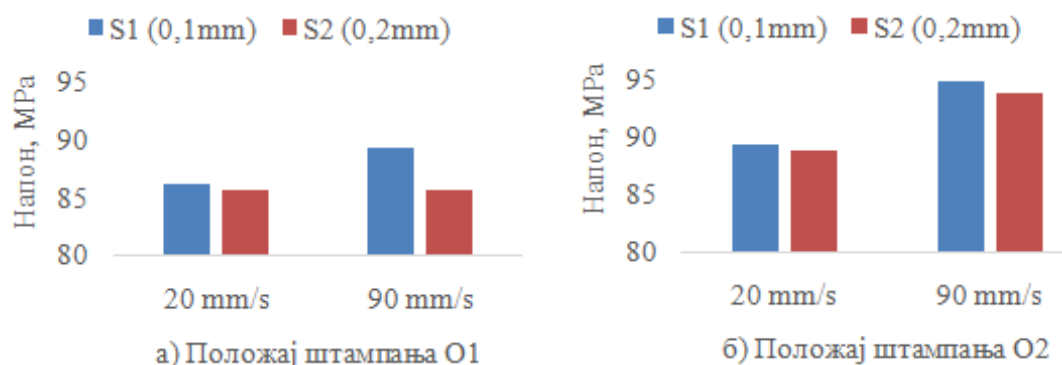
Слика 5.44 Вредност за различите облике испуне и различите густине испуне: а) издужења и б) односа S/W

Као и у свим претходним случајевима где је разматран утицај густине и облика испуне и у овом случају је разматран однос разматране карактеристике, у овом случају

затезне чврстоће, и масе узорка. Резултати који су приказани на слици 5.44 б) показују да је бољи однос постигнут за квадратни облик испуне.

Испитивање материјала тестом притискивања подељено је на два дела. У првом делу одређен је утицај положаја штампања, брзине штампања и дебљине слоја штампања. Да би био испитан утицај положаја штампања коришћени су узорци у облику квадрата (C2). Резултати су приказани на слици 5.45, на слици под а) приказани су резултати за оријентацију штампања O1 (положен) а на слици под б) за узорке штампане у положају O2 (усправан).

На основу резултата експеримента изведени су закључци о утицају пааметара штампања. Мањим вредностима дебљине слоја штампања одговарају веће вредности напона. Такође, већим брзинама штампања одговара већа вредност напона, једино одступање постоји за положај штампања O1 и дебљину слоја S2. Ипак, утицај дебљине слоја и брзине штампања није превелик, вредности се разликују за неколико процената. Највећи утицај на вредност напона има положај штампања.

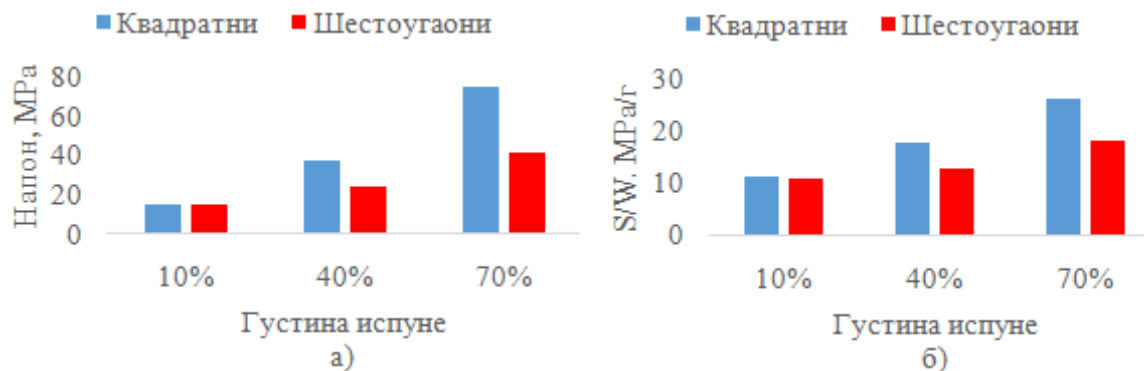


Слика 5.45 Вредност напона у зависности од дебљине слоја и брзине штампања за: а) положај штампања O1 (положен) и б) положај штампања O2 (усправан)

Циљ последњег теста са материјалом ABS је утврђивање утицаја облика и густине испуне на вредност притисног напона. Разматрана су два облика испуне, квадратни и шестоугаони, и три вредности густине испуне 10%, 40% и 70%. Резултати су графички приказани на слици 5.46.

Напон има приближно једнаку вредност за оба облика испуне за најмању густину испуне од 10%, док за веће вредности густине испуне разлика постоји. У случају густине испуне од 40% и 70% вредност напона је већа код узорака израђених са квадратним обликом испуне. Закључак је да квадратни облик испуне даје боље резултате по питању напона.

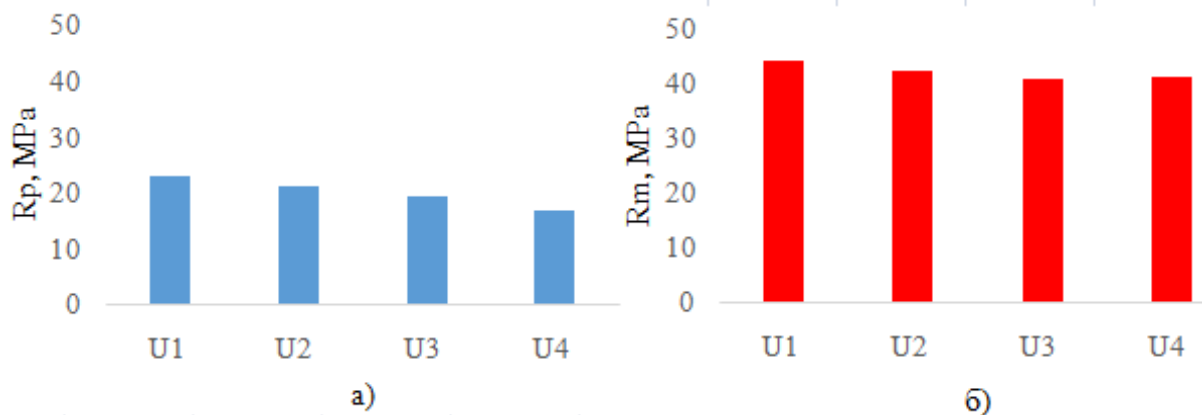
Интересантан податак који може бити значајан при избору облика и густине испуне је однос вредности напона и масе дела. Карактеристика материјала изражена на овакав начин представља битан податак при избору материјала за алат за деформисање. На слици 5.46 б) приказане су вредности односа вредности напона у МПа и масе узорка у грамама. Резултати недвосмислено приказују да је квадратни облик испуне значајно погоднији за употребу, односно да се његовом употребом постижу веће вредности напона. Анализа утицајности параметара штампања на механичке карактеристике делова од ABS-а објављена је у радовима [Delić, 2025a] за случај затезног оптерећења и у [Delić, 2024] и [Delić, 2025b] за случај притисног оптерећења.



Слика 5.46 Вредност: а) напона и б) односа затезне чврстоће и масе у зависности од густине и облика испуне

5.7.2 Анализа резултата експеримента М2

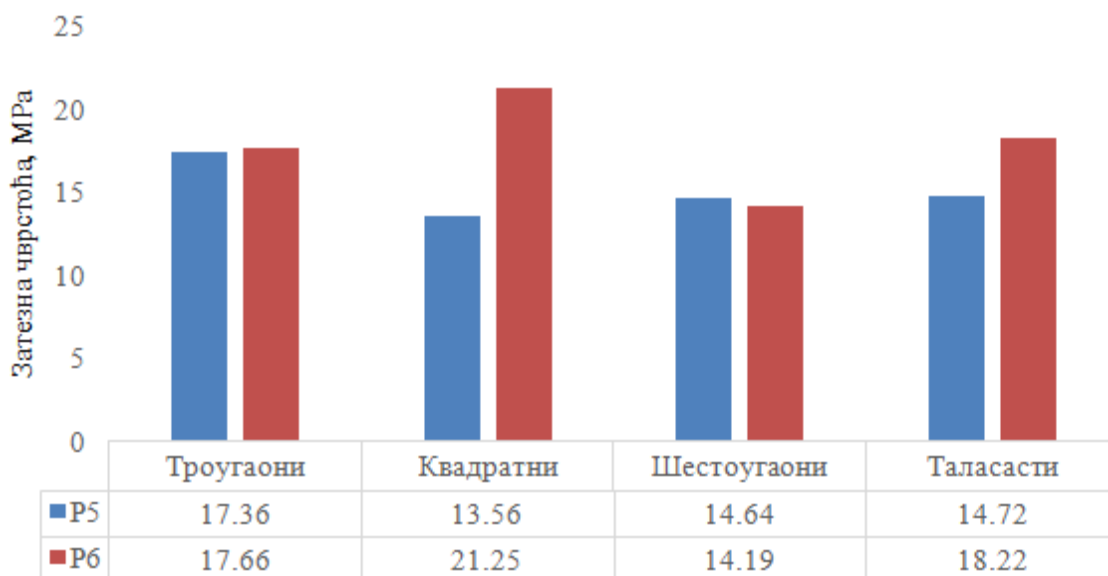
Циљ првог дела експеримента М2 је одређивање утицаја угла штампања материјала Оникс на механичке карактеристике узорака. Разматрана су четири угла штампања и најбоље вредности затезне чврстоће постигнуте су за угао $0^\circ/90^\circ$ односно за наношење материјала у правцу осе затезања и управно на њу. Такође се закључује да повећањем вредности угла долази до опадања вредности напона течења и затезне чврстоће. Због свега наведеног закључује се да је најбоља угао штампања, тј. угао штампања који гарантује најбоље механичке карактеристике $0^\circ/90^\circ$.



Слика 5.47 Вредности: а) напона течења и б) затезне чврстоће за М2 експерименте и промену угла штампања

Међутим, разлика између резултата напона течења и затезне чврстоће за угао $0^\circ/90^\circ$ и $45^\circ/-45^\circ$ постоји али није превише велика и износи око 8% (слика 5.47). Највећи проблем је што најбољи угао штампања захтева постављање осе дијагонално у односу на радни сто тако да су ови резултати корисни али као други закључак се намеће да угао штампања код материјала Оникс не игра одлучујућу улогу.

Циљ другог дела експеримента М2 је одређивање утицаја облика и густине испуне на затезне карактеристике узорака. На слици 5.48 приказани су резултати за четири разматрана облика испуне и две вредности густине испуне, минималну (P5) и препоручену (P6).



Слика 5.48 Вредност затезне чврстоће у зависности од облика и густине испуне

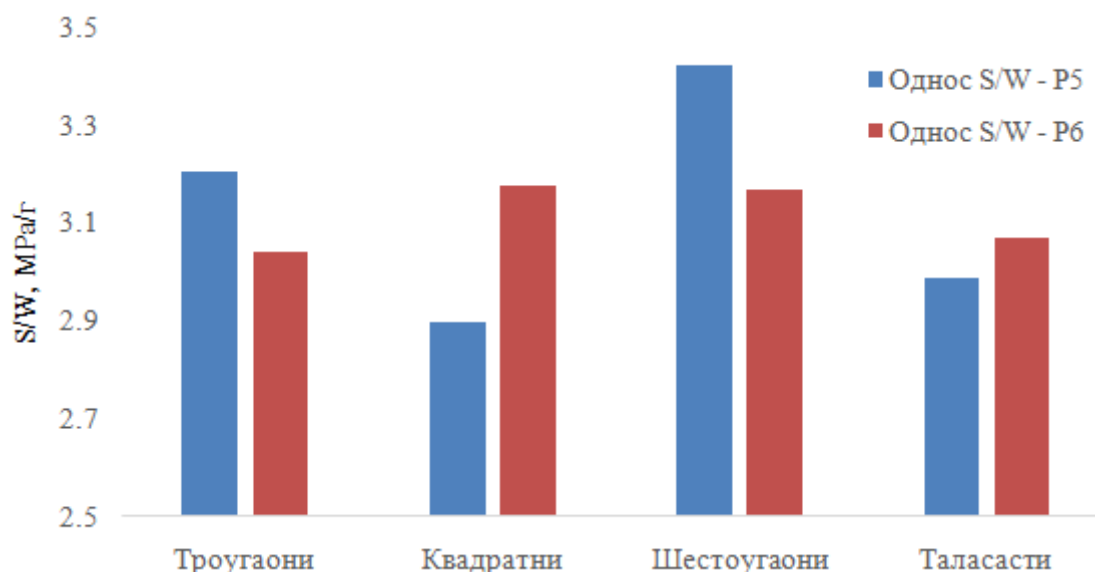
На основу резултата који су графички приказани на слици 5.48 закључује се да је разлика карактеристика код троугаоне и шестоугаоне испуне мала када се користе минимална и препоручена густина испуне док је код квадратног и шестоугаоног облика та разлика значајно већа. Резултати су показали да је са аспекта механичких карактеристика најбољи квадратни облик испуне, затим следе троугаона и таласасти и са најслабијим карактеристикама на крају долази шестоугаони облик испуне.

Иако су изложени подаци добар показатељ који је могуће користити при избору облика и густине испуне, права слика ће бити добијена када се израчуна однос затезне чврстоће и масе узорка. Идеја за овакво поређење и тумачење резултата дошла је из прегледа литературе и уочавања коришћења односа *Strength to weight ratio*. Вредности односа затезне чврстоће и масе узорака приказане су у табели 5.38.

Разматрањем односа једне од карактеристика, затезне чврстоће, и масе, закључује се да је најбоље искоришћење материјала у случају минималне густине испуне у случају примене шестоугаоног облика испуне, док је при препорученој вредности густине испуне најбољи однос постигнут за квадратни и шестоугаони облик испуне. Графички приказ резултата дат је на слици 5.49.

Табела 5.38 Однос затезне чврстоће и масе

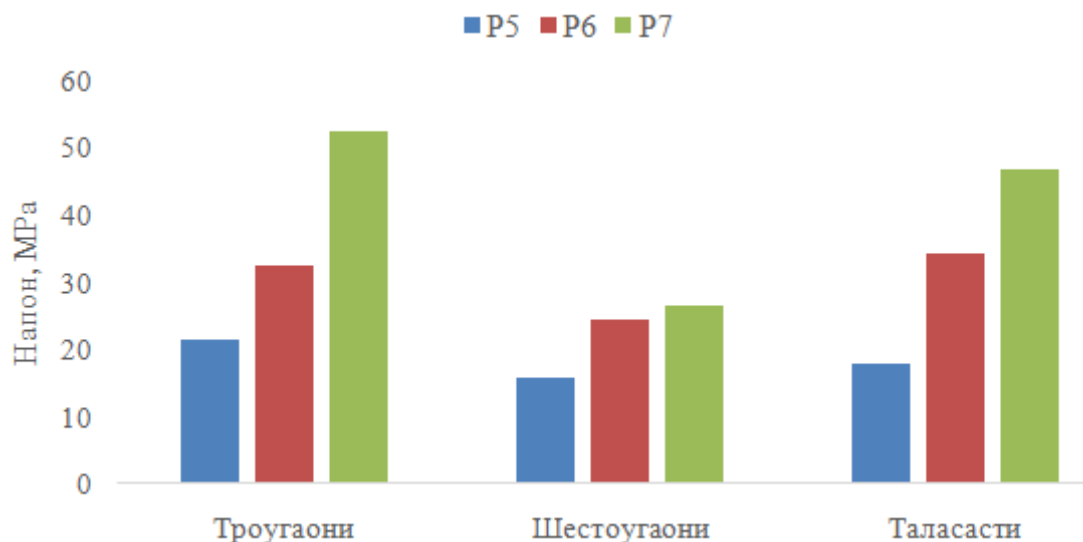
Облик испуне	маса - P5 (г)	затезна чврстоћа - P5 (МПа)	Однос S/W - P5
Троугаони	5,42	17,36	3,20
Квадратни	4,68	13,56	2,90
Шестоугаони	4,28	14,64	3,42
Таласасти	4,93	14,72	2,99
	маса - P6 (г)	затезна чврстоћа - P6 (МПа)	Однос S/W - P6
Троугаони	5,81	17,66	3,04
Квадратни	6,69	21,25	3,18
Шестоугаони	4,48	14,19	3,17
Таласасти	5,94	18,22	3,07



Слика 5.49 Однос S/W за различите облике и густине испуне

У експериментима где су одређиване притисне особине материјала Оникс такође је уочена велика еластичност материјала, после завршетка експеримента дошло је до повећања димензија сабијеног узорка. Експерименти су рађени до тренутка када се појави очигледно испупчење узорка и дође до пада деформационе силе. Након пада деформационе силе реално је било да ће доћи до пораста силе јер ће у одређеном тренутку све шупљине узорка бити попуњене.

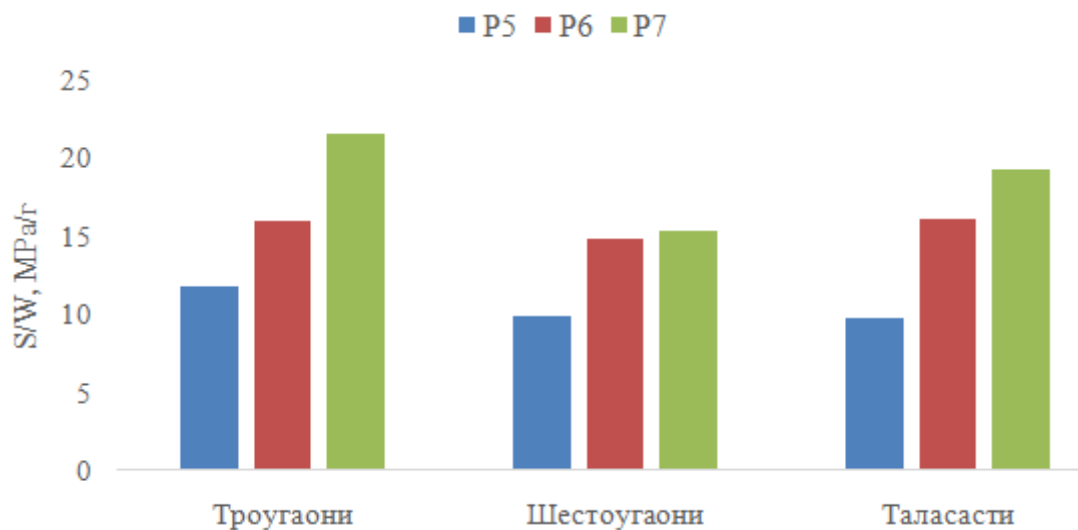
Резултати су показали да повећањем густине испуне код свих облика испуне долази до повећања напона. Графички приказ резултата добијених тестом притискивања дат је на слици 5.50.



Слика 5.50 Вредност напона у зависности од облика и густине испуне

Као и у претходном разматрању резултата погодна је анализирати однос жељене карактеристике и масе узорка при извођењу закључка о рационалном коришћењу материјала. Однос вредности притисног напона и масе приказан је на слици 5.51 и у табели 5.39. На основу резултата закључује се да је вредност односа S/W највећи за троугаону испуну и резултати су потврђени за све три вредности густине испуне осим у

једном случају $P6$. Најмања вредност је, као и за вредност затезне чврстоће забележена за шестоугаону испуну.



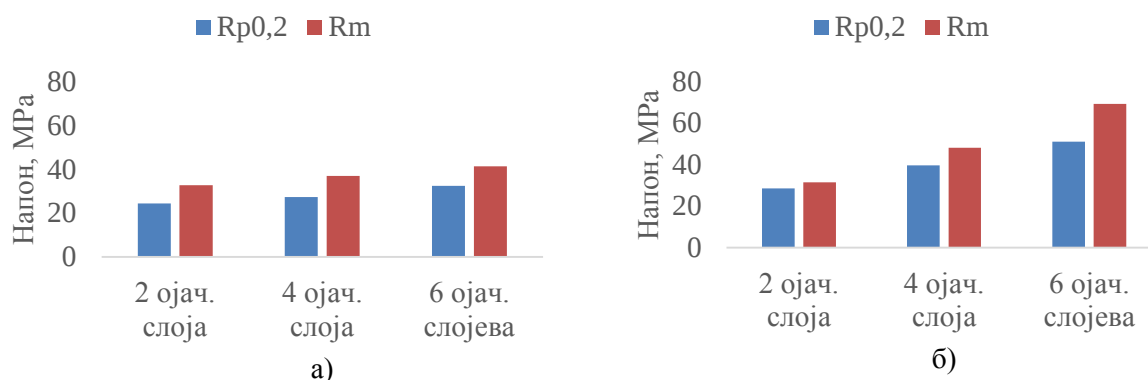
Слика 5.51 Вредност односа S/W у зависности од облика и густине испуне

Табела 5.39 Однос S/W за карактеристике материјала Оникс добијене притискивањем

Облик испуне	Однос S/W - P5, MPa/г	Однос S/W - P6, MPa/г	Однос S/W - P7, MPa/г
Треугаони	11,74	16,04	21,62
Шестоугаони	9,96	14,78	15,36
Таласаста	9,83	16,15	19,35

5.7.3 Анализа резултата експеримента М3

Упоредни приказ резултата за напон на граници течења и затезну чврстоћу дат је на слици 5.52. На слици 5.52 под а) приказани су резултати када су коришћена два концентрична прстена ојачања а под б) када су коришћена четири концентрична прстена ојачања.



Слика 5.52 Приказ средњих вредности напона (R_p , R_m) у зависности од броја ојачаних слојева: а) са два концентрична прстена и б) са четири концентрична прстена

Резултати експеримента М3 објављени су у раду [Delić, 2023]. У оба случаја повећањем броја ојачаних слојева долази до повећања напона на граници течења и

затезне чврстоће. Исти закључак је изведен и за број концентричних прстенова ојачања. Када су ојачана само два слоја вредности напона су приближно исте без обзира на број концентричних прстенова ојачања. Код већег броја ојачаних слојева, 4 и 6, значајно су веће вредности механичких карактеристика за случај са четири концентрична слоја ојачања.

5.7.4 Закључци анализе

На основу резултата експеримената изведени су коначни закључци о утицају који разматрани параметри процеса имају на механичке карактеристике полимера адитивно третираних адитивном производњом. Сумирани резултати експеримента M1 приказани су у табели 5.40.

Табела 5.40 Резултати експеримента M1 – материјал ABS

Разматрани параметар	Материјал: ABS (M1)	
	Затезање (затезна чврстоћа)	Притискивање (притисни напон)
Угао штампања	- највећа вредност затезне чврстоће за угао U_4 (45° - 45°) - мала разлика, за 5% већа вредност у односу на U_3 - за 10 % већа вредност у односу на U_1	- није разматран
Положај штампања	-није разматран (само положај O1)	- већа вредност притисног напона за положај O2
Облик испуне	- бољи резултати постигнути са квадратном него са шестоугаоном испуном - однос S/W бољи за квадратни облик испуне	- бољи резултати постигнути са квадратном него са шестоугаоном испуном - однос S/W бољи за квадратни облик испуне
Густина испуне	- већим вредностима густине испуне одговара већа вредност затезне чврстоће	- повећањем густине испуне повећава се вредност оствареног напона оба облика испуне осим у случају густине испуне од 10% када је вредност иста
Брзина штампања	- мали утицај, разлика је неколико процената	- мали утицај - код дебљине слоја S_1 (0,1 mm) веће вредности постигнуте су за 90 mm/s - код дебљине слоја S_2 (0,2 mm) брзина штампања нема утицај
Дебљина слоја	- највећа вредност R_m за дебљину слоја 0,1 mm - мали утицај, разлика у односу на веће дебљине штампања око 5%	- за дебљину S_1 (0,1 mm) већа вредност напона - мали утицај

У табели 5.40 заправо је приказан утицај параметара адитивне производње на механичке карактеристике узорака, тачније на затезну чврстоћу, док су настале деформације и напон на граници течења изостављени. Ово је урађено зато што су резултати експеримента показали да је ABS веома крт материјал и настале деформације

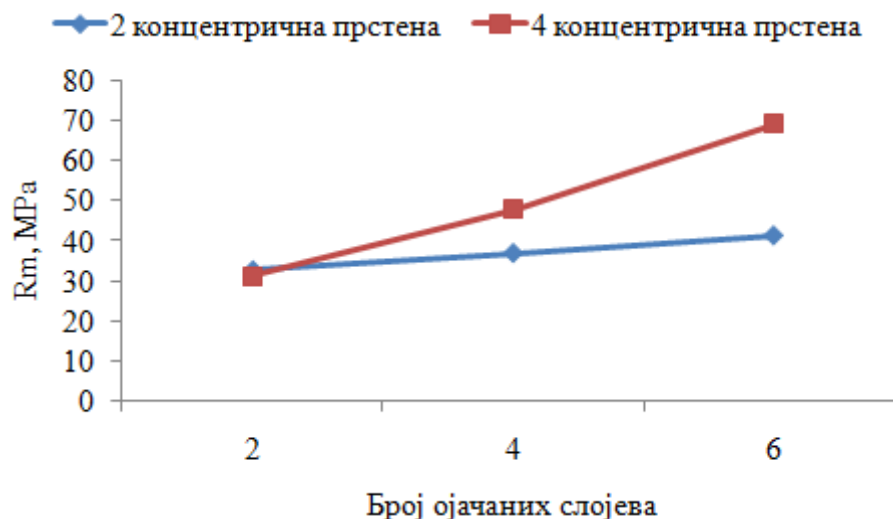
су веома мале па је због тога вредност напона на граници течења незнатно мања од затезне чврстоће, тј. деформабилност је мала.

У другом делу експеримената (М2) је испитиван материјал Оникс који је показао знатно већу еластичност. Сумирани резултати експеримената, односно утицаји параметара на механичке карактеристике приказани су у табели 5.41.

Табела 5.41 Резултати експеримента М2 – материјал Оникс

Разматрани параметар	Материјал: Оникс (М2)	
	Затезање	Притискивање
Угао штампања	- најповољнији угао штампања је $U1 (0^\circ/90^\circ)$ - мали утицај, око 7%	- није разматран
Облик испуне	- најповољнији квадратни облик, затим следе шестоугаони и таласасти и на крају троугаони	- најповољнији троугаони облик, следе таласасти и шестоугаони
Густина испуне	- повећањем густине испуне повећава се вредност R_m - однос S/W сличан за све облике	- повећањем густине испуне повећава се вредност напона - однос S/W најповољнији за троугаони облик испуне, следе таласасти и шестоугаони

Експеримент М3 у којем је коришћен материјал Оникс ојачан стакленим влакнима показао је значајан утицај ојачања на механичке карактеристике. Утицај броја ојачаних слојева и концентричних прстенова ојачања приказан је на слици 5.53.



Слика 5.53 Утицај удела ојачавајућих стаклених влакана на механичке карактеристике Оникса [Delić, 2023]

Поређења ради, узорак са идентичном структуром израђен од Оникса има вредност затезне чврстоће 17,66 МПа док је ојачањем са четири прстена и шест слојева могуће постићи вредност затезне чврстоће од скоро 70 МПа.

5.7.5 Статистичка анализа резултата

Анализа резултата приказана у претходном одељку спроведена је коришћењем стандардне методе тј. осредњавањем резултата за одређени параметар. Да би статистички био одређен утицај параметара односно који параметри имају већи значај од других потребно је применити неку специјализовану статистичку методу.

За статистичку анализу резултата коришћена је Тагучијева метода. За сваки експеримент израчунат је однос сигнал - бука (S/N). Овај однос је логаритамска функција излаза, служи као објекат функције за оптимизацију, а задатак му је да помогне у анализи података и предвиђању оптималних резултата [Делић, 2014]. Постоје три форме односа (S/N) за оптимизацију проблема:

1. „Мање боље“

Рачуна се по обрасцу:

$$S/N = -10\log_{10}[\text{средња вредност суме квадрата измерених вредности}].$$

Користи се код рачунања неких губитака или дефеката где је жељена идеална вредност нула (нпр. анализа хабања итд.).

2. „Веће боље“

Рачуна се по обрасцу:

$$S/N = -10\log_{10}[\text{средња вредност суме квадрата реципрочних вредности}].$$

Користи се у случајевима када се тежи максималној вредности (на пример повећању производње). Обично се преводи на „мање боље“ узимањем реципрочних вредности измерених величина.

3. „Номинално најбоље“

Рачуна се по обрасцу:

$$S/N = -10\log_{10} \left[\frac{\text{квадрат средњ е вредности}}{\text{одступање}} \right].$$

Пошто је закључено да су највеће вредности механичких карактеристика постигнуте са пуним узорцима биће анализиран утицај два параметра која су у експерименту варирана, угла штампања и дебљине слоја.

Примењен је план експеримента Л9, са два утицајна фактора по три нивоа вредности. План и добијени резултати приказани су у табели 5.42. У програму *Minitab 18* је израчунат однос сигнал – бука (S/N) за сваки експеримент према приказаним обрасцима. С обзиром да се разматра утицај процесних параметара на вредност затезне чврстоће изабрана је опција „веће боље“.

Средње вредности односа S/N по нивоима за сваки фактор преузете из софтвера *Minitab* приказане су у табели 5.42. Вредност фактора се рачуна као аритметичка средина, на пример, за фактор U и ниво 1 рачуна се према обрасцу:

$$U_1 = \frac{31,4085 + 31,0388 + 30,9185}{3} = 31,1219.$$

Табела 5.42 План експеримента и резултати односа S/N

Експеримент	U	S	Rm, МПа	S/N
1	U1(0°/90°)	S1(0,1 mm)	37,19	31,4085
2	U1(0°/90°)	S2(0,2 mm)	35,64	31,0388
3	U1(0°/90°)	S3(0,3 mm)	35,15	30,9185
4	U3(30°/60°)	S1(0,1 mm)	39,35	31,8989
5	U3(30°/60°)	S2(0,2 mm)	36,78	31,3122
6	U3(30°/60°)	S3(0,3 mm)	38,55	31,7205
7	U4(45°/-45°)	S1(0,1 mm)	40,38	32,1233
8	U4(45°/-45°)	S2(0,2 mm)	38,98	31,8168
9	U4(45°/-45°)	S3(0,3 mm)	38,92	31,8035

Вредност делта (*Delta*) се рачуна као разлика највеће и најмање вредности односа S/N по нивоу једног фактора (табела 5.43). Ранг представља редни број фактора по утицајности, фактор са највећим утицајем имаће ранг 1. Резултати су показали да фактор U има већи утицај него фактор S , односно да угао штампања има већи утицај него дебљина слоја. Најповољнији угао је $U4$ а дебљина слоја $S1$ што се поклапа са анализом приказаном у претходном одељку. Вредности S/N односа у зависности од интеракције вредности приказан је на слици 5.54.

Табела 5.43 Одзив S/N по факторима и нивоима

Ниво	Фактор U	Фактор S
1	31,12	31,81
2	31,64	31,39
3	31,91	31,48
Делта	0,79	0,42
Ранг	1	2

Статистичка обрада података омогућава да утицај фактора изразимо процентуално. Помоћу анализе одступања *ANOVA* могуће је анализирати резултате. Средња вредност односа S/N се рачуна по обрасцу:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S/N)_i,$$

где је n број експеримената. Израчуната средња вредност је **$m=31,56$** .

Сума квадрата за фактор U се рачуна по обрасцу:

$$\begin{aligned} \text{СК} = & [(\text{бр. експеримената за фактор } U1) \times (m_{U1} - m)^2] + \\ & [(\text{бр. експеримената за фактор } U2) \times (m_{U2} - m)^2] + \\ & [(\text{бр. експеримената за фактор } U3) \times (m_{U3} - m)^2] = \\ & [3 \times (31,12 - 31,56)^2] + [3 \times (31,64 - 31,56)^2] + [3 \times (31,91 - 31,56)^2] = \mathbf{0,967507}. \end{aligned}$$

Сума квадрата за фактор S се рачуна по обрасцу:

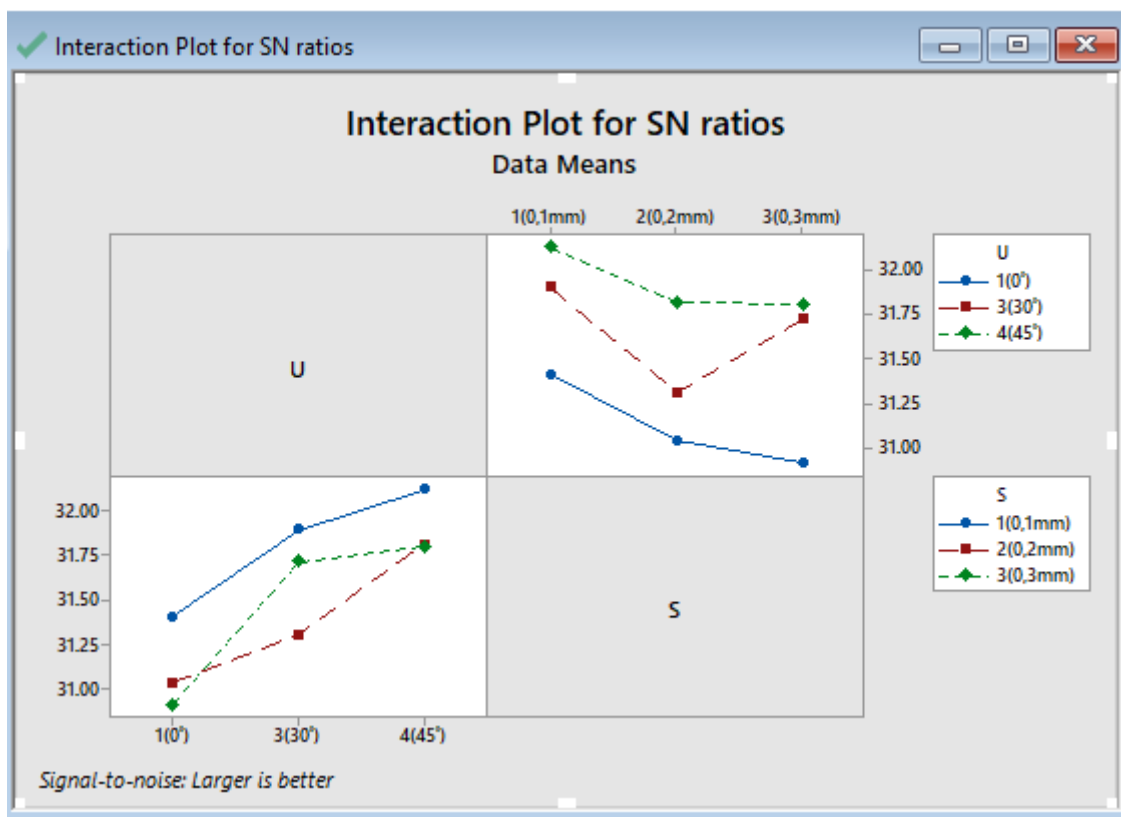
$$\begin{aligned} \text{СК} = & [(\text{бр. експеримената за фактор } S1) \times (m_{S1} - m)^2] + \\ & [(\text{бр. експеримената за фактор } S2) \times (m_{S2} - m)^2] + \end{aligned}$$

$$[(\text{бр. експеримената за фактор } S3) \times (m_{S3} - m)^2] =$$

$$[3 \times (31,81 - 31,56)^2] + [3 \times (31,39 - 31,56)^2] + [3 \times (31,48 - 31,56)^2] = \mathbf{0,2934}.$$

Укупна вредност суме квадрата је израчуната према обрасцу:

$$SS = \sum_{i=1}^n ((S/N)_i - m)^2 = 1,3506.$$



Слика 5.54 Интерактивни приказ вредности одзива S/N из софтвера Minitab

Утицај сваког фактора $P(\%)$ се рачуна као количник суме квадрата за дати фактор и укупне суме квадрата помножен са 100. Проценат утицаја се користи да истакне важност неког фактора.

Утицаји фактора једнаки су:

- Утицај угла штампања = $0,967507 / 1,3506 \cdot 100 = 71,63 \%$.
- Утицај дебљине слоја = $0,2934 / 1,3506 \cdot 100 = 21,72 \%$.

Закључак статистичке анализе коришћењем Тагучијеве методе је да угао штампања има значајно већи утицај него дебљина слоја.

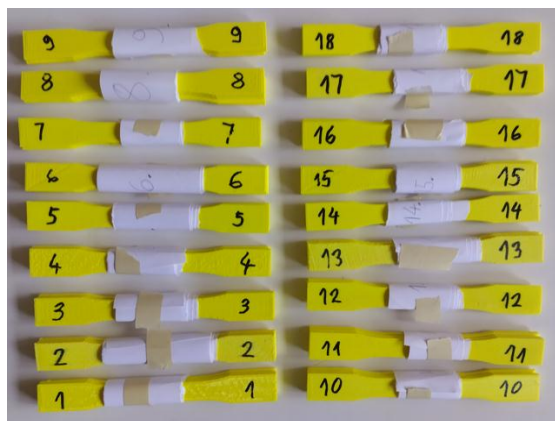
Пошто је у експерименту М1 утврђено да при истој густини испуне квадратни облик има боље механичке карактеристике него шестоугаони односно бољи однос S/W (затезна чврстоћа / маса) интересантно је направити експеримент помоћу Тагучијевих матрица и утврдити при изради делова са различитим облицима испуне колики утицај имају угао штампања, дебљина слоја, облик и густина испуне. После израде сваког узорка извршено је означавање и мерење узорака (карактеристичне геометријске мере и

маса). Израђени узорци приказани су на слици 5.55. План експеримента и резултати дати су у табели 5.44.

Табела 5.44 Резултати експеримената

Експ. бр.	I	A	T	D	R _m , МПа	S/N
1	Квадратни	0°/90°	0,1 mm	10%	24,00	27,6042
2	Квадратни	0°/90°	0,2 mm	40%	22,97	27,2232
3	Квадратни	0°/90°	0,3 mm	70%	27,53	28,7961
4	Квадратни	30°/60°	0,1 mm	10%	24,86	27,9100
5	Квадратни	30°/60°	0,2 mm	40%	23,14	27,2873
6	Квадратни	30°/60°	0,3 mm	70%	28,35	29,0511
7	Квадратни	45°/-45°	0,1 mm	40%	27,04	28,6401
8	Квадратни	45°/-45°	0,2 mm	70%	26,99	28,6241
9	Квадратни	45°/-45°	0,3 mm	10%	15,95	24,0552
10	Шестоугаони	0°/90°	0,1 mm	70%	27,88	28,9059
11	Шестоугаони	0°/90°	0,2 mm	10%	19,01	25,5796
12	Шестоугаони	0°/90°	0,3 mm	40%	20,21	26,1113
13	Шестоугаони	30°/60°	0,1 mm	40%	22,66	27,1052
14	Шестоугаони	30°/60°	0,2 mm	70%	24,51	27,7869
15	Шестоугаони	30°/60°	0,3 mm	10%	17,82	25,0182
16	Шестоугаони	45°/-45°	0,1 mm	70%	23,92	27,5752
17	Шестоугаони	45°/-45°	0,2 mm	10%	21,15	26,5062
18	Шестоугаони	45°/-45°	0,3 mm	40%	18,01	25,1103

Резултати приказани у табели 5.44 добијени су, као у претходном случају, коришћењем софтверског пакета *Minitab 18* коришћењем одзива “веће боље”. Због тога што је *ABS* веома крт материјал неће бити разматрано настало издужење као и напон на граници течења јер је вредност веома блиска затезној чврстоћи. На основу вредности одзива анализиран је утицај појединачних фактора на вредност затезне чврстоће. Резултати анализе приказани су у табели 5.45. У табели су приказане и средње вредности разматране карактеристике, затезне чврстоће, за сваки фактор и ниво посебно (*Response table for means*).



а)



б)

Слика 5.55 Припремљени узорци: а) цела серија б) означени узорци исте серије

Табела 5.45 Резултати анализе утицајности фактора

Ниво		I	U	S	P
1	S/N	27,69	27,37	27,96	26,11
	Средња вр.	24,54	23,6	25,06	20,47
2	S/N	26,63	27,36	27,17	26,91
	Средња вр.	21,69	23,56	22,96	22,34
3	S/N	/	26,75	26,36	28,46
	Средња вр.		22,18	21,31	26,53
Делта	S/N	1,05	0,62	1,60	2,34
	Средња вр.	2,85	1,42	3,75	6,06
Ранг		3	4	2	1

За сваки фактор и ниво наведене су вредности одзива S/N и затезне чврстоће. На основу резултата направљено је рангирање утицајности фактора. Резултати статистичке анализе су показали да у случају коришћења различитих облика испуне највећи утицај има густина испуне, затим следе дебљина слоја, врста облика испуне и угла штампања.

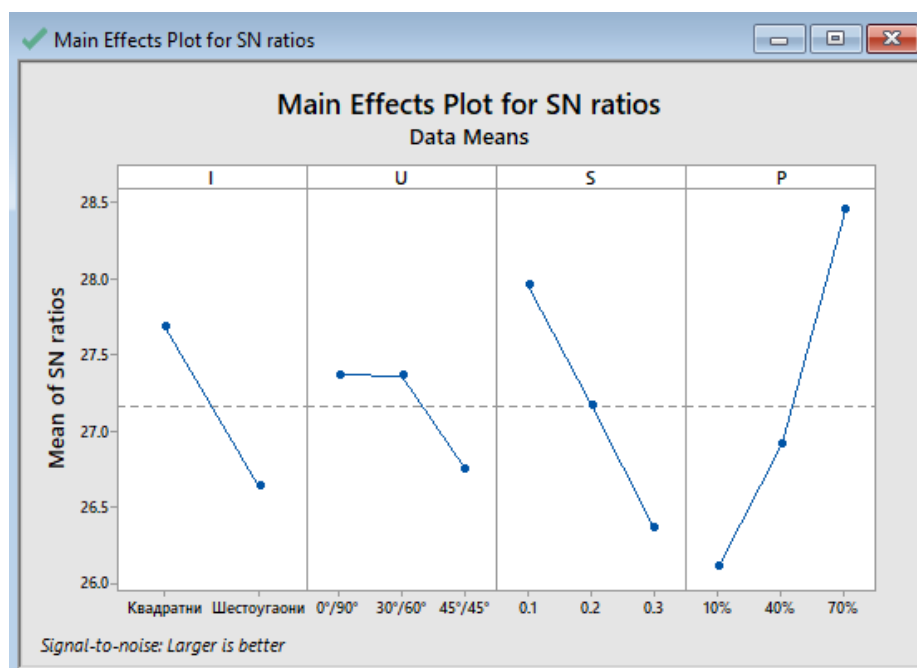
Густина испуне има највећи утицај и на основу резултата приказаних у табели види се да је разлика вредности затезне чврстоће постигнуте при максималној и минималној вредности фактора скоро 30%. Ови резултати се у потпуности поклапају са претходним резултатима који су показали да повећање густине испуне код свих облика испуне доводи до повећања вредности затезне чврстоће.

Утицај дебљине слоја штампања је исти као код пуних узорака, мањим вредностима дебљине слоја одговарају веће вредности затезне чврстоће. Утицај дебљине слоја је нешто већи код узорака штампаних са неким обликом испуне него код пуних узорака. Објашњење за овакав утицај налази се у томе да при штампању пуних узорака долази до јачих веза између слојева јер је узорак у потпуности испуњен па се утицај дебљине слоја смањује.

Квадратна испуна је повољнија за добијање већих вредности механичких карактеристика него шестоугаона. И овај закључак се поклапа са претходним резултатима.

Најмањи утицај има угао штампања што је и било очекивано. Код потпуно испуњених узорака овај параметар има већи утицај јер правац влакана одређује јачину везе између слојева. У случају узорака израђених са неким обликом испуне путања штампања у координатном систему везаном за део је иста без обзира како је део оријентисан а све евентуалне грешке биле би последица неуједначеног рада 3D штампача.

Графички приказ резултата за однос S/N као и интерактивни приказ спрегнутих утицаја приказан је на сликама 5.56 и 5.57.



Слика 5.56 Вредности S/N одзива у зависности од фактора и нивоа



Слика 5.57 Вредности S/N одзива приказане са интерактивним утицајем параметара

6. Експериментално-нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања лима за процену еластичне повратности

Експериментално-нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања лима има за циљ утврђивање оптималних услова процеса, укључујући валидацију пројектног решења алата, како би се у условима савијања без калибрисања, при релативно малој деформационој сили, добили делови од лима са углом савијања од 90°. При малим деформационим силама неизоставна је појава еластичног исправљања лима, па се серијом нумеричких експеримената може одредити угао компензације алата, конкретно матрице и обликача, како би се након престанка дејства силе и еластичне повратности добио жељени угао савијања. За валидацију нумеричког модела процеса неопходно је било спровести експерименте на металним алатима, и прецизно утврдити улазне параметре нумеричке симулације, до остваривања високе подударности физичког и нумеричког модела процеса. С тим у вези, неопходно је било испитати карактеристике лима од челика *DC04* и одредити криву течења, за успостављање конститутивних релација у МКЕ моделу и реалну процену понашања материјала, како при једноугаоном савијању, тако и након растерећења, односно при еластичној повратности лима. За прецизно мерење угла савијања лима у експериментима примењено је оптичко 3D скенирање делова, а добијени облак тачака је коришћен за упоређење са нумеричким моделом савијеног лима.

6.1 Испитивање карактеристика материјала лима тестом затезања и одређивање криве течења

Да би резултати нумеричких симулација процеса једноугаоног савијања лима били прецизни потребно је одредити криве течења материјала. Одређена је крива течења материјала *DC04* (Č0148), док је крива течења за материјал Č1730 од кога је израђен алат преузета из базе података о материјалима у софтверу *Simufact.forming*. Димензије узорка су одређене стандардом *ISO 6892-1*, цртеж је приказан на слици 6.1 а). Узорци су припремљени сечењем на ласеру и приказани су на слици 6.1 б) и в).

Експерименти су изведени на машини за испитивање материјала произвођача *SHIMADZU* која се налази у Лабораторији за композитне материјале и инжењерски софтвер Факултета инжењерских наука. Машина има пнеуматске стезне чељусти и за прецизно мерење насталих деформација користи екстензометар са мерном дужином 50 mm. Уређај *Shimadzu* и изглед припремљене епрувете приказани су на слици 6.2.

Брзина затезања одређена је према препорукама које су дате у стандарду *ISO 6892-1*:

$$V_c = L_c \cdot \dot{e}_{L_c} \quad 6.1$$

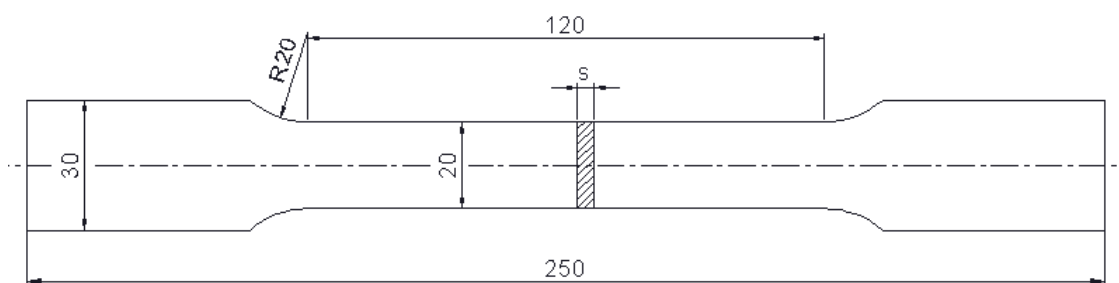
$$L_c = 120mm; \quad 6.2$$

$$\dot{e}_{L_c} = 0,00025 \frac{mm}{s}; \quad 6.3$$

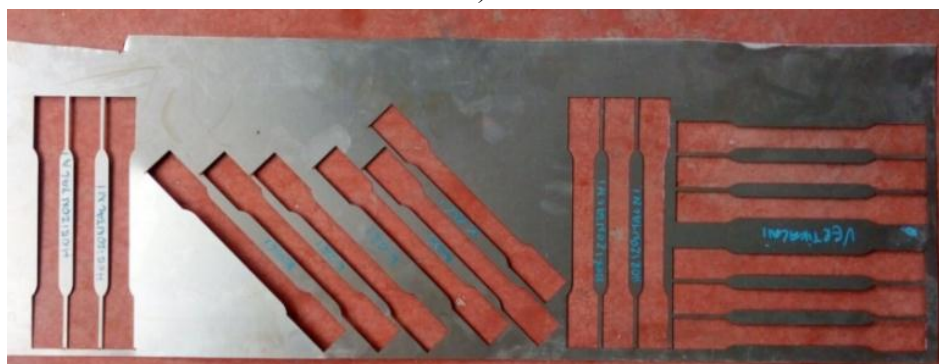
$$V_c = 120 \cdot 0,00025 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{s}}; \quad 6.4$$

$$V_c = 0,03 \cdot 60 = 1,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}; \quad 6.5$$

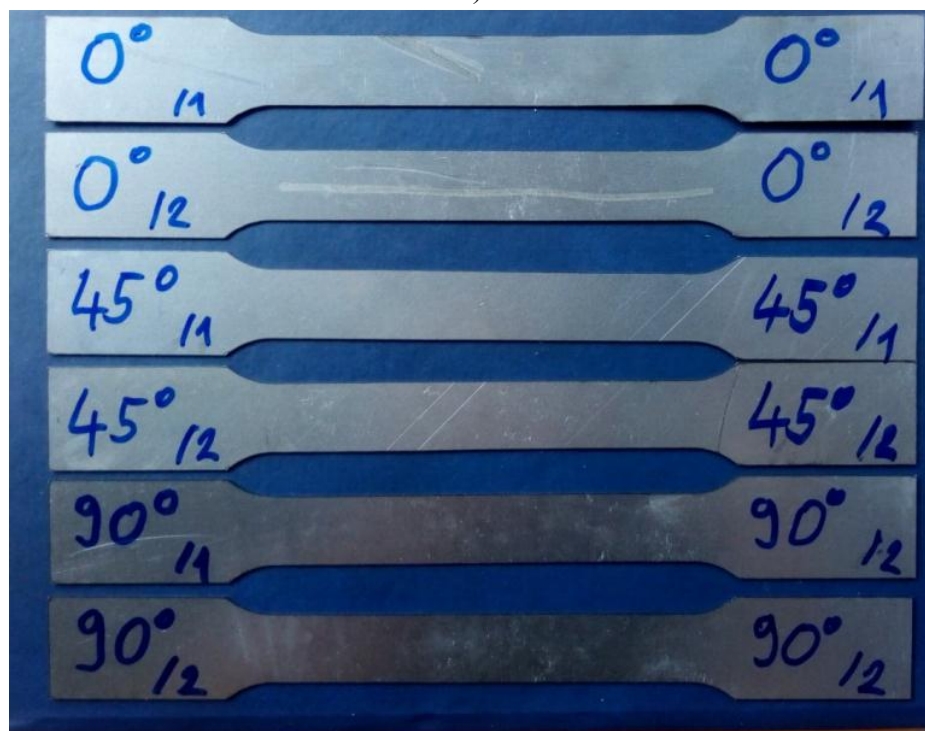
и усвојено је $V_c = 2 \text{ mm/min}$



a)

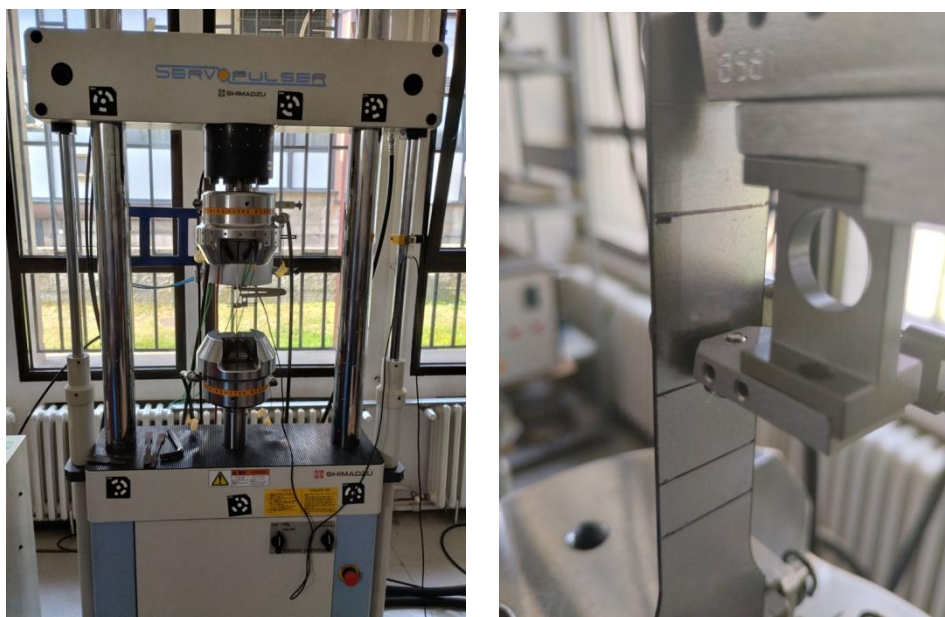


б)



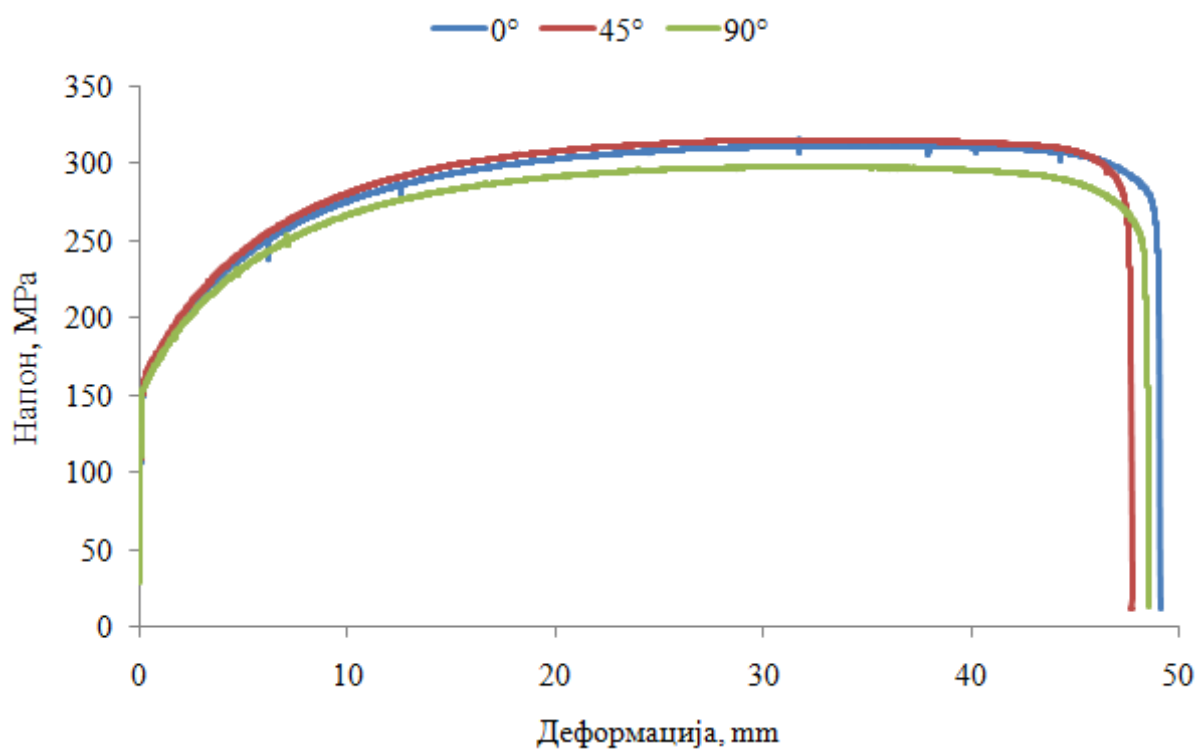
в)

Слика 6.1 Узорак од лима: а) цртеж узорка б) правци исецања узорака и в) узорци спремни за испитивање



Слика 6.2 Машина за испитивање (лево) и узорак са екстензометром (десно)

Резултати испитивања материјала *DC04* (Č0148) тестом једноосног затезања приказани су на слици 6.3.



Слика 6.3 Дијаграми затезања за челик *DC04* (Č0148)

Резултати испитивања челика *DC04* приказани су у табели 6.1. Највећа вредност напона на граници течења добијена је за узорак који исечен у правцу ваљања док су вредности затезне чврстоће исте у случају узорака исечених под углом 0° и 45° а најмање за узорак исечен под углом 90° .

Табела 6.1 Резултати испитивања затезањем узорка од челика DC04 (Č0148)

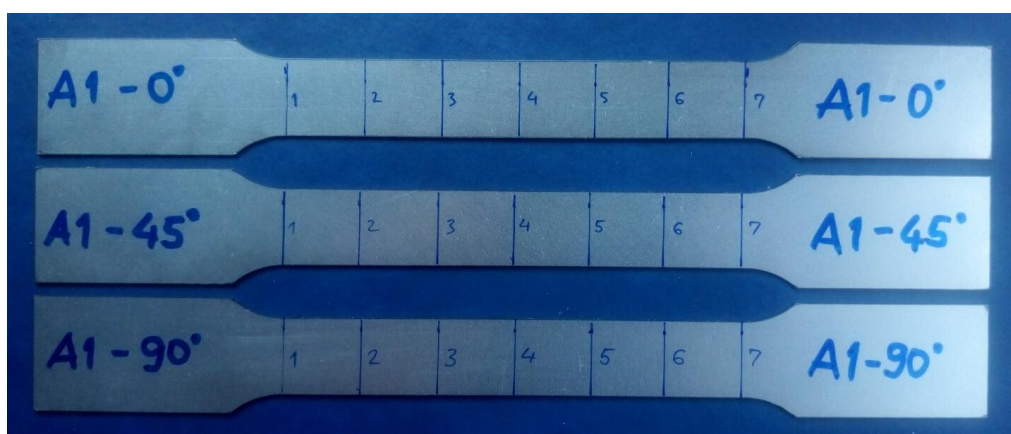
Р.бр.	Угао	R _p , МПа	R _m , МПа	ε, %
1	0°	134	285	40,91
2	45°	127	285	39,78
3	90°	123	268	40,45

За челични лим од материјала DC04 одређен је коефицијент нормалне анизотропије (r фактор). Анизотропија представља неуједначеност особина и карактеристика материјала у зависности од правца. Према стандарду, припремљена су три узорка у правцима 0°, 45° и 90° у односу на правац ваљања и обележено је седам мерних места (слика 6.4). Узорци су испитани тестом једноосног затезања.

Вредност коефицијента нормалне анизотропије се одређује коришћењем обрасца:

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{l_0}{l}}, \quad 6.6$$

где су b_0 и l_0 почетне вредности ширине и дужине мерног дела епрувете, а b и l ширине и дужине после теста затезања. Резултати мерења приказани су у табели 6.2.

Слика 6.4 Узорци припремљени за одређивање r фактораТабела 6.2 Резултати мерења узорка за одређивање r фактора

Димензија/правац	0°	45°	90°
l_0	119,3mm	120mm	119,7mm
b_0	20,1mm	19,94mm	19,96mm
l_1	144,7mm	145,3mm	144,5mm
b_1	18,42mm	18,65mm	17,42mm
b_2	17,56mm	17,85mm	17,39mm
b_3	17,53mm	17,73mm	17,30mm
b_4	17,58mm	17,66mm	17,26mm
b_5	17,73mm	17,77mm	17,33mm
b_6	17,87mm	17,95mm	17,47mm
b_7	18,5mm	18,51mm	18,35mm
b_{sr}	17,88mm	18,02mm	17,50
r	1,54	1,13	2,31

Вредност коефицијента се одређује као средња вредност за сва три правца

$$r = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{1,54 + 1,13 + 2,31}{3} = 1,66. \quad 6.7$$

На основу резултата испитивања материјала једноосним затезањем одређене су криве течења материјала које ће бити интегрисане у софтвер за симулацију процеса обраде *Simufact.forming*.

Криве течења представљају графичку зависност деформационог отпора од одређеног показатеља деформације. Показатељи деформације који се најчешће користе су релативна деформација, контракција (сужење) попречног пресека и природна логаритамска деформација. Релативна и природна логаритамска деформација се користе када се обрађују резултати добијени тестом једноосног затезања а контракција попречног пресека када је материјал испитан тестом једноосног притискивања. Вредности наведених показатеља деформације израчунавају се према обрасцима:

- релативна деформација - $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$;
- контракција попречног пресека - $\psi = \frac{A_0-A}{A_0}$;
- природна логаритамска деформација - $\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$;

где су:

A – површина попречног пресека у посматраном тренутку,

A_0 - почетна површина попречног пресека.

У зависности од коришћеног показатеља деформације разликујемо криве првог (ε), другог (ψ) и трећег реда (φ). Деформациони отпор у подручју хомогеног деформисања једнак је [Девецић, 1975]:

$$K = \sigma = \frac{F}{A} = \frac{Fl}{A_0 l_0} = \frac{F(l_0 + \Delta l)}{A_0 l_0} = \frac{F}{A_0} e^{\varphi} = \sigma_t e^{\varphi} = \frac{F}{A_0(1 - \psi)} = \sigma_t(1 + \varepsilon). \quad 6.8$$

За употребу у софтверима који раде са коначним елементима пожељно је користити аналитичке апроксимације кривих ојачања. У литератури постоје различити облици кривих ојачања [Девецић, 1975]:

$$K = C \varphi^n, \quad 6.9$$

$$K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M}\right)^n, \quad 6.10$$

$$K = R_p + C_1 \varphi^{n_1}. \quad 6.11$$

Већина софтвера па и софтвер који је коришћен у овом раду, *Simufact.forming*, користе прву и трећу једначину. Једначина које ће бити коришћена у овом раду је $K = C \varphi^n$.

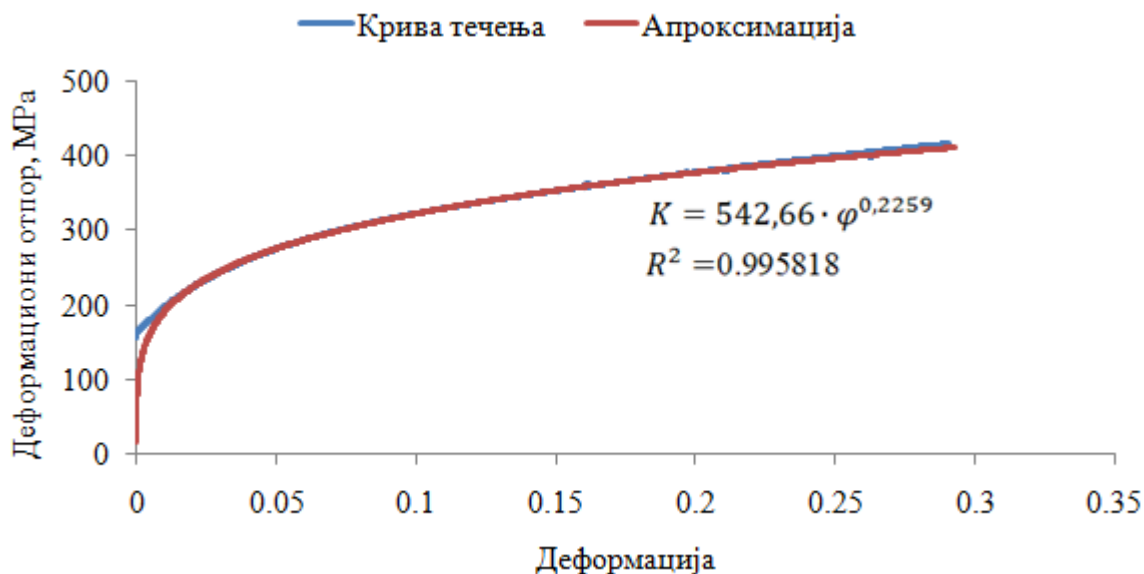
Крива течења материјала је одређена експериментално тестом затезања. Математичка формулација је добијена применом статистичке методе најмањих квадрата. За одређивање криве течења коришћени су програми *Statistica* и *Excel*. У софтвер *Excel* су увезени подаци о зависности силе од издужења у формату .TRA добијени из софтвера *Servo net* машине за испитивање *Shimadzu* и након одговарајуће обраде података добијена је крива течења. Разматрано је подручје хомогеног

пластичног деформисања између тачака Т (напон на граници течења) и М (максимална сила). Експериментално добијена крива течења и аналитичка апроксимација приказане су на слици 6.5.

Аналитичка апроксимација криве течења дефинисана је једначином:

$$K = 542,66 \cdot \varphi^{0,2259}, \quad 6.17$$

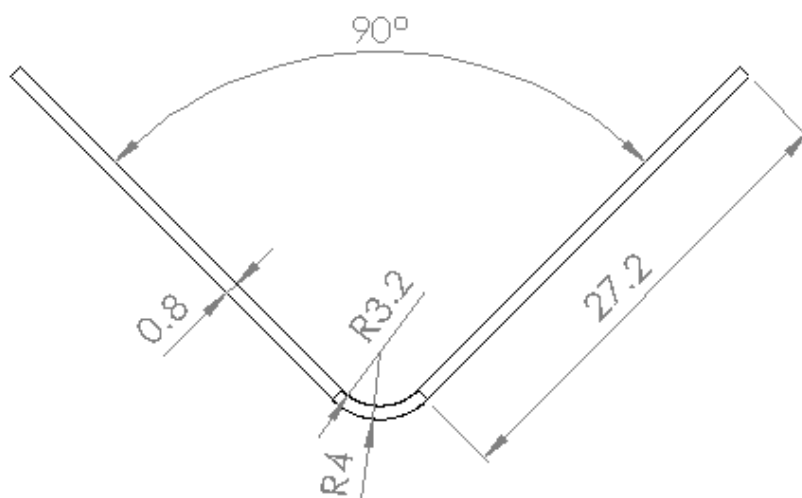
при чему је постигнут фактор корелације $R^2 = 0.995818$.



Слика 6.5 Крива течења и аналитичка апроксимација за челик DC04 (Č0148)

6.2 Модел једноугаоног савијања лима са приказом алата

Пре почетка пројектовања алата и процеса потребно је израчунати вредности минималног и максималног угла савијања. Димензије савијеног комада приказане су на слици 6.6. Прорачун вредности за разматрани материјал дат је у табели 6.3.



Слика 6.6 Димензије савијеног дела

Табела 6.3 Прорачун вредности

Материјал	DC04 (Č0148)
R_p	215 MPa
E	210000MPa
c	0,5
$r_{\min}$	$r_{\min} = c \cdot s = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4 \text{ mm}$
$r_{\max}$	$r_{\max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p} = \frac{0,8 \text{ mm} \cdot 210000 \text{ MPa}}{2 \cdot 215 \text{ MPa}} = 390,7 \text{ mm}$
Вредност полупречника савијања r_u	$0,4 \text{ mm} < r < 390,7 \text{ mm}$
Полупречник неутралне осе	$r_n = r_u + xs = 3,2 + 0,5 \cdot 0,8 = 3,6 \text{ mm}$
Прорачун развијеног стања	$L = 2 \cdot l_{\text{крака}} + l_n = 2 \cdot 27,2 + \frac{\pi \varphi}{180} r_n = 54,4 + \frac{\pi \cdot 90}{180} 3,6 = 54,4 + 5,65 = 60,05 \approx 60 \text{ mm}$

Димензије припремка су 35x60 mm. С обзиром да је спољашњи пречник 4 mm и дебљина лима 0,8 mm, вредност унутрашњег пречника је 3,2 mm. Полупречник радијуса матрице је 4 mm а полупречник обликача је вариран.

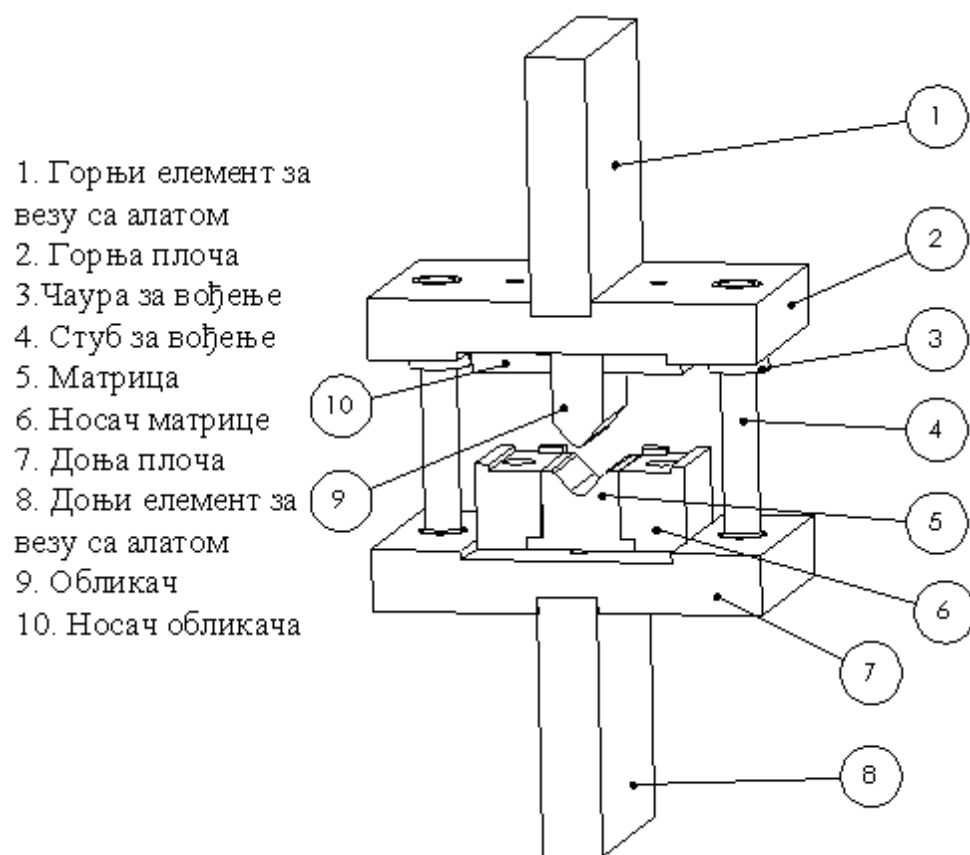
6.2.1 Конструкција алата

Циљ прве серије експеримената је утврђивање еластичне повратности лима при једноугаоном савијању, експериментално и нумерички, како би се потврдио нумерички модел процеса, за даље процене. Конструисан је алат који је могуће монтирати на универзалну машину за испитивање материјала Zwick/Roell Z100 и који омогућава правилно позиционирање лима. За извођење експеримената конструисан је мултифункционални алат чији цртеж је приказан на слици 6.7 а).

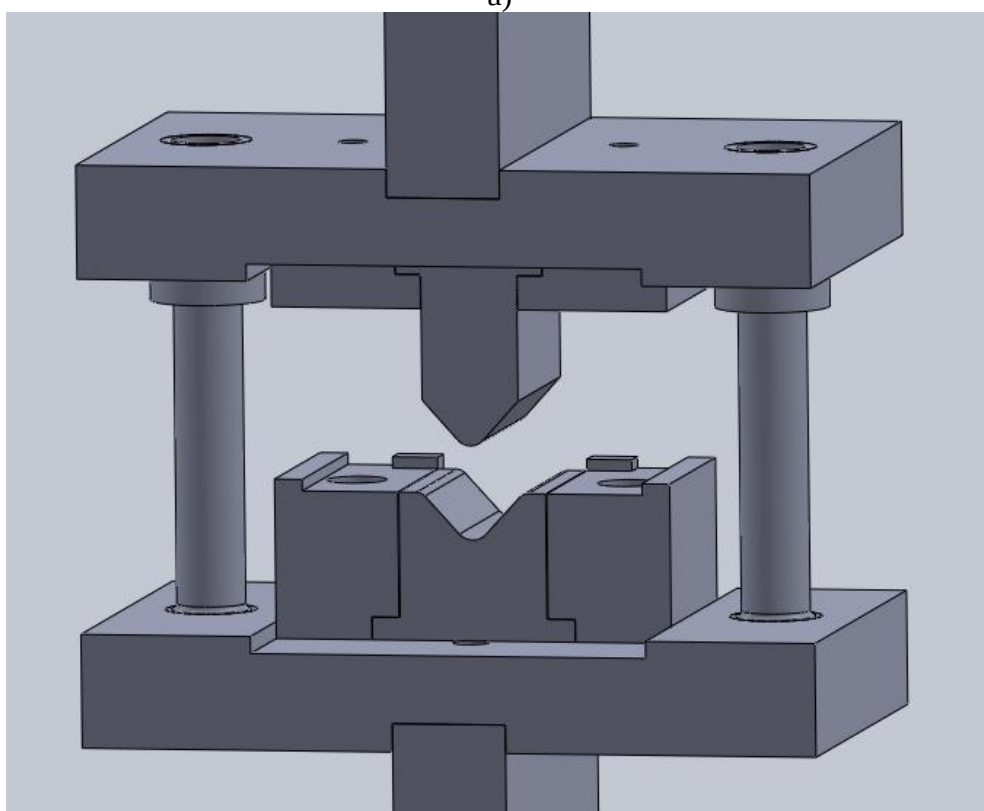
Алат има лако изменљиве радне елементе (матрица и обликач), који могу бити израђени од челика, полимера или другог материјала. Алат се састоји од горње и доње плоче, горњег и доњег елемента за везу са алатом, два носача обликача (леви и десни), два носача матрице (леви и десни), матрице и обликача. Плоче и елементи за везу са алатом су конструисани да би алат био правилно монтиран на машину за испитивање. Направљене су две плоче за стезање у чељустима машине, горња и доња, и цртеж плоче приказан је на слици 6.8.

Алат је израђен према представљеној документацији коришћењем CNC глодалице, координатне бушилице, брусиле и осталих машина. CAD модел алата је приказан на слици 6.7 б).

Алат је монтиран на машину помоћу горњег и доњег елемента за везу. Елемент за везу који је стегнут чељустима машине је димензија 80x80x20 mm. Цртеж горње и доње плоче (идентичне су) које служе за монтирање матрице и обликача приказан је на слици 6.8.



а)



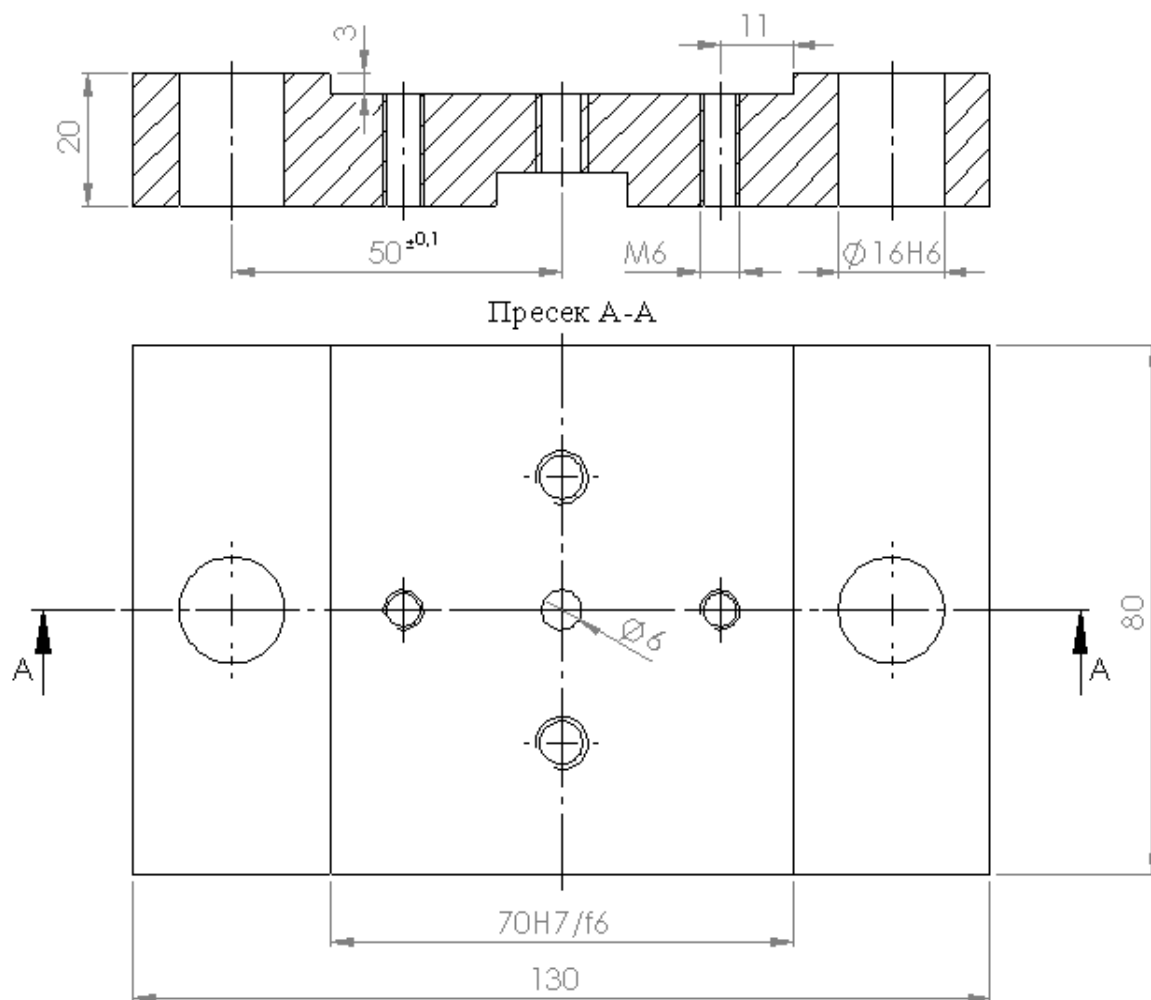
б)

Слика 6.7 Склоп алата за једноугаоно савијање: а) шема алата са набројаним позицијама и б) CAD модел алата

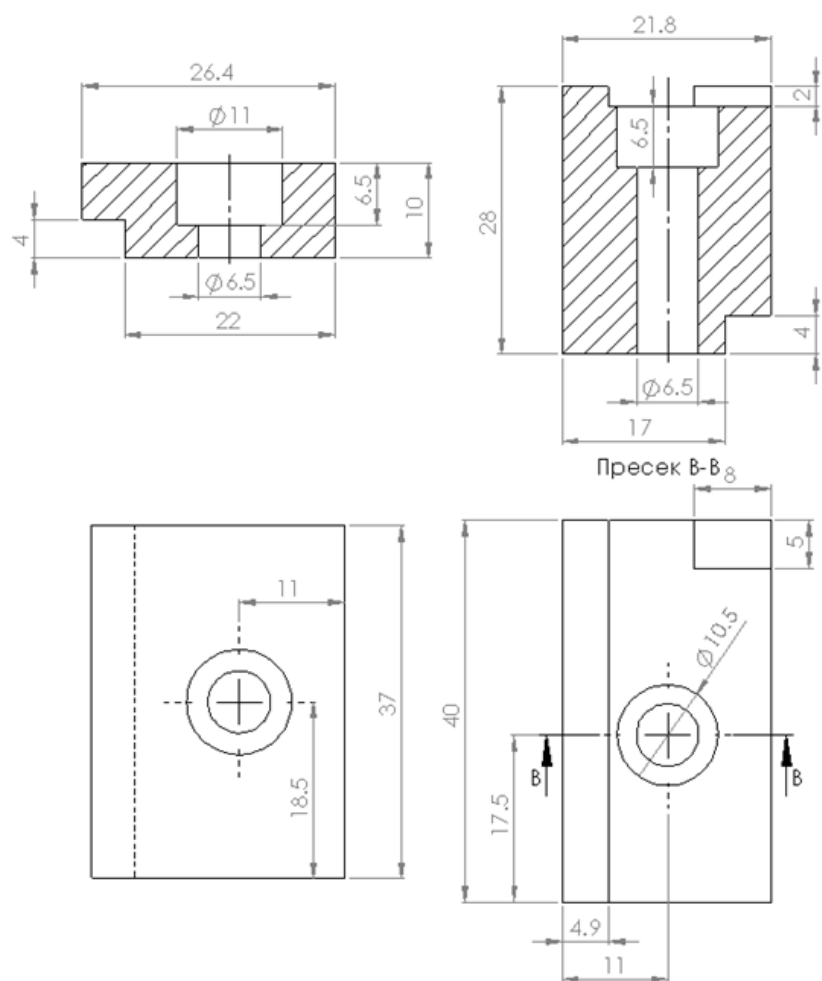
Горња и доња плоча су направљене од челика С45 (Č1530) и нису термички обрађене, с обзиром на пројектована оптерећења при савијању без калибрисања. Отвори за монтирање стубних вођица и чаура за вођење су прецизно израђени на координатној бушилици. Све површине које су у контакту са стубовима и чаурама за вођење, обликачем и матрицом су брушене због адекватне монтаже.

За правилно позиционирање обликача и матрице конструисани су носачи. Обликач се монтира помоћу два носача обликача. Носач обликача приказан је на слици 6.9. Израђен је од истог материјала као плоча, челика С45 (Č1530). Позиционирање матрице се врши помоћу два носача матрице.

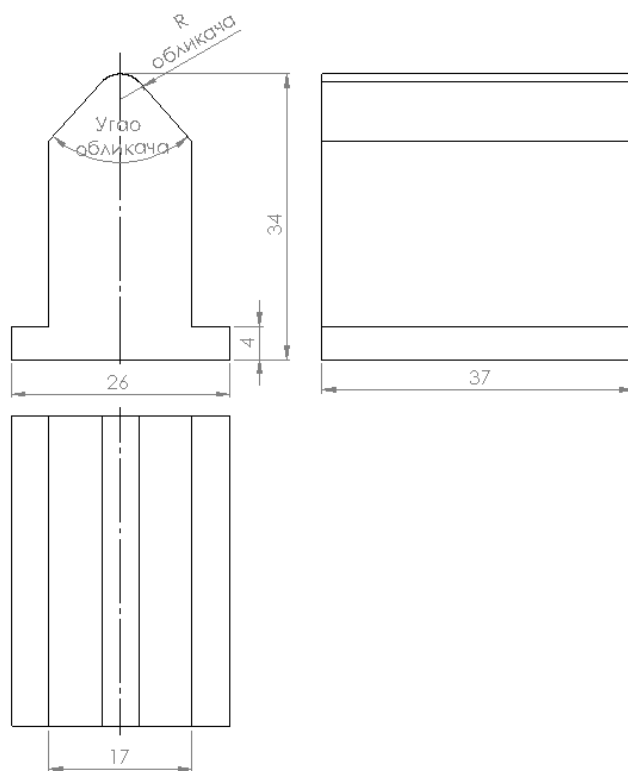
Матрица и обликач су израђени од челика за побољшање С60 (Č1730). Иако се овај челик користи за неке помоћне делове алата, јер не спада у алатне челике, због доступности и малог оптерећења алата одлучено је да се користи за израду радних елемената алата. Цртежи обликача и матрице приказани су на сликама 6.10 и 6.11. Матрица и обликач за овај експеримент израђени су са следећим параметрима: R обликача 3,2 mm, угао обликача 89° , R матрице 4 mm, угао матрице је 90° и висина h има вредност 5 mm. После анализе резултата нумеричких експеримената биће утврђене вредности угла и полупречника обликача и матрице којим се добија жељена геометрија дела од лима.



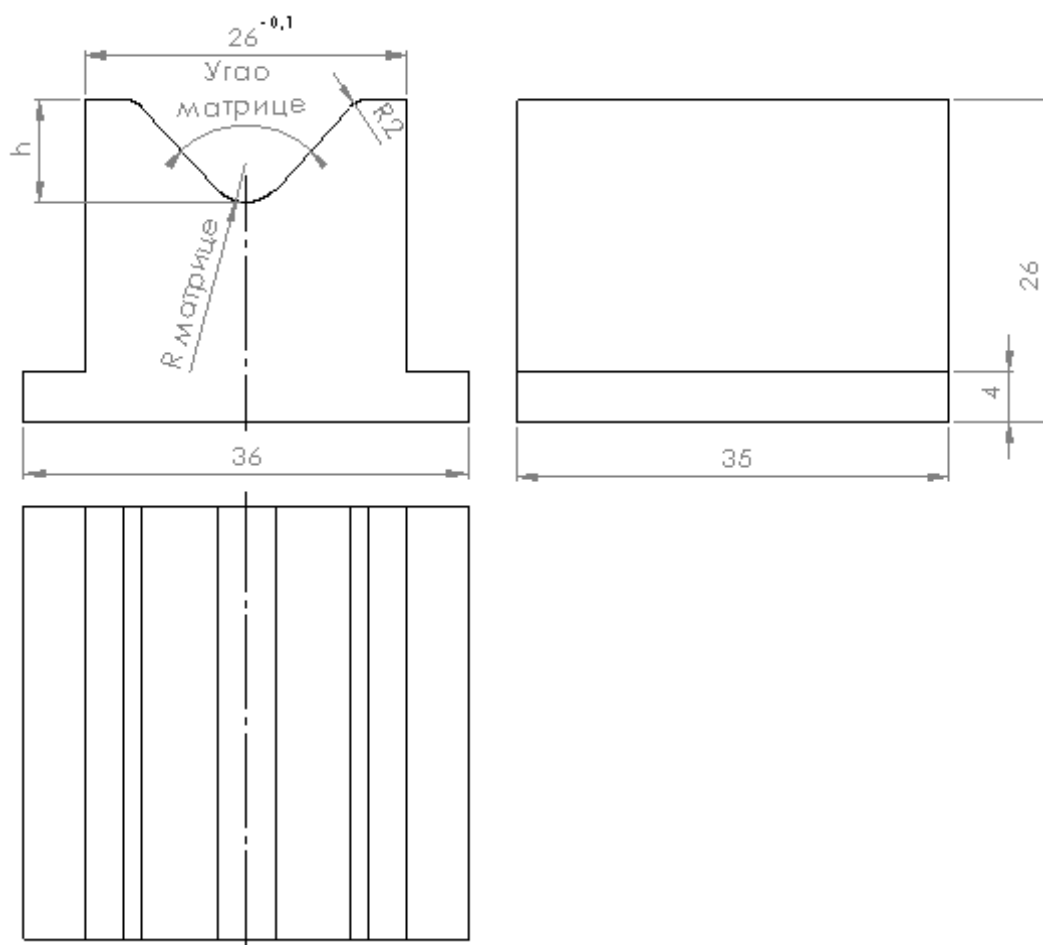
Слика 6.8 Горња и доња плоча алата



Слика 6.9 Носач обликача (лево) и носач матрице (десно)

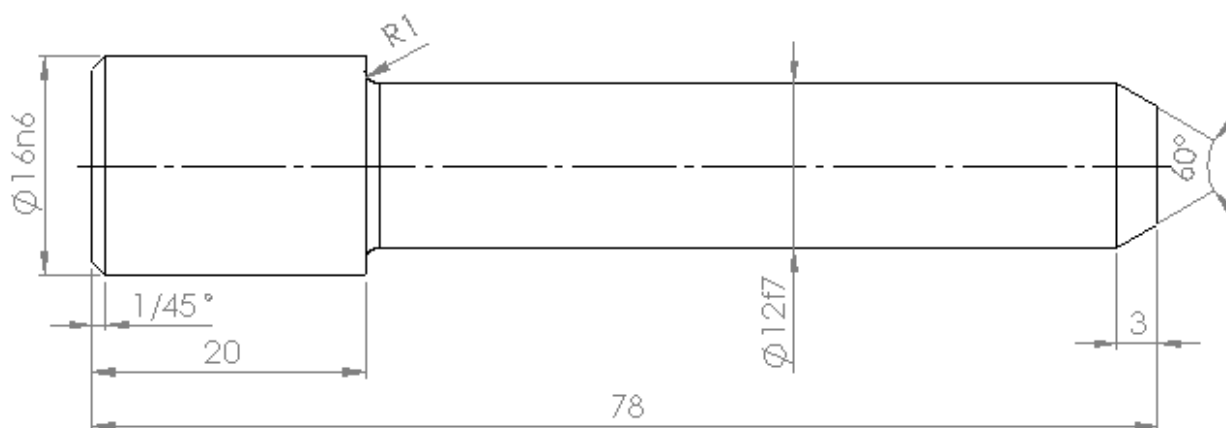


Слика 6.10 Обликач

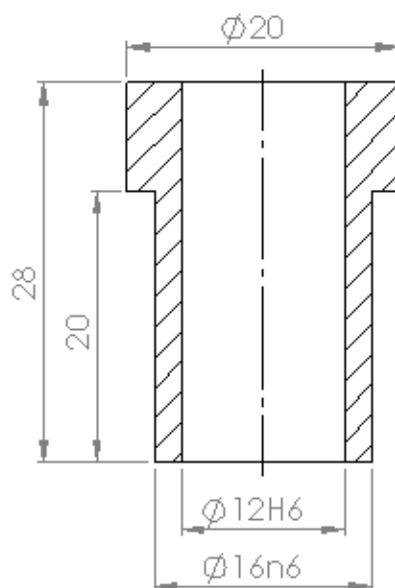


Слика 6.11 Матрица

Због прецизности извођења операције за правилно позиционирање горњег у односу на доњи подсклоп алата конструисане су чаура и стуб за вођење (слике 6.12 и 6.13). Елементи за вођење су направљени од легираног челика 16MnCr5 (Č4320). Вођице и чауре су термички обрађене каљењем и монтиране пресовањем.

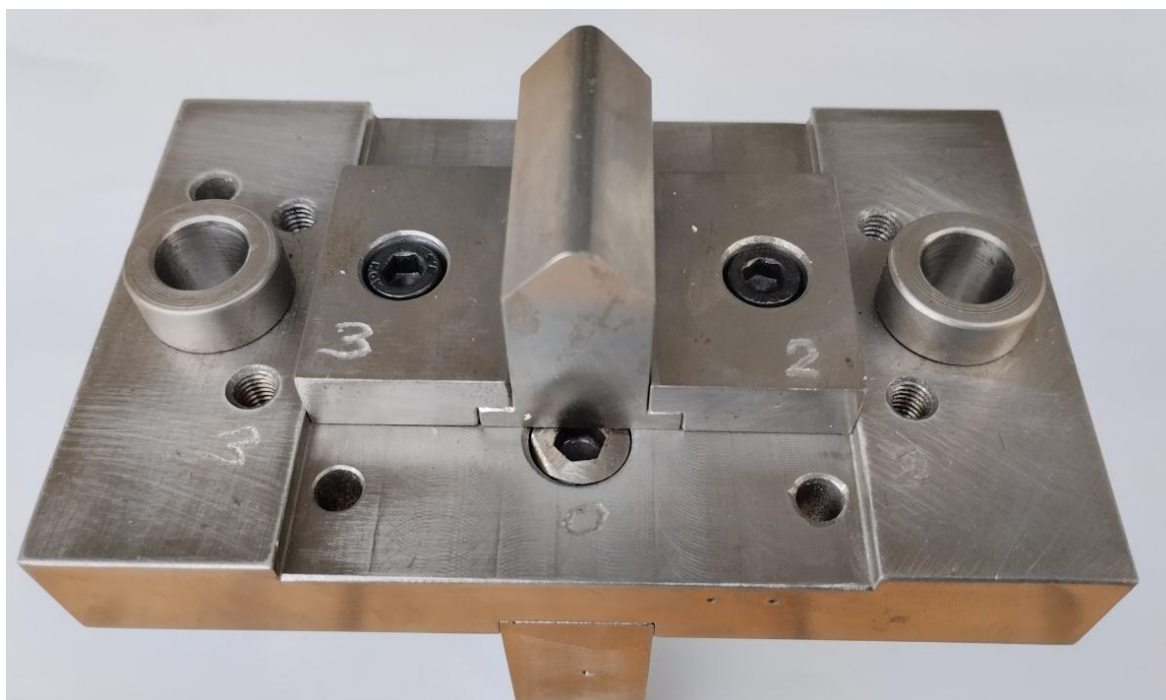


Слика 6.12 Стуб за вођење



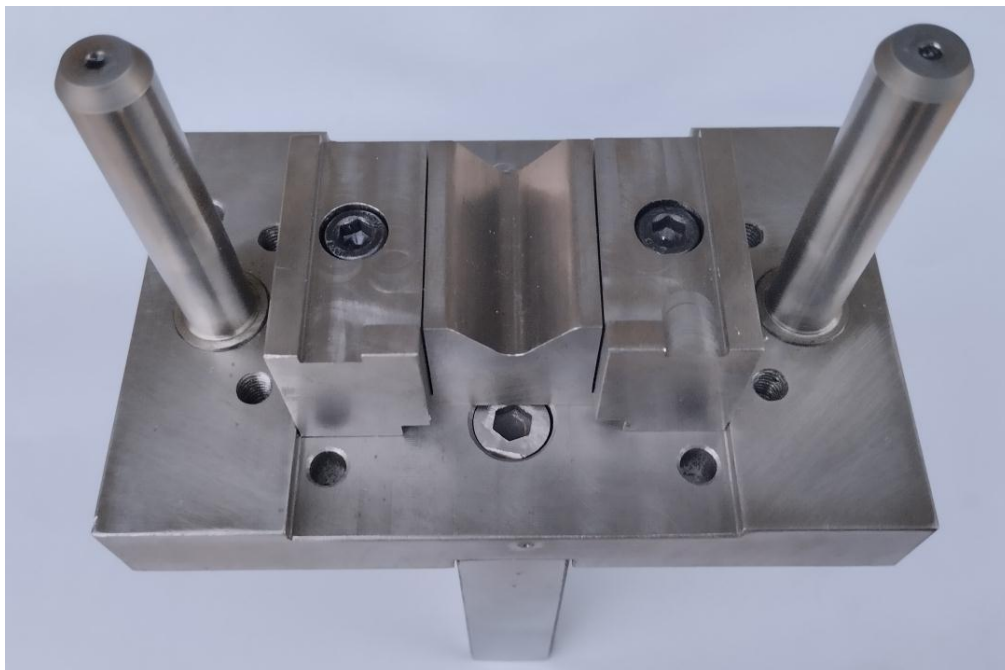
Слика 6.13 Чаура за вођење

На слици 6.14 приказан је горњи подскуп алата који се састоји од плоче, плоче за везивање, чаура за вођење, стезача и обликача. Чауре за вођење су прецизно монтиране да би склоп алата правилно функционисао.



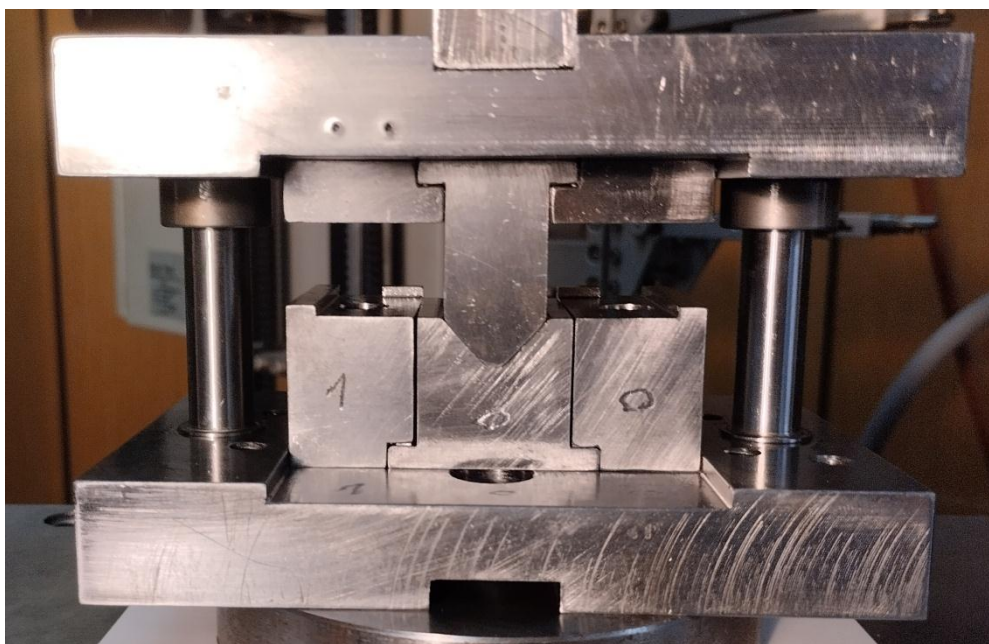
Слика 6.14 Горњи подскуп алата

Доњи подскуп алата приказан је на слици 6.15. Састоји се од носеће и плоче за везивање, стубова за вођење, два стезача (леви и десни) и матрице.



Слика 6.15 Доњи подсклоп алата

После монтаже алата, алат је монтиран на машину *Zwick/Roell Z100* као што је приказано на слици 6.16. Веза алата и машине остварена је помоћу плоча за везивање.



Слика 6.16 Мултифункционални алат за савијање монтиран на машини *Zwick/Roell Z100*

6.3 Експерименти једноугаоног савијања лима

Да би оптимална геометрија алата била одређена направљена је прва серија експеримената са променљивим максималним деформационим силама, при којима долази до различите еластичне повратности лима, и промене угла савијања. Затим је направљено поређење резултата са резултатима добијеним нумеричким

експериментом. Притискивач је израђен са радијусом 3,2 mm и углом 89° а матрица са радијусом 4 mm и углом 90°. Експерименти су изведени варирањем максималне вредности деформационе силе са четири изабране вредности да се провери еластично исправљање, тако што је у софтверу машине за испитивање *TestXpert* задата максимална вредност деформационе силе. Максимална вредност деформационе силе у експериментима је била 600 N, 1000 N, 1500 N и 2000 N. У тренутку достизања задате вредности деформационе силе машина зауставља рад. Узорци су били премазани минералним уљем. Брзина деформисања је била 5 mm/min и та вредност је одабрана на основу препорука за рад машине. Паралелно са тим су урађени нумерички експерименти, код којих су подешени улазни параметри симулације, до добијања најбољег поклапања са експериментима.

6.3.1 3D скенирање савијених делова

Провера димензионе тачности савијеног дела од лима урађена је коришћењем 3D скенера *David SLS 2* који користи технологију структуриране светлости. Састоји се од пројектора који пројектује структурирану светлост (шаблоне) на објекат и једне камере. Постоји могућност да скенер буде опремљен са две камере и обртним столом. Коришћењем две камере добија се више скенираних тачака и повећава се прецизност док се коришћењем обртног стола постиже аутоматизација скенирања.

Пре почетка скенирања неког дела потребно је калибрисати скенер. За калибрисање служи калибрациона плоча са шаблонима различитих величина. Пошто скенер *David SLS 2* користи структурирану светлост урађена је калибрација са шаблоном 60 mm и делови су припремљени за скенирање тј. површине лима су матиране (слика 6.18). Изглед скенера приказан је на слици 6.17. Пројектор и камера се монтирају на шину што систем чини веома прилагодљивим. Могуће је променити положај камере и на тај начин прилагодити скенирање величини објекта.



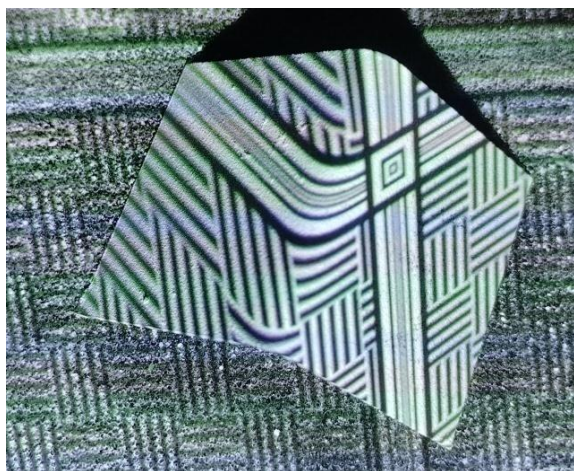
Слика 6.17 3D скенер *David SLS-2* [David]

Карактеристике скенера приказане су у табели 6.4.

Табела 6.4 Карактеристике скенера David SLS 2

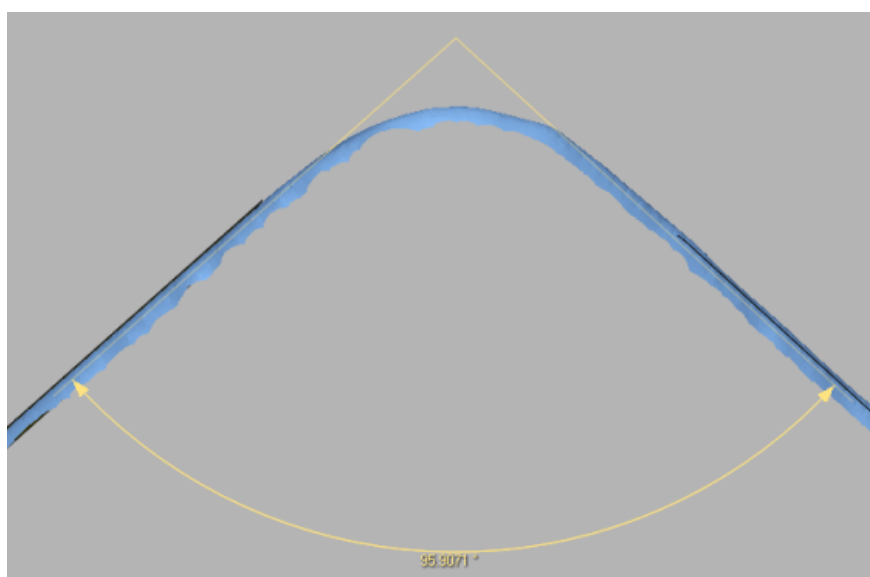
Карактеристика	Вредност
Величина скенираног дела	60-500 mm
Прецизност	до 0,1% величине дела (до 0,06 mm)
Време скенирања	веома кратко (део секунде за 1 скен)
Густина мреже	до 1200000 тачака по скену
Формати излазних датотека	OBJ, STL, PLY

Савијени узорци су скенирани 3D скенером *David SLS 2* и на основу облака тачака измерени су постигнути углови и радијуси савијања. Делови су скенирани са обе стране због провере.



Слика 6.18 Скенирање савијеног дела од лима

Резултати мерења угла савијања на делу од лима приказани су у табели 6.5. Угао на облаку тачака измерен је у софтверу *Geomagic design X*. Пресек облака тачака и равни управне на површину лима је добијен коришћењем опције *Mesh sketch* као што је приказано на слици 6.19.

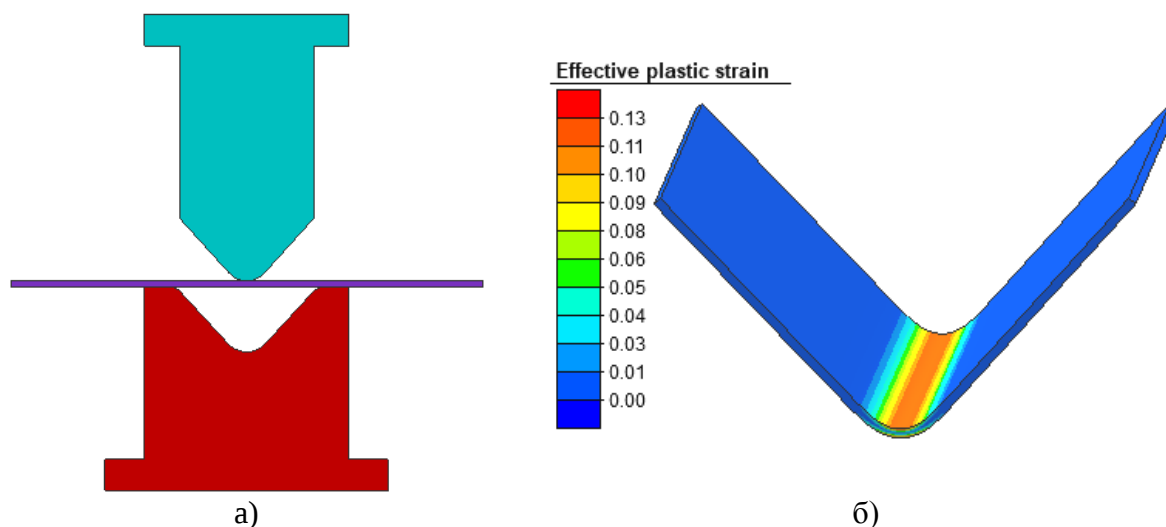
Слика 6.19 Мерење угла савијања на основу облака тачака добијених 3D скенирањем у софтверу *Geomagic design X*

Табела 6.5 Резултати мерења угла савијања

Максимална сила	Угао (скенирање)	Угао (угломер)
600N	95,89°	скоро 96°
1000N	93,64°	више од 93,5°
1500N	93,18°	више од 93,2
2000N	92,51°	~92,5°

6.4 Нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања лима

Симулација процеса је урађена са крутим алатима а после тога и са деформабилним. Због тога што је савијање урађено са полимерним алатима потребно је да вредност деформационе силе не буде велика. Максимална вредност деформационе силе ће бити ограничена на 600 N, 1000 N, 1500 N и 2000 N као што је већ наведено. Модел процеса и лим после процеса савијања приказани су на слици 6.20.



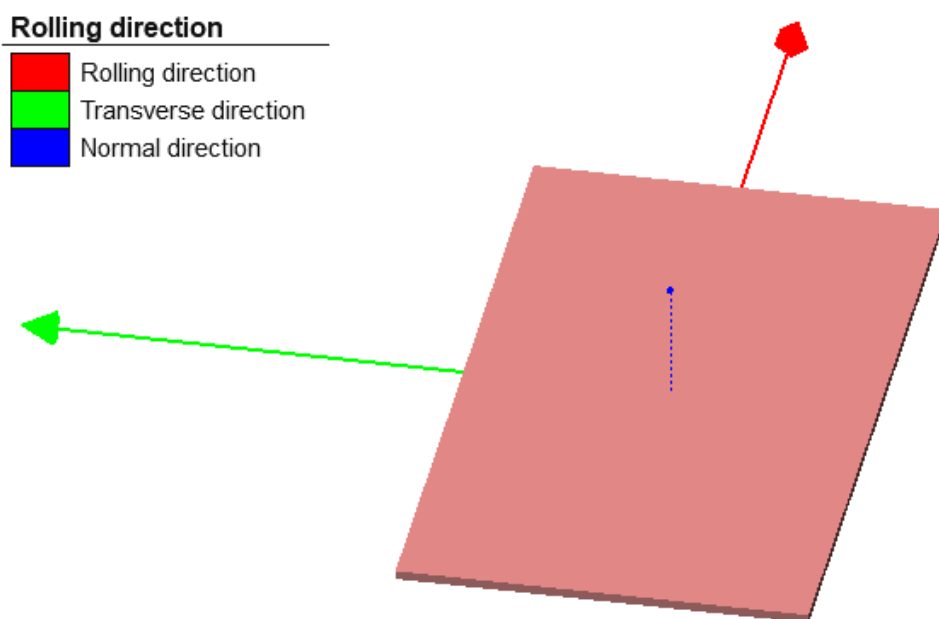
Слика 6.20 Нумеричка симулација процеса савијања: а) модел процеса и б) ефективна пластична деформација на лиму

После завршетка експеримената биће анализирана вредност угла после еластичног исправљања и вредност деформационе силе. Део након еластичног исправљања ће бити извезен из софтвера у *stl* формату и измерен у *CAD* софтверу. Софтвер *Simufact.forming* има могућност процене еластичног исправљања. У картици *Substages* се дефинише да ли након завршене нумеричке симулације треба урадити растерећење односно уклањање оба алата, матрице и обликача. У нумеричком експерименту дефинисано је да је потребно урадити растерећење и због прецизности дефинисано је да се то обави у десет корака. Променљива *Total strain* се састоји од еластичне и пластичне компоненте (*elastic strain* + *plastic strain*) за сваки елемент. Параметри симулације приказани су у табели 6.6.

Табела 6.6 Параметри нумеричке симулације

Врста симулације	Обликовање лима (<i>Sheet metal forming</i>)
Тип процеса	Савијање (<i>Bending</i>)
Тип симулације	2D раванска (<i>2D planar</i>)
Тип мреже коначних елемената	<i>Advancing front quad</i>
Величина елемента	0,15 mm

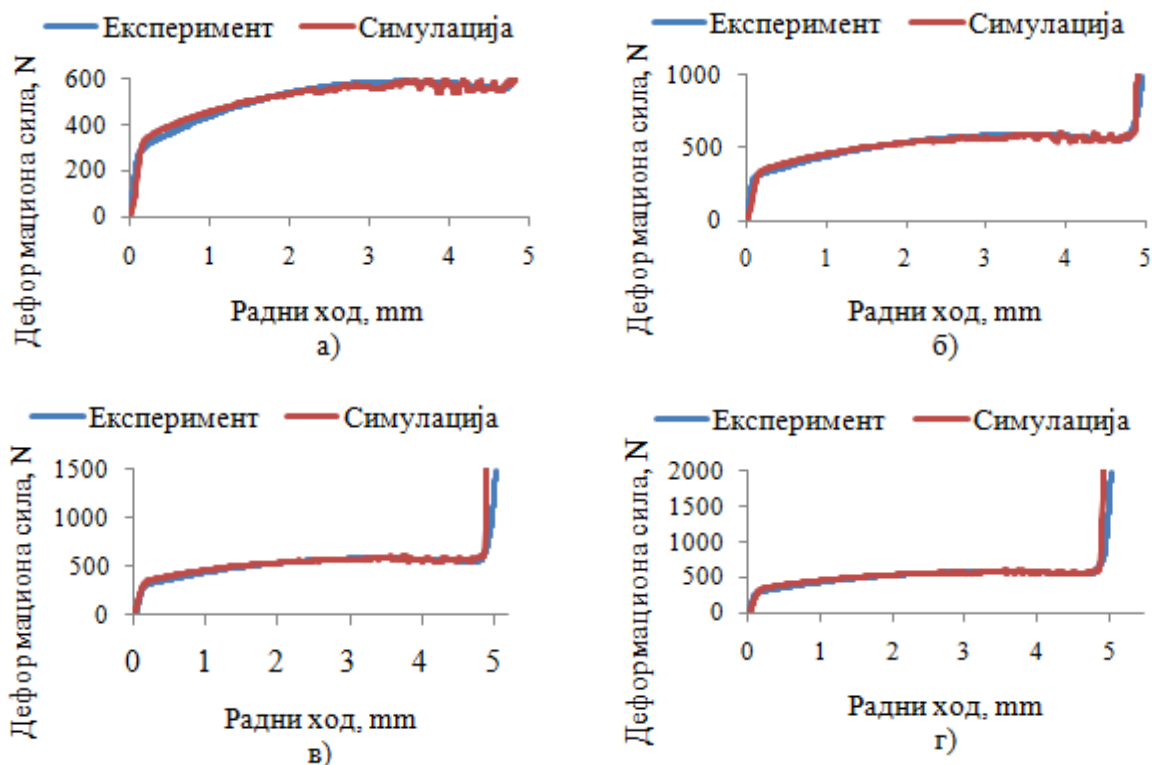
Услови трења су дефинисани коришћењем библиотеке софтвера *Simufact forming*, изабран је *sheet_medium* што одговара Кулоновом моделу трења са коефицијентом трења 0,1. Пошто се експеримент изводи у лабораторијским условима, температуре алата и лима су 20°C. На основу одређеног коефицијента анизотропије дефинисано је понашање материјала и у софтверу је дефинисан правац ваљања (слика 6.21) и коефицијент анизотропије у правцу ваљања. Софтвер *Simufact.forming* користи Хиллов модел анизотропије. За нумеричке симулације методом коначних елемената софтвер *Simufact.forming* користи солвер *Msc Marc*. У оквиру картице *Forming* у делу *Sub-stages* дефинисано је коришћење опција *Release dies attached to press* и *Release workpiece from stationary dies* чиме је дефинисано да се на крају симулације савијени део ослободи еластичних деформација. Симулација еластичног исправљања урађена је у десет корака.



Слика 6.21 Дефинисање правца ваљања

6.4.1 2D нумеричке симулације са крутим алатима

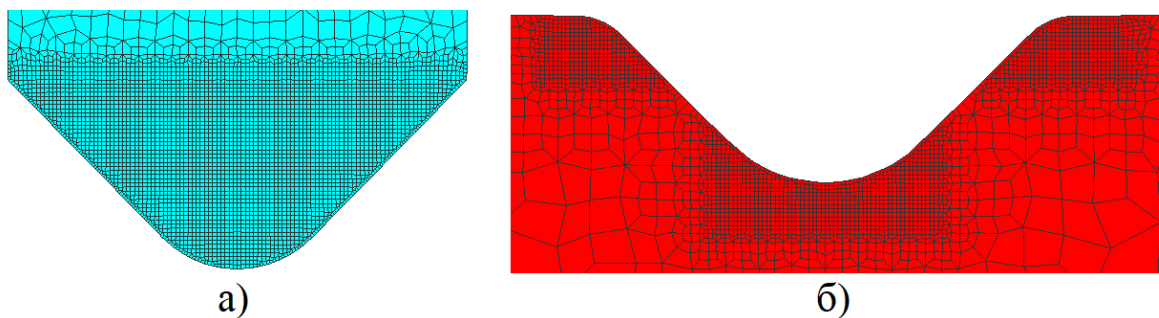
Прво је урађена симулација са крутим алатима а затим и са деформабилним. Нумеричка симулација са крутим алатима занемарује утицај еластичних и евентуално пластичних деформација на алату на процес савијања па због тога није у потпуности реална. Због тога је потребно урадити нумеричку симулацију и са деформабилним алатима. Да би била проверена тачност симулације тј. тачност дефинисаних кривих течења извршено је поређење резултата који су добијени експерименталним путем и резултата нумеричких експеримената. Поређени су дијаграми деформациона сила – радни ход и измерени угао да би било проверено да ли је еластично исправљање добро процењено. Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход за сва четири случаја (600 N, 1000 N, 1500 N, 2000 N) приказани су на слици 6.22. Упоредни дијаграми показују добро поклапање експериментално и нумерички добијених дијаграма деформационе сила – радни ход чиме је доказано да је нумерички модел добро дефинисан.



Слика 6.22 Дијаграми деформациона сила – радни ход добијени експериментално и нумерички са ограничењем деформационе силе: а) 600N б) 1000N в) 1500N г) 2000N

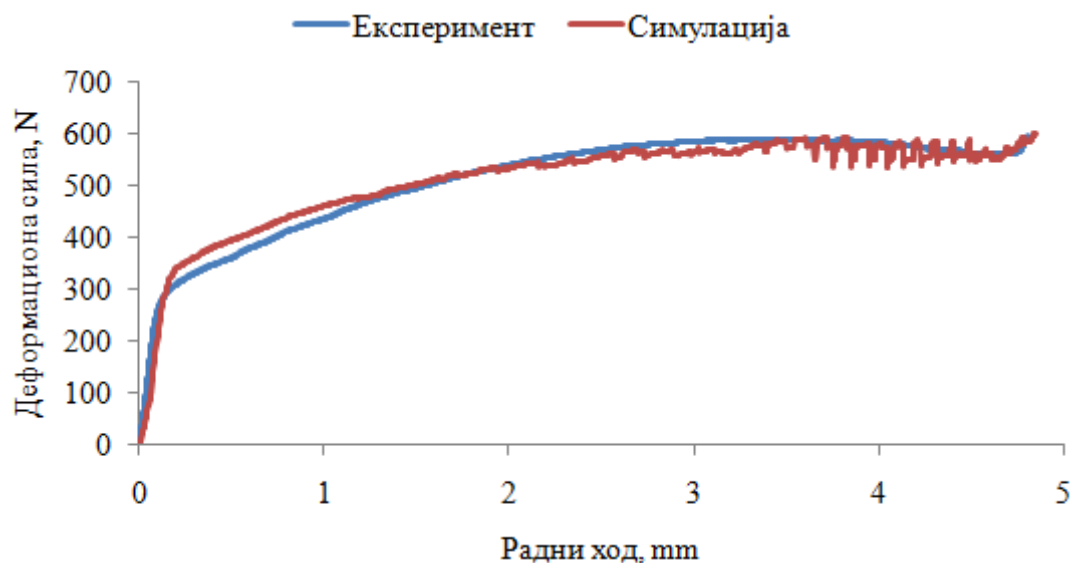
6.4.2 2D нумеричка симулација са деформабилним алатима

У наставку нумеричких експеримената урађена је симулација процеса савијања са деформабилним алатима. Визуелним прегледом уочено је да на алату не постоје никаква оштећења и деформације што је деформација са деформабилним алатима и потврдила. На деформабилним алатима је формирана мрежа коначних елемената *Advancing front quad* са елементом *Quads* (11) и величином елемента 2 mm, а на местима где је контакт најинтензивнији мрежа је уситњена са фактором 4. Изглед алата са уситњеном мрежом (*Refinement box*) приказан је на слици 6.23. Материјал од кога су израђени обликач и матрица је $\dot{C}1730$ и преузет је из базе материјала софтвера *Simufact.forming* под ознаком C60.



Слика 6.23 Уситњена мрежа (*Refinement boxes*) на: а) обликачу и б) матрици

Упоредни дијаграм деформациона сила – радни ход за симулацију са деформабилним алатима за максималну вредност деформационе силе од 600 N дат је на слици 6.24.



Слика 6.24 Дијаграм деформациона сила – радни ход – симулација са деформабилним алатима

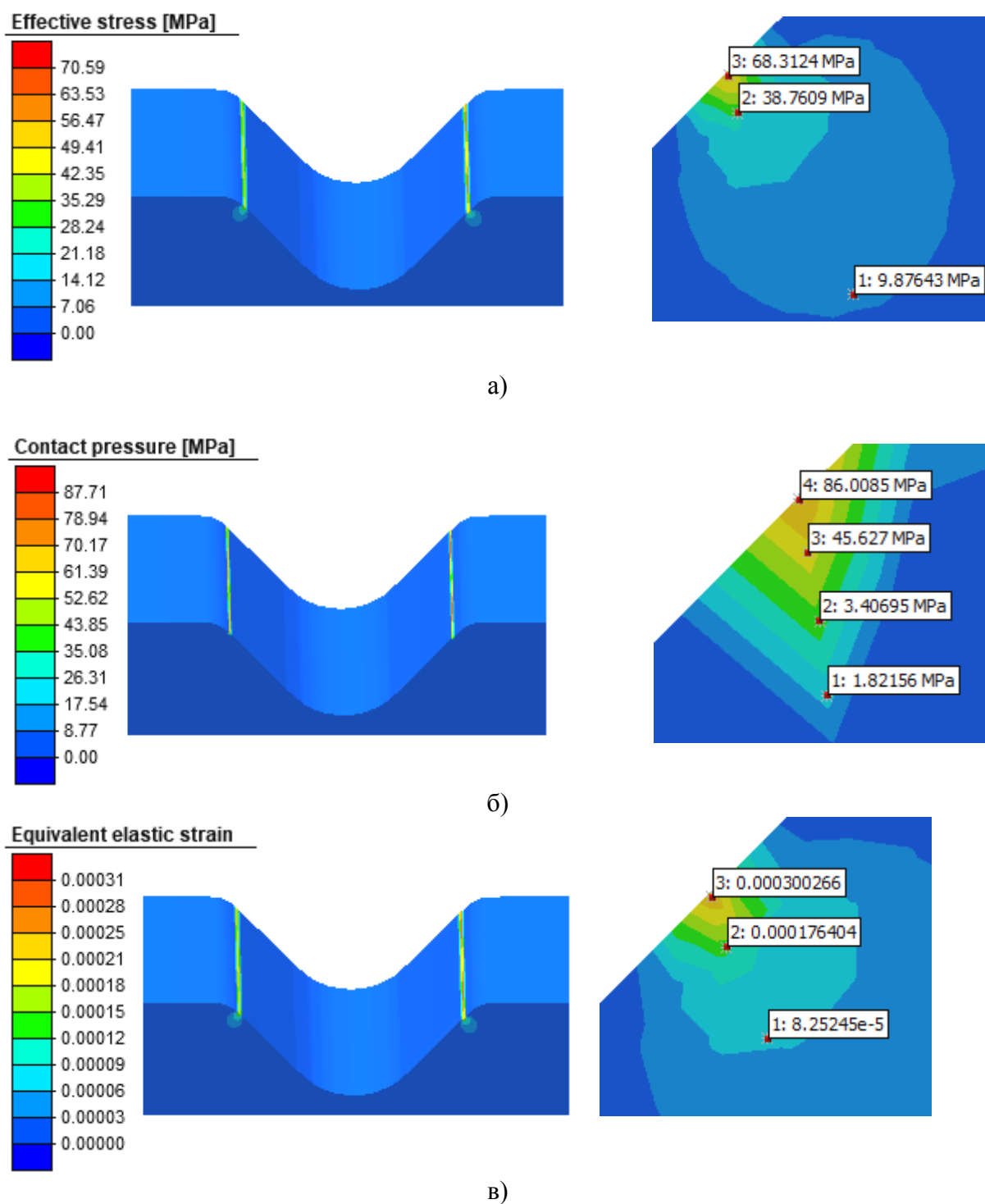
Резултати нумеричке симулације са деформабилним алатима се поклапају са закључцима експеримента да не постоје оштећења на алату и да су настале деформације еластичне и да имају веома малу вредност. На слици 6.25 приказани су резултати оптерећења на матрици за вредност деформационе силе 600 N. За деформабилне алате коришћена је мрежа *Quadtree* и тип елемента 11. За дефинисање услова трења коришћен је Кулонов закон трења са коефицијентом трења $\mu = 0,1$.

Вредности ефективног напона и контактнoг притиска дати су за највећу вредност радног хода на крају процеса савијања при максималној сили 600 N и закључак је да те вредности нису велике (слике 6.25 и 6.26). Вредност еластичне деформације је веома мала, реда величине до једног микрометра. Највеће вредности контактнoг притиска и ефективног напона уочене су на радијусима где током савијања све време постоји контакт матрице и лима.

На слици 6.25 а) приказана је вредност ефективног напона. Максимална вредност ефективног напона је 70,59 МПа али та вредност се јавља само на малом делу. На увећаном приказу дела матрице на којем постоји оптерећење се јасно види да је та вредност напона концентрисана на малом подручју и да су вредности ефективног напона значајно ниже.

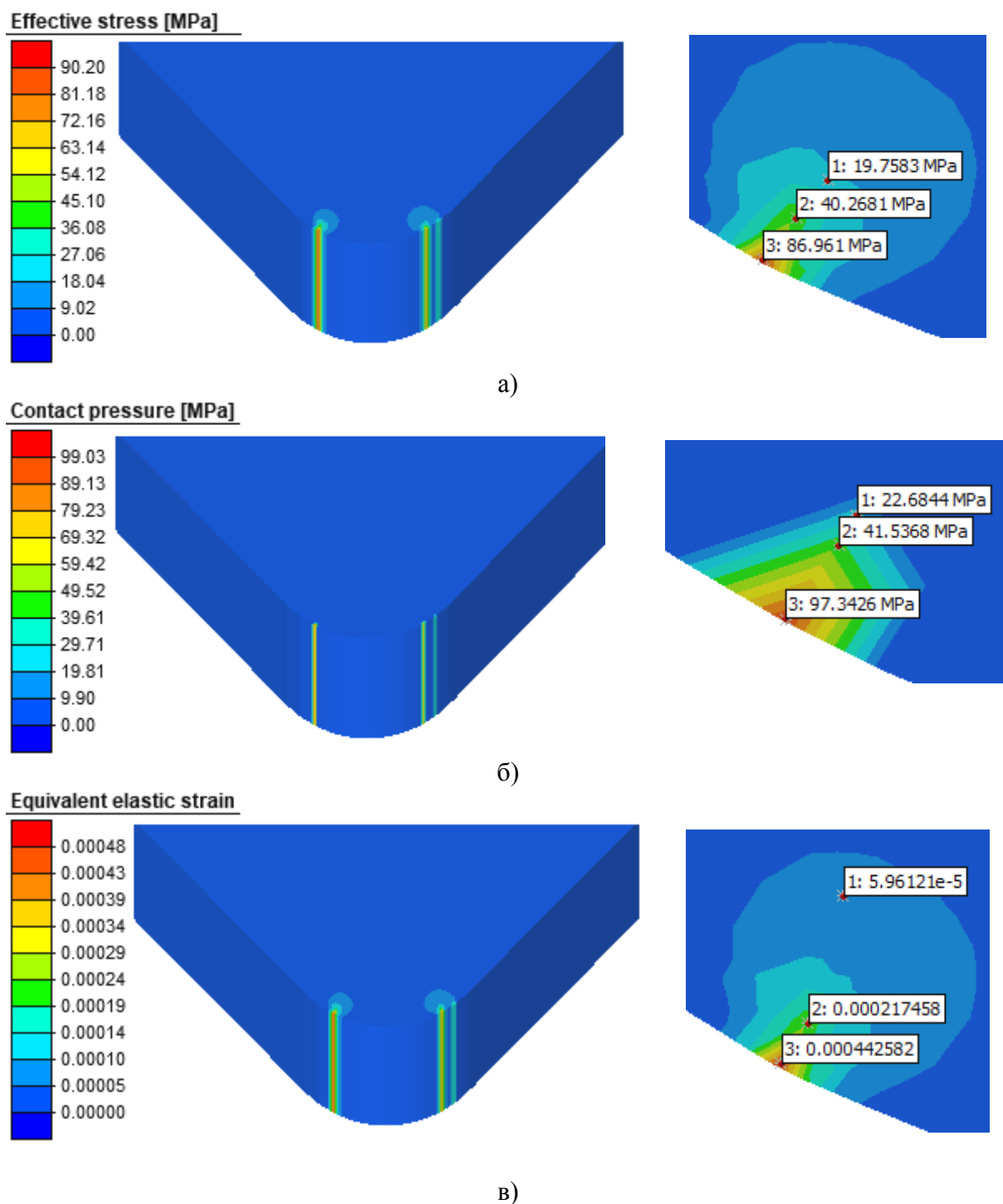
На слици 6.25 б) приказана је расподела вредности контактнoг напона. Максимална вредност контактнoг притиска је 87,71 МПа али та вредност, као и у случају расподеле ефективног напона, представља расподелу на малом подручју па је због тога дат увећан приказ.

На слици 6.25 в) приказана је расподела еластичних деформација које се јављају на матрици. Као и у при приказивању претходних резултата дат је и увећан приказ дела где се деформације јављају. Анализом резултата закључено је да оптерећења и настале деформације нису велике и да ова одступања могу бити објашњена као појава нумеричког врха (*numerical peek*).



Слика 6.25 Дистрибуција резултата на матрици: а) ефективни напон
б) контактни притисак в) еластична деформација

На слици 6.26 приказани су оптерећење и деформација на обликачу. Максимална вредност ефективног напона је 90,2 МПа а контактнoг притиска 99,03 МПа. Вредност настале еластичне деформације је мања од пола микрометра па је закључено да алат под оваквим условима рада није оптерећен. На слици је приказана увећано зона где се оптерећења настала.

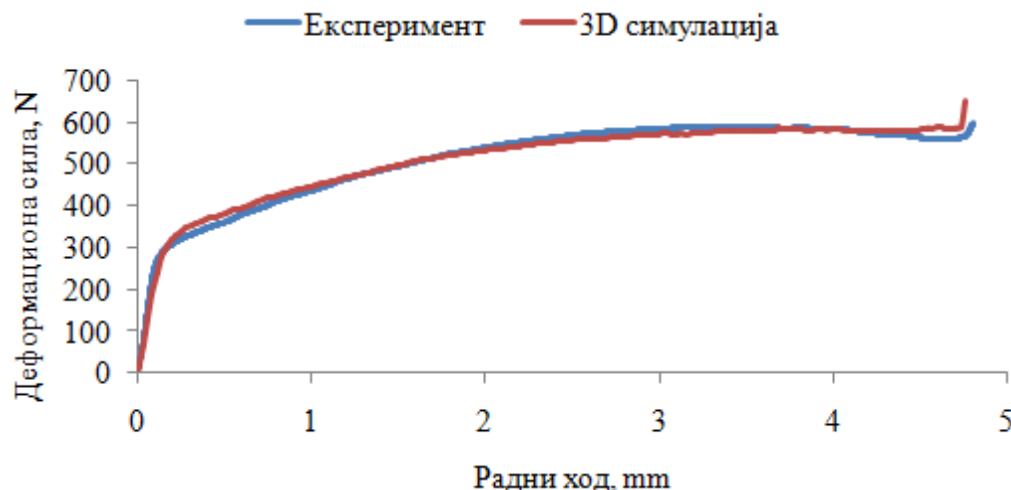


Слика 6.26 Дистрибуција резултата на обликачу: а) ефективни напон б) контактни притисак в) еластична деформација

6.4.3 3D нумеричка симулација са деформабилним алатима

Процес једноугаоног савијања је моделиран кроз више приступа и модела. Прво као 2D симулација процеса са крутим алатима као равански проблем, затим као 2D симулација са деформабилним алатима и на крају као 3D симулација, кроз истовремену процену понашања лима током савијања, али и еластичног угибања матрице уз примену деформабилних алата, како би се нумерички модел у потпуности валидирао.

Резултати симулације са 3D елементима потврђују резултате добијене 2D симулацијом (слика 6.27). Дискретизација обратка од лима је извршена коришћењем мреже *Sheetmesh* са хексаедарским елементима величине 0,5 mm. У зони савијања је генерисана финија мрежа, коришћењем *Refinement box*-ева и фактором 2. За дискретизацију деформабилних алата коришћени су тетраедарски елементи типа 134, који се иначе користе за процену еластичних деформација у алатима. На матрици и на обликачу су направљени *Refinement box*-ови тј. мрежа је уситњена. Као и у 2D симулацији вредност деформационе силе је ограничена на 600 N и у оквиру опције *Sub-stages* дефинисано је да се након завршетка процеса савијања део ослободи еластичних деформација кроз десет корака.



Слика 6.27 Дијаграм деформациона сила – радни ход – 3D симулација са деформабилним алатима

Да би на основу резултата били пројектовани полимерни алати битно је одредити еластично исправљање које настаје после престанка оптерећења. Вредности угла после еластичног исправљања добијене нумерички и експериментално приказане су у табели 6.7 и на слици 6.28. Коришћењем потпрограма софтвер врши симулацију растерећења. Потпрограм за ослобађање еластичних деформација је:

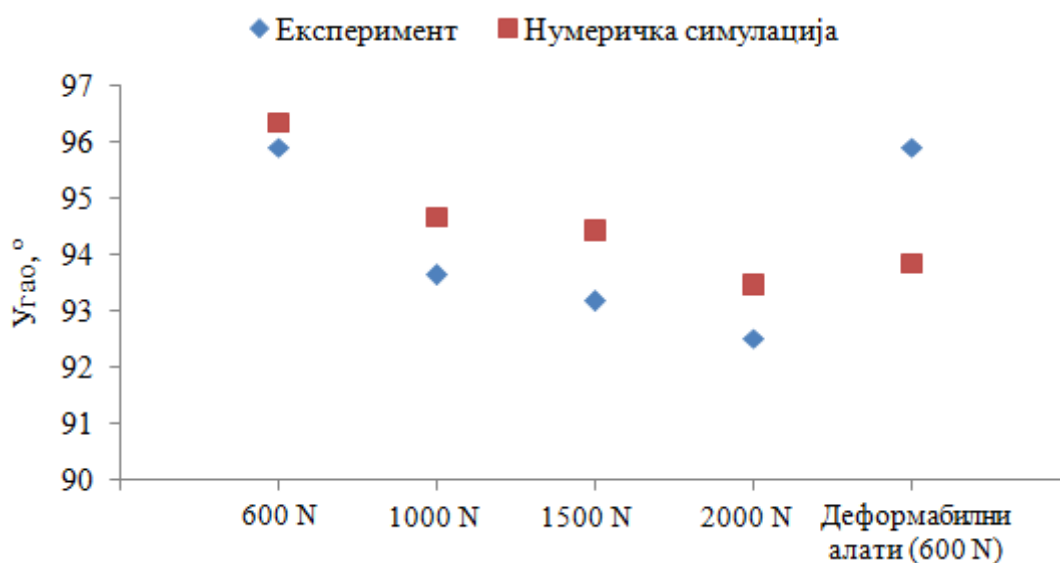
```

„if(jplbcd.eq.1)then
  c get elastic strain
  icode=127 !equivalent elastic strain post code
  ioflag=0 !read
  call elmvar1(icode,m(1),nn,kcus(1),v,ioflag)
  v=v+t(2) !add 2nd saved state variable
endif
return
end.“

```

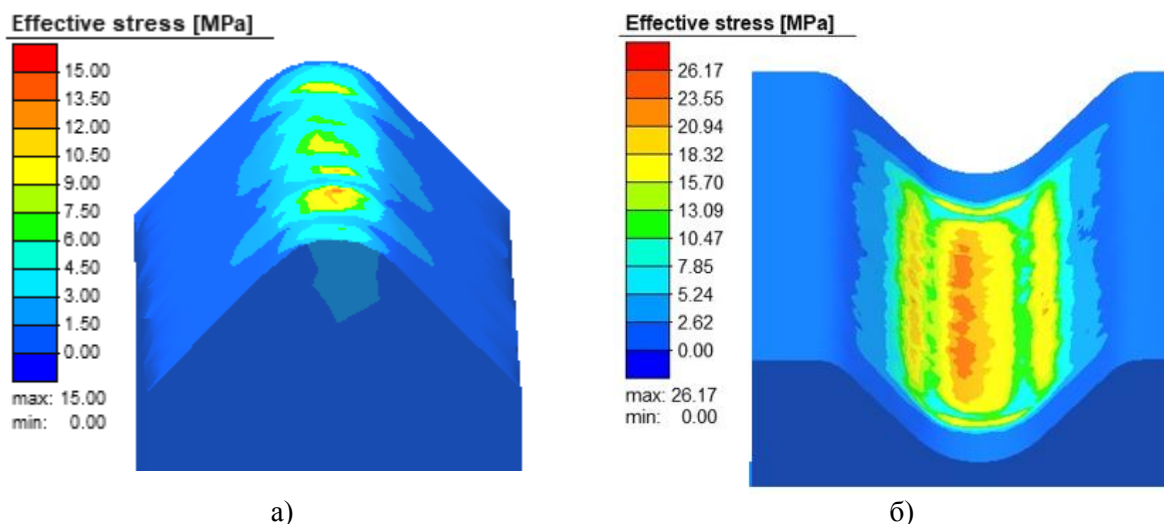
Табела 6.7 Измерене и процењене вредности угла савијања

	Експеримент	Нумеричка симулација – DC04	Одступање
600 N	95,89°	96,33°	0,46%
1000 N	93,64°	94,66°	1,08%
1500 N	93,18°	94,42°	1,31%
2000 N	92,51	93,46°	1,02%
Деформабилни алати (600 N)	95,89°	96,2°	0,32%
3D сим. (600 N)	95,89°	96,28	0,41%



Слика 6.28 Поређење вредности угла савијања дела након растерећења у експериментима и нумеричкој 3D симулацији при различитим максималним силама

Одступања угла нису велика и налазе се у дозвољеним границама, сва одступања угла и вредности деформационе силе су мања од 1,31%. Најмање одступање забележено је у експерименту када је деформациона сила ограничена на 600 N и износи само 0,46%. Објашњење за ову појаву се види на дијаграмима сила – радни ход где се види да постоје одређене разлике вредности силе током процеса калибрисања. С обзиром да ће се у накнадним експериментима користити полимерни алати, потпуно испуњени и тополошки оптимизовани, биће коришћене мање вредности силе па је закључак да ови резултати у потпуности испуњавају све захтеве, односно да нумерички модел врло поуздано и прецизно омогућава процену еластичног исправљања, тако да је могуће применити га и за друге врсте савијања, и сложенијих модела. На основу тога, могу се извршити компензације угла савијања, и редизајнирати алати, тако да након растерећења дела од лима и еластичног исправљања угао савијања буде 90 степени. Највећа разлика између углова савијања је око 1° што је у складу са теоријским претпоставкама. Разлика деформационе силе није велика јер се јавља на крају процеса где утицај на настајање ове разлике могу имати и триболошки услови, дебљина лима итд. Дистрибуција напона на обликачу и матрици приказана је на слици 6.29. Разлика вредности у односу на резултате 2D симулације постоји али обе симулације показују да алати задовољавају.

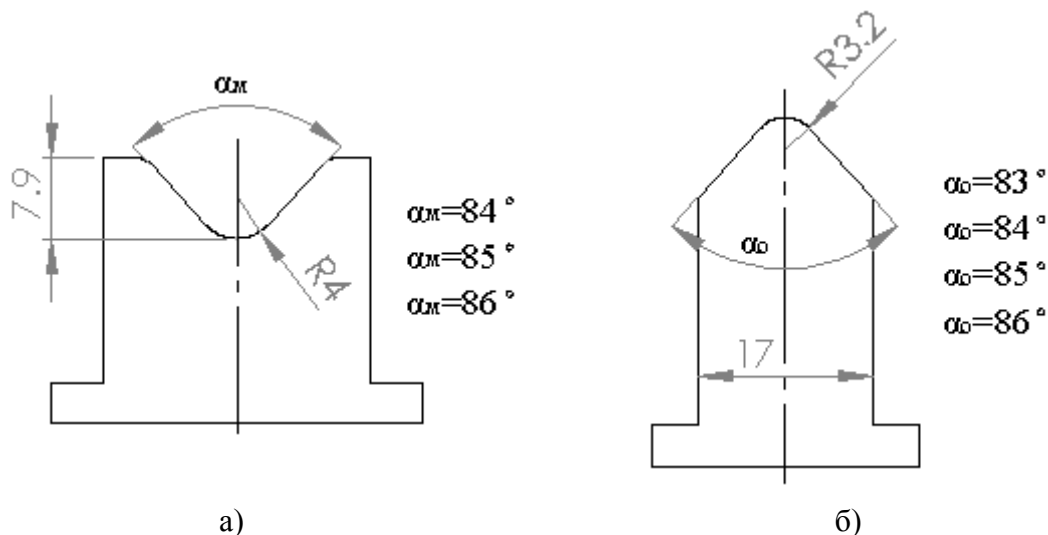


Слика 6.29 Дистрибуција ефективног напона у 3D симулацији са деформабилним алатима на:
а) обликачу и б) матрици

6.5 Процена компензације угла савијања методом коначних елемената

Угао савијања ће бити одређен нумеричким експериментом према плану који је приказан у табели 6.8.

Размотрено је неколико углова савијања притискивача и матрице. Углови матрице и обликача који су разматрани су дефинисани на основу прелиминарних нумеричких експеримената и варирани су у вредностима од 84° , 85° и 86° . Укупно је изведено шест нумеричких експеримената. Пречник обликача је 3,2 mm а пречник матрице 4 mm. За сваки од три наведена угла урађена су по два експеримента, у првом је угао обликача за 1° мањи од угла матрице док су у другом углови матрице и обликача једнаки. Димензије матрице и обликача приказане су на слици 6.30.

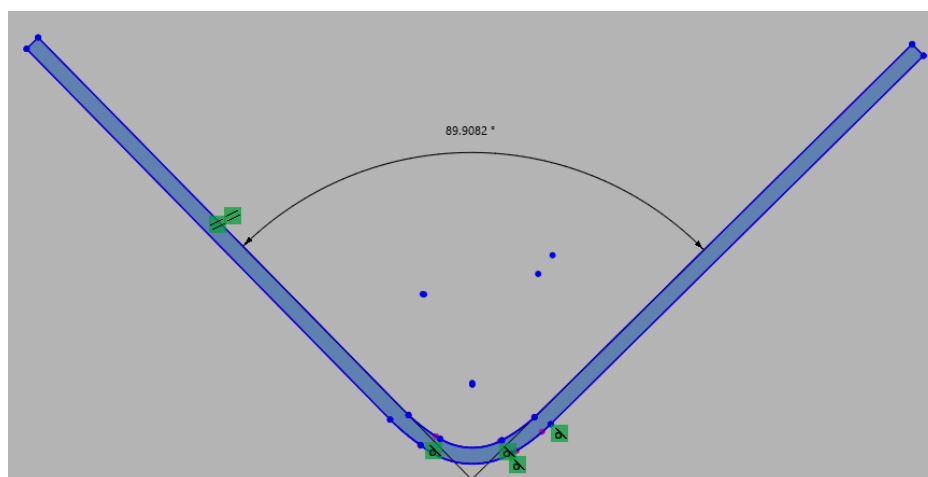


Слика 6.30 Димензије: а) матрице и б) обликача

Табела 6.8 План нумеричких експеримената за процену компензације угла савијања

Нумерички експеримент	Конфигурације матрице и обликача	Угао матрице α_M	Угао обликача α_0
1.	1.1	84°	83°
	1.2	84°	84°
2.	2.1	85°	84°
	2.2	85°	85°
3.	3.1	86°	85°
	3.2	86°	86°

На основу резултата нумеричких експеримената закључено је да је најбоља тачност постигнута за две комбинације, прва када је угао обликача 84° и угао матрице 85° и друга када су угао обликача и угао матрице једнаки и износе 85°. Угао савијања виртуелног обратка, извезеног после симулације растерећења (*Sub-stages – release dies/workpiece*), је измерен у софтверу *Geomagic design X* као што је приказано на слици 6.31. Виртуелни обрадак се из софтвера *Simufact.forming* извози као *stl* фајл и пресек се прави опцијом *Mesh sketch* у софтверу *Geomagic design X*. Пресек и котирали угао се виде на слици 6.31. Резултати су приказани у табели 6.9. Дијаграми деформациона сила – ход приказани су на слици 6.32.

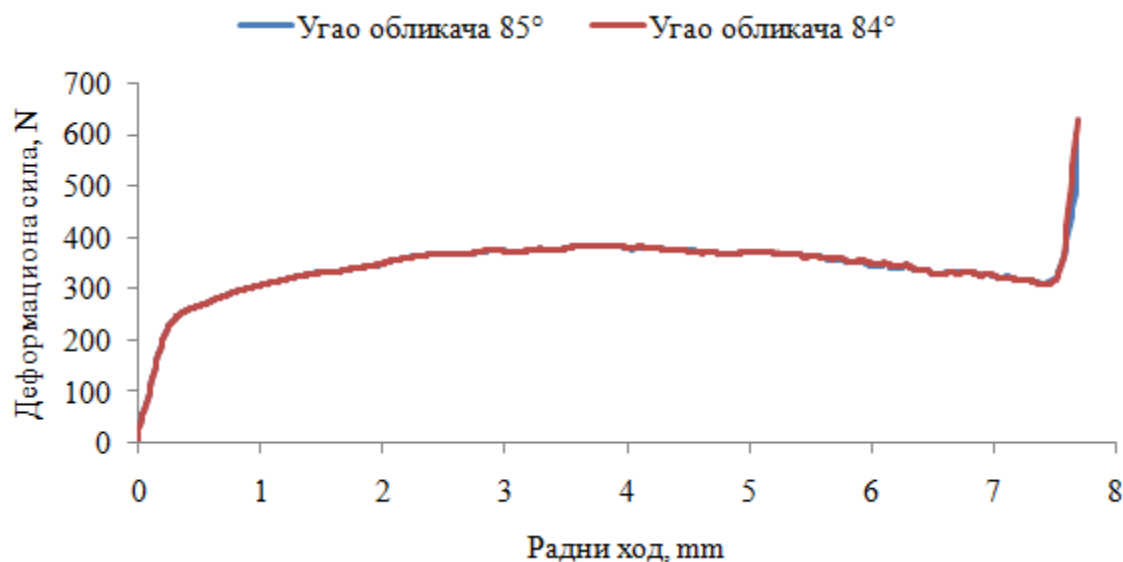
Слика 6.31 Мерење угла савијања на виртуелном обратку у софтверу *Geomagic design X*

Табела 6.9 Резултати нумеричких експеримената

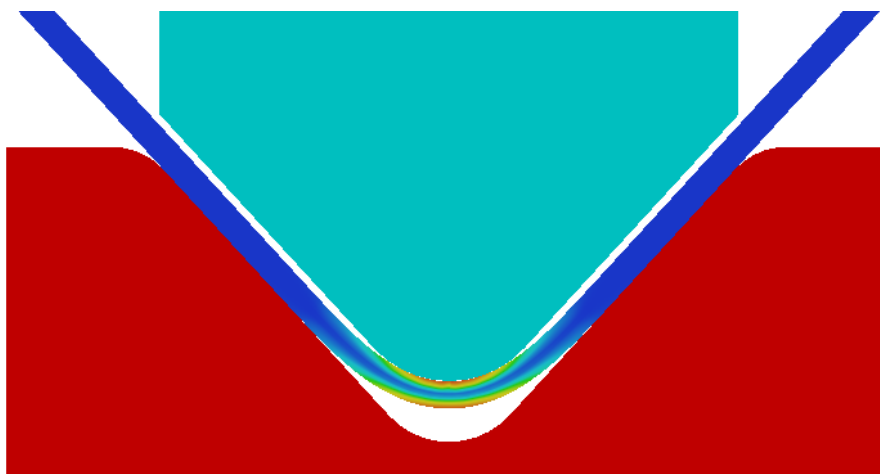
Нумерички експеримент	Конфигурације матрице и обликача	Нумерички процењен угао савијеног дела од лима након еластичног исправљања
1.	1.1	88.94°
	1.2	88.89°
2.	2.1	89,89°
	2.2	89,90°
3.	3.1	90.91°
	3.2	90.78°

Резултати су показали да је избор угла савијања на матрици добар и да угао на обликачу при савијању са малим силама без калибрисања нема велики утицај. Са слике

6.32 се јасно види да угао обликача нема утицај на деформациону силу. Полупречник заобљења на обликачу свакако треба да буде мањи или евентуално једнак унутрашњем полупречнику савијања на делу тако да је добре резултате могуће добити и са мањим углом. Радијус матрице у овом случају нема велики утицај јер и не долази до контакта на самом радијусу (слика 6.33).



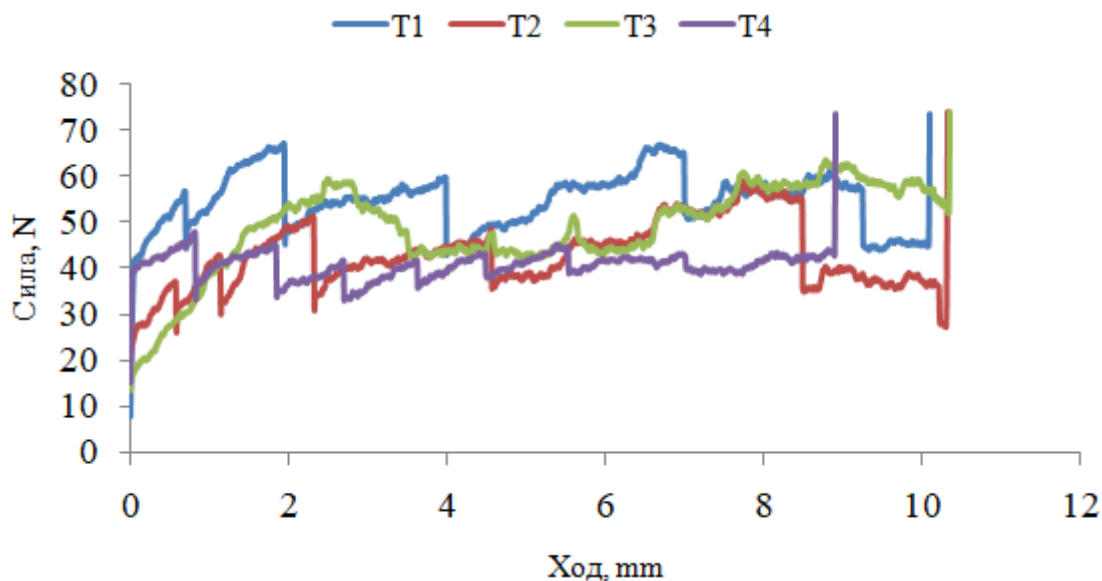
Слика 6.32 Упоредни дијаграми деформациона сила – ход добијени у нумеричким експериментима (конфигурације 2.1 и 2.2)



Слика 6.33 Положај радних елемената алата при достизању силе од 600N

6.6 Експериментална верификација нумеричког модела за компензацију угла савијања

Према плану експеримент је изведен са пет понављања. С обзиром да је алат направљен са вођицама потребно је размотрити и утицај трења на чаурама и вођицама. Да би утицај трења био процењен направљена је проба где се горњи део алата кретао надоле до контакта са матрицом и мерена је сила коју изазива контактено трење између чауре и вођице. Експеримент је поновљен четири пута и дијаграми сила – ход приказани су на слици 6.34.



Слика 6.34 Дијаграми сила – ход настали услед трења између вођице и чауре

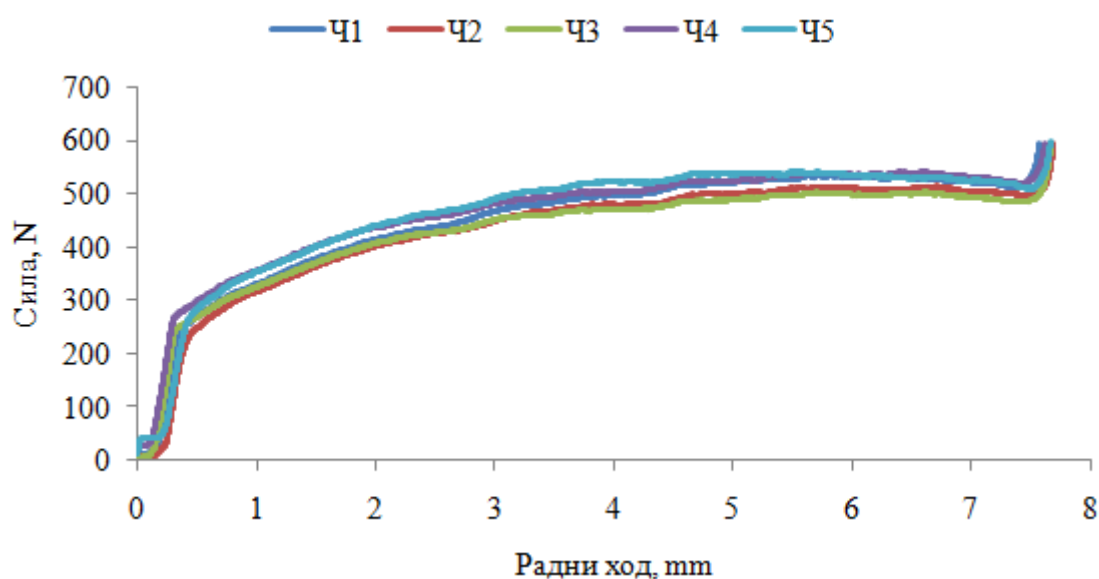
На слици се види да постоји значајно трење у елементима за вођење горњег ка доњем делу алата. Вредност силе трења која је одређена током ових експеримената иде и до 70 N. За максималну деформациону силу при једноугаоном савијању лима од 600 N удео силе трења је више него 10%. Постоји потреба да се ово узме у обзир код анализе упоредног дијаграма деформационе силе у експериментима и нумеричким симулацијама, при финалној верификацији нумеричког модела процеса и при поређењу дијаграма деформациона сила – радни ход.

Као резултати експерименталне верификације нумеричког модела једноугаоног савијања лима у модификованом алату, са компензацијом угла матрице и обликача (85°) добијени су дијаграми деформационе силе и мерени углови савијања на деловима од лима, за свих пет поновљених експеримената. Резултати мерења угла савијања применом оптичког скенирања на 3D скенеру *David SLS 2*, на исти начин како је наведено у пододелу 6.2.1, приказани су у табели 6.10, заједно са упоређењем процењеног угла добијеног нумеричким симулацијама. Дијаграми деформационе силе приказани су на слици 6.35. Као и у експериментима одређивања утицаја трења између чаура и вођица постоје одређена одступања али се она налазе у дозвољеним границама. Трење између вођица и чаура има утицај на облик дијаграма деформационе силе јер у зависности од вредности силе изазване трењем вредност деформационе силе ће се мало разликовати.

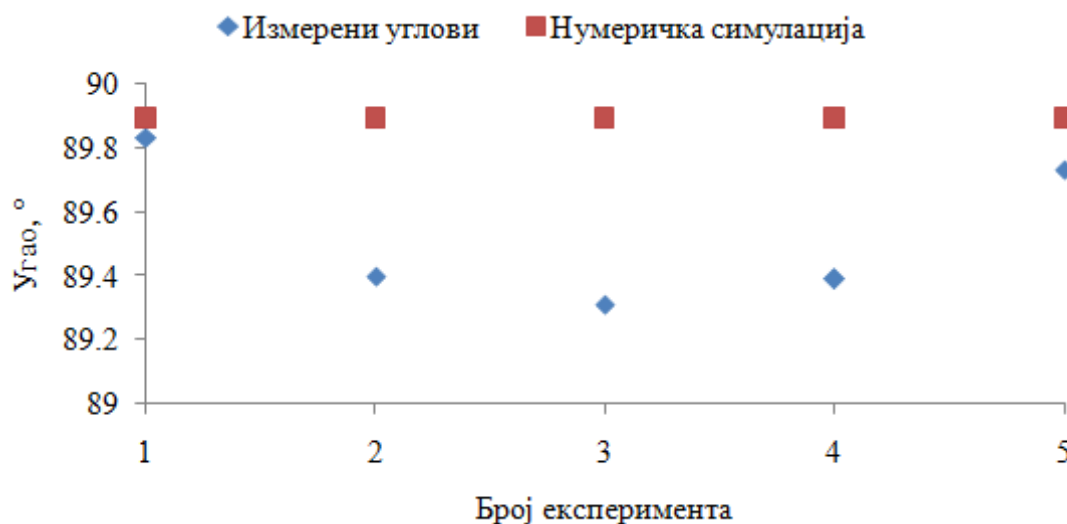
Резултати приказани у табели 6.10 показују да постоје минимална одступања измереног угла савијања на делу од лима од процењеног у нумеричком моделу. Просечна вредност грешке је 0,4% што је апсолутно прихватљиво. Према приручнику [Јовичић, 1980], очекивано одступање угла при савијању лима је око $\pm 1^\circ$. Могући разлог за појаву одступања је врста челика јер је DC04 (Č0148) негарантованог хемијског састава или акумулација грешака при скенирању услед неких шума. Одступања мерених и нумерички процењених углова савијања су графички приказана на слици 6.36.

Табела 6.10 Измерени углови савијања у експериментима са модификованим алатом уз компензацију угла матрице и обликача

Експеримент	Измерени угао дела	Нумерички процењен угао дела	Одступање	
Ч1	89,83°	89.89°	-0,06°	-0.07%
Ч2	89,40°		-0,49°	-0.55%
Ч3	89,31°		-0,58°	-0.65%
Ч4	89,39°		-0,5°	-0.56%
Ч5	89,73°		-0,16°	-0.18%
Средња вредност	89,53°	/	-0.358°	-0.40%

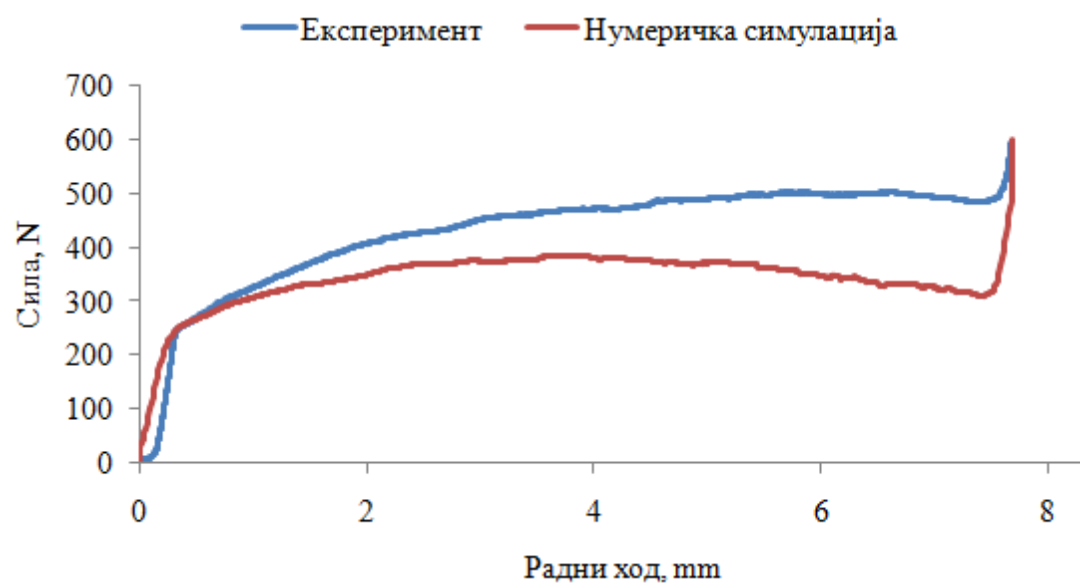


Слика 6.35 Дијаграм деформациона сила - радни ход за савијање челичним алатом



Слика 6.36 Приказ одступања вредности угла у односу на нумеричку симулацију

Упоредни дијаграм деформационих сила у експерименту и нумеричкој симулацији приказан је на слици 6.37. Разлика која је уочљива настаје због трења између чаура и вођица које је у симулацији занемарено.



Слика 6.37 Упоредни дијаграм деформациона сила – радни ход добијен експериментално и нумерички

7. Експериментално-нумеричко истраживање процеса једноугаоног савијања лима применом адитивно произведених и тополошки оптимизованих компоненти алата

У овом поглављу анализирана је примена полимерних алата направљених адитивном производњом као и тополошки оптимизованог алата. Прво је анализиран процес применом методе коначних елемената, разматрани су напонско стање на полимерним алатима и настале деформације. На основу оптерећења које алати трпе током процеса савијања урађена је тополошка оптимизација алата. У експерименту су коришћени полимерни алати направљени од ABS-а и Оникса као и тополошки оптимизован алат од ABS-а. Анализирани су резултати експеримената као што су стање алата (квалитет површина, потенцијална оштећења), угао савијања дела, дијаграми деформациона сила – радни ход итд. Циљ експериментално нумеричког истраживања је доказивање прве и друге хипотезе.

7.1 Нумерички експерименти једноугаоног савијања лима са адитивно произведеним алатима

Пре израде полимерних алата проверено је да ли такви алати могу да задовоље потребе операције савијања и провера је урађена коришћењем методе коначних елемената. Циљ нумеричких експеримената је да се утврди да ли ће настати еластичне деформације и евентуална оштећења на алату током процеса савијања лима, и то применом радних компоненти алата адитивно произведених од два полимерна материјала (ABS, Оникс), и да ли димензије савијених делова од лима имају прецизан угао савијања.

7.1.1 Улазни подаци за нумеричку анализу

Изведена су два нумеричка експеримента са два различита материјала. За правилно извођење нумеричких експеримената потребно је дефинисати криву течења за два полимерна материјала. Анализа резултата испитивања карактеристика и понашања материјала представљена у петом поглављу (поделељак 5.6.4) показала је да пуни узорци (100% вредност густине испуне) имају значајно веће вредности механичких карактеристика него они са решеткастом структуром. Због овог разлога алати ће бити израђени потпуно испуњени материјалом и крива течења је дефинисана на основу криве затезања пуних узорака.

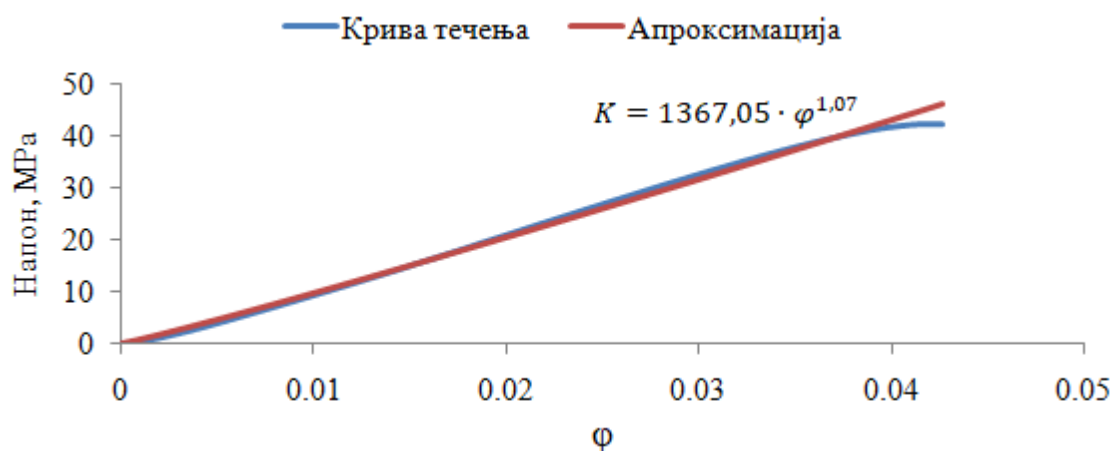
Експериментално добијена крива течења материјала ABS апроксимирана је у експоненцијалном облику $K = C \cdot \varphi^n$. Да би аналитичка апроксимација могла да се користи у софтверу одређени су коефицијент $C = 1314,59$ и експонент деформационог ојачања $n = 1,073$. Крива ојачања приказана је на слици 7.1.

Најповољнији угао штампања је 45° - 45° степени што одговара најчешћем положају штампања. Пошто брзина штампања нема значајан утицај на механичке

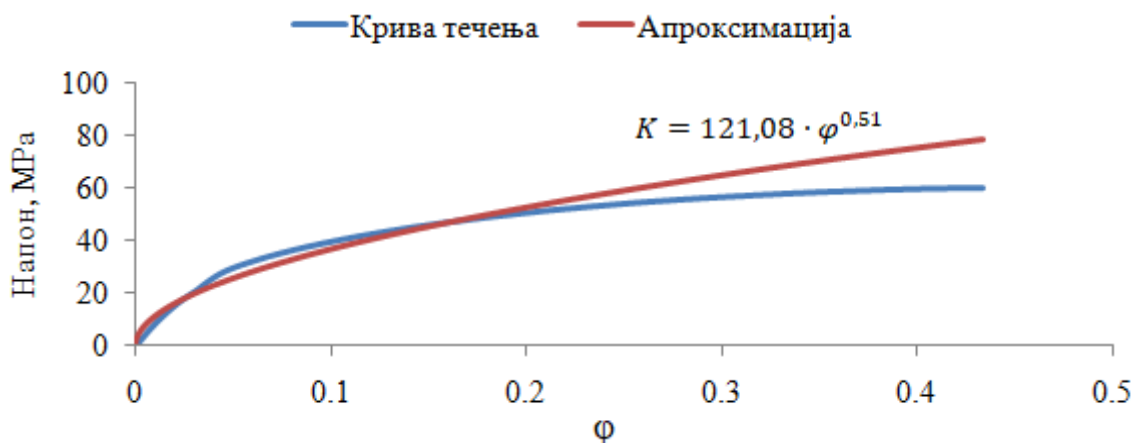
карактеристике разматрана је брзина $B3$ (90 mm/s). Највеће вредности механичких карактеристика су измерене при дебелини слоја од 0,1 mm.

На основу свега наведеног алат од ABS-а је штампан са истим параметрима као и узорак $MBM1TU4O1I5P4B3S1$. На основу дијаграма затезања овог узорка дефинисана је крива течења материјала ABS. На дијаграму затезања овог узорка на слици 5.14 види се да су настале деформације веома мале тј. да је материјал ABS веома крт.

Разматрањем резултата тестова затезања узорка од Оникса закључено је да је за израду алата неопходно користити густину испуне од 100%. Најповољнији правац штампања је $0^\circ/90^\circ$. С обзиром да је на штампачу *Markforged Onyx Pro* брзина непромењива и да највеће вредности механичких карактеристика се постижу при штампању са дебелином слоја од 0,1 mm, крива течења је одређена на основу теста затезања узорка $MFM2TU1O1I5P4B4S1$. Крива течења приказана је на слици 7.2.



Слика 7.1 Крива течења узорка израђених од ABS-а



Слика 7.2 Крива течења узорка израђених од Оникса

Посматрањем слика 7.1 и 7.2 види се да постоје одређена одступања између кривих течења и аналитичке апроксимације. У случају криве течења ABS-а разлика је веома мала. Овај материјал је веома крт па је зависност силе од настале деформације скоро линеарна. С обзиром да ће од полимерних материјала у наставку експеримента бити израђени алати за обликовање лима и да настанак деформација ван еластичног подручја није дозвољен сматра се да ће аналитичка апроксимација криве течења правилно представити напрезање алата направљеног од ABS-а.

Разматрањем одступања између криве течења и аналитичке апроксимације криве течења материјала Оникс види се да постоји значајно одступање при већим вредностима деформације. Одређивање аналитичке апроксимације криве течења Оникса је веома компликовано због његових карактеристика. Као што се може закључити на основу резултата приказаних у петом поглављу, Оникс је веома еластичан па су настала издужења веома велика и после прекида експеримента се види да је удео еластичних деформација веома велики. Овако велика одступања између апроксимације и криве се објашњавају чињеницом да сви софтвери за нумеричку симулацију обраде деформисањем користе аналитичке апроксимације које су прилагођене опису понашања металних материјала. Понашање Оникса се доста разликује од понашања метала па коришћењем две могуће аналитичке апроксимације, није могуће прецизно апроксимирати његову криву течења. Са слике 7.2 се види да је та разлика у прихватљивим границама за мале вредности деформације какве су очекиване у овом случају обликовања полимерним алатима па ће ова апроксимација бити коришћена у наставку истраживања.

Улазни подаци за оба нумеричка експеримента приказани су у табели 7.1. Симулације су урађене као 2D раванске, са крутим и деформабилним алатима. Коришћењем 2D симулације значајно се скраћује време прорачуна. Трење у процесу савијања дефинисано је коришћењем Кулоновог закона трења односно трења клизања. Коришћена машина за испитивање материјала дефинисана је као хидраулична преса са брзином деформисања 5 mm/min. Коришћене су две врсте коначних елемената *Quadtree* и *Advancing front quad*, прва за лим а друга за деформабилне алате као што је препоручено у упутству софтвера. На местима где се очекују највећа напрезања мрежа је додатно уситњена коришћењем *Refinement box*-ева.

Табела 7.1 Улазни подаци за нумеричке експерименте

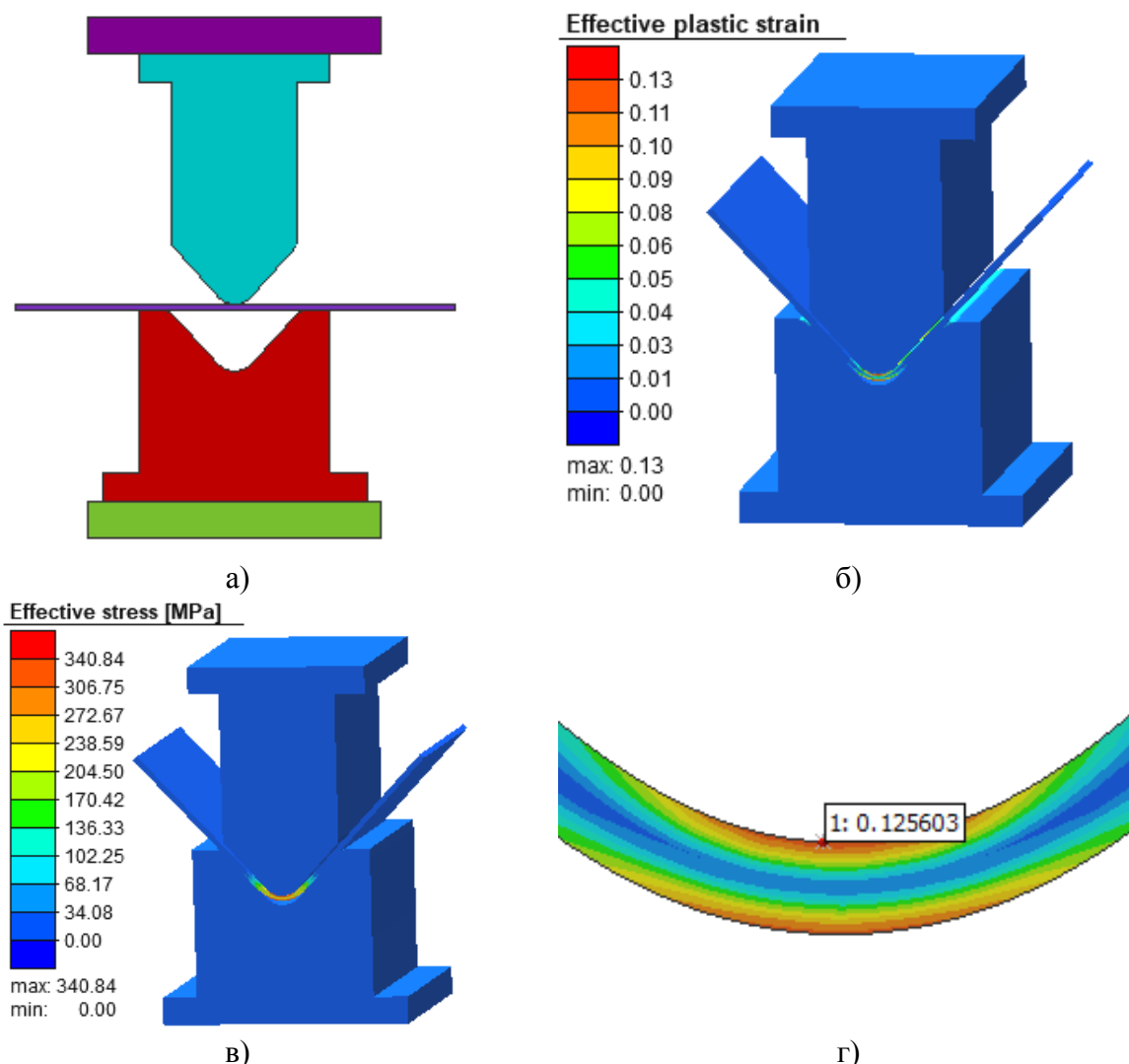
Карактеристика	Вредност
Тип симулације	2D - раванско
Услови трења	Кулонов модел трења Коефицијент трења $\mu = 0,1$
Машина	Хидраулична преса (0,083 mm/s)
Мрежа коначних елемената (лим)	<i>Quadtree</i>
Тип елемента (лим)	<i>Quads</i>
Величина елемента	0,1 mm (4200 елемената)
Мрежа коначних елемената (деформабилни алати)	<i>Advancing front quad</i>
Тип елемента (деформабилни алати)	<i>Quads</i>
Величина елемента (деформабилни алати)	0,3 mm (<i>Refinement box</i> : ниво 1)

7.1.2 Резултати нумеричких експеримената са алатом од ABS-a

Нумеричка симулација процеса савијања је припремљена према улазним подацима приказаним у табели 7.1. Настале деформације и напони на лиму и алатима приказани су на слици 7.3. Резултати нумеричких симулација су битни због провере оптерећења произведених алата и као улазни податак за тополошку оптимизацију.

На слици 7.3 а) приказан је модел процеса односно постављени алати и лим пре почетка операције савијања. Расподела ефективне пластичне деформације приказана је на слици 7.3 б). Дистрибуција ефективног напона на лиму и алатима приказана је на

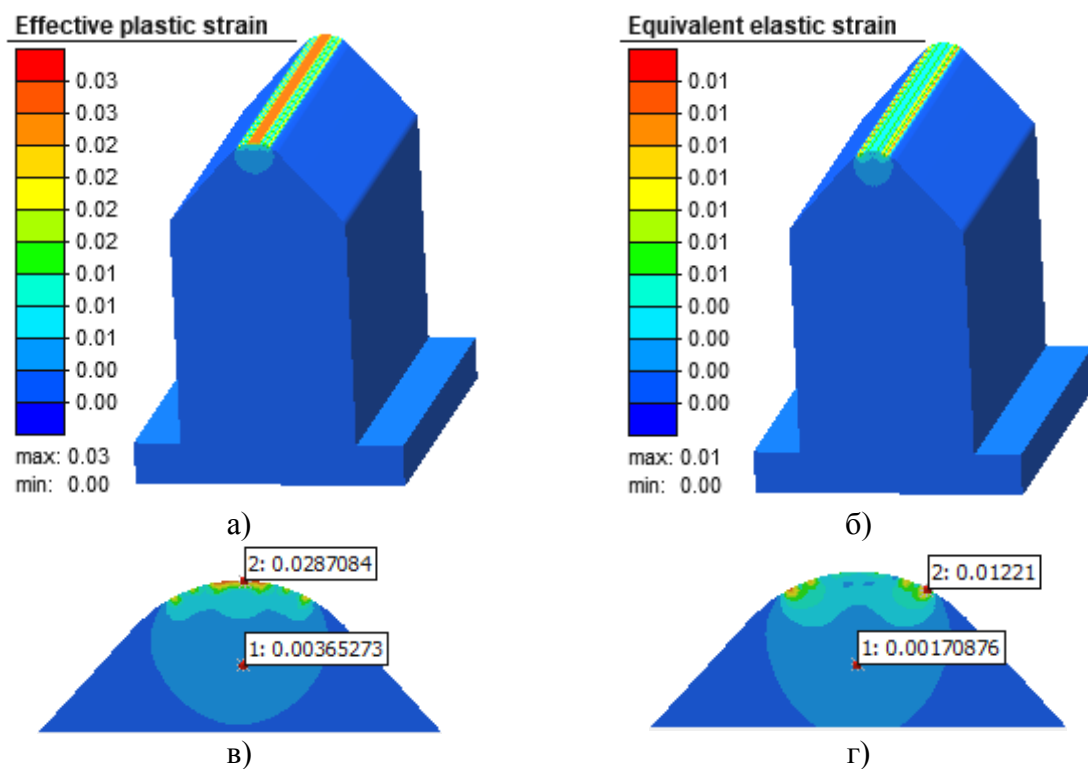
слици 7.3 в). Највећа вредност ефективног напона је 340 МПа. На слици 7.3 г) приказана је увећана зона савијања лима са дистрибуцијом ефективне пластичне деформације.



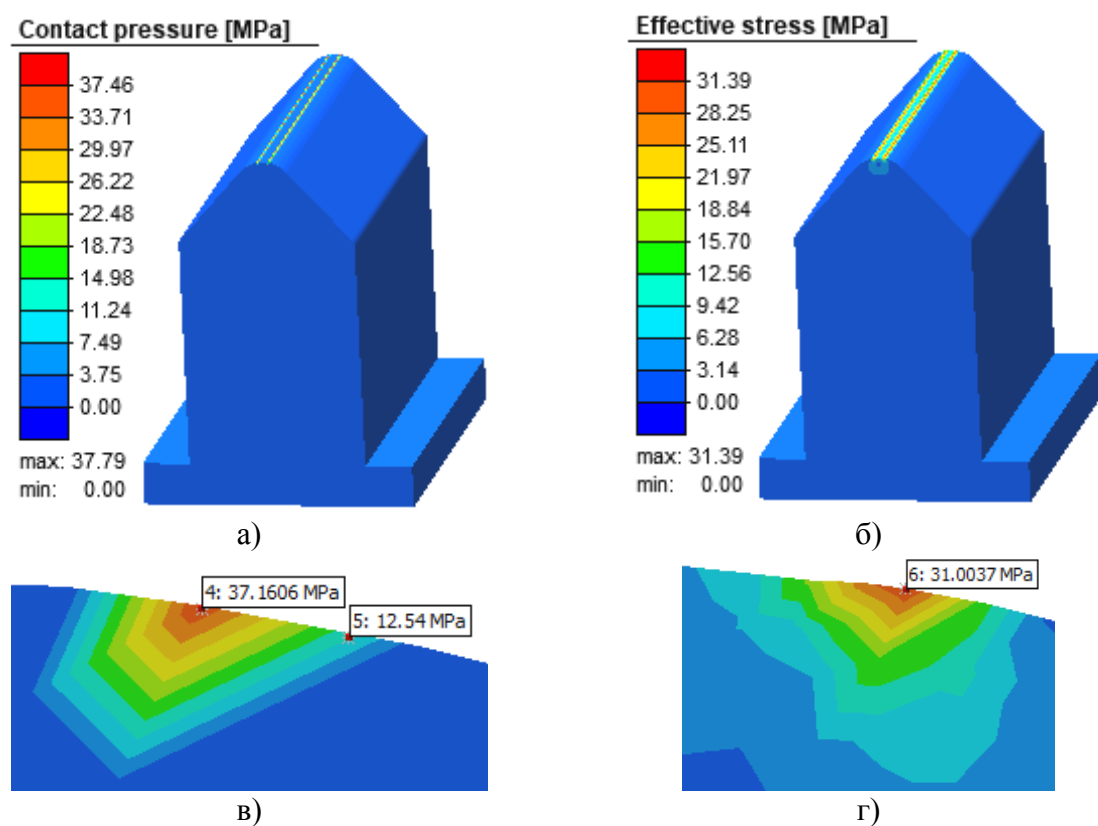
Слика 7.3 Савијање лима алатима од ABS-а: а) модел процеса б) ефективна пластична деформација в) ефективни напон и г) увећана зона савијања лима

Анализом резултата нумеричке симулације процеса савијања алатима од ABS-а закључено је да је процес савијања успешан односно да није дошло до разарања лима или појаве дефеката на алату. Резултати дистрибуције пластичне и еластичне деформације на обликачу приказани су на слици 7.4. Дистрибуција контактеног притиска и ефективног напона на обликачу приказана је на слици 7.5. Симулација је показала релативно мале деформације на обликачу, од неколико стотих, које свакако неће угрозити алат. Највеће вредности деформација су на радијусу обликача и на основу увећаног приказа види се да су концентрисане на малом подручју.

Напрезање обликача је највеће при радном ходу 5,4 mm када вредност контактеног притиска достиже 37,46 МПа а вредност ефективног напона 31,39 МПа. Вредности добијене нумеричком симулацијом коришћене су током тополошке оптимизације обликача. Дистрибуција контактеног притиска на обликачу приказана је на слици 7.5 а), дистрибуција ефективног напона на слици 7.5 б). На слици 7.5 в) и г) приказане су увећане зоне са највећим вредностима контактеног притиска и ефективног напона.



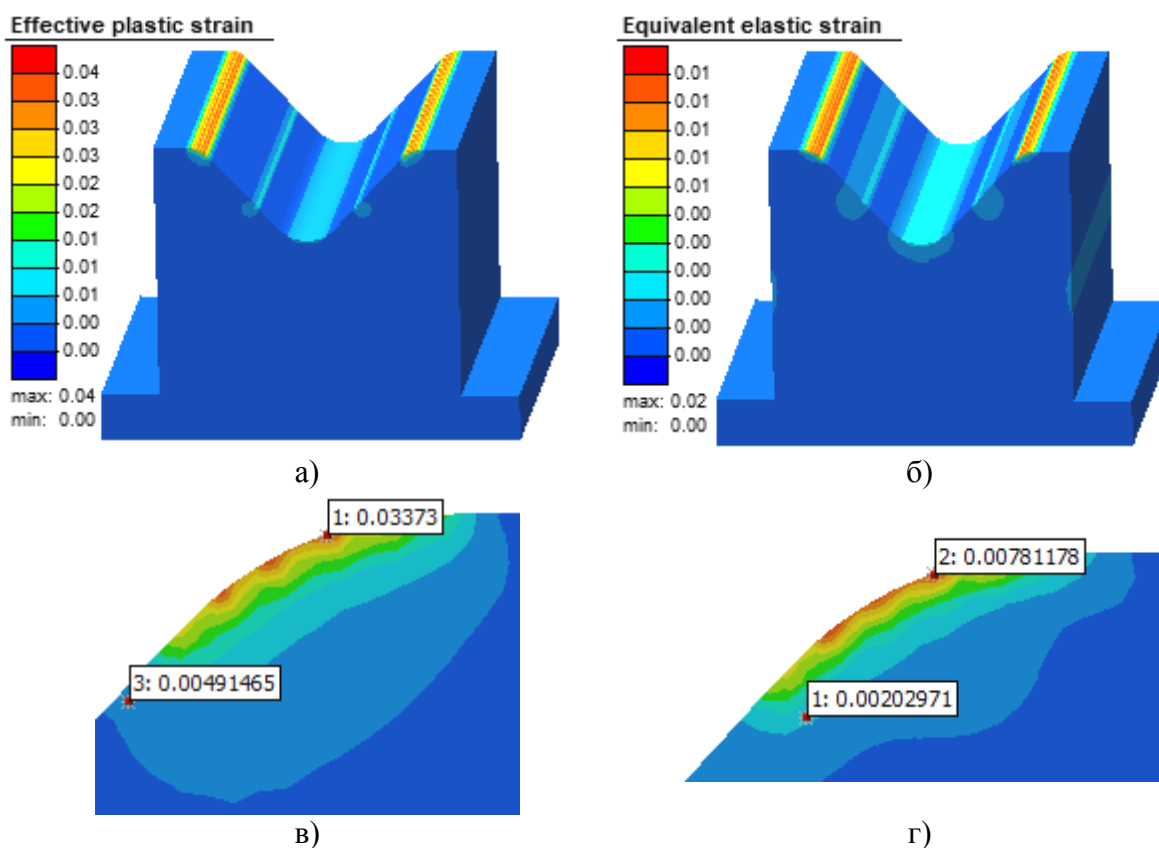
Слика 7.4 Деформације на обликачу од ABS-а: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација



Слика 7.5 Напрезања на обликачу од ABS-а: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон

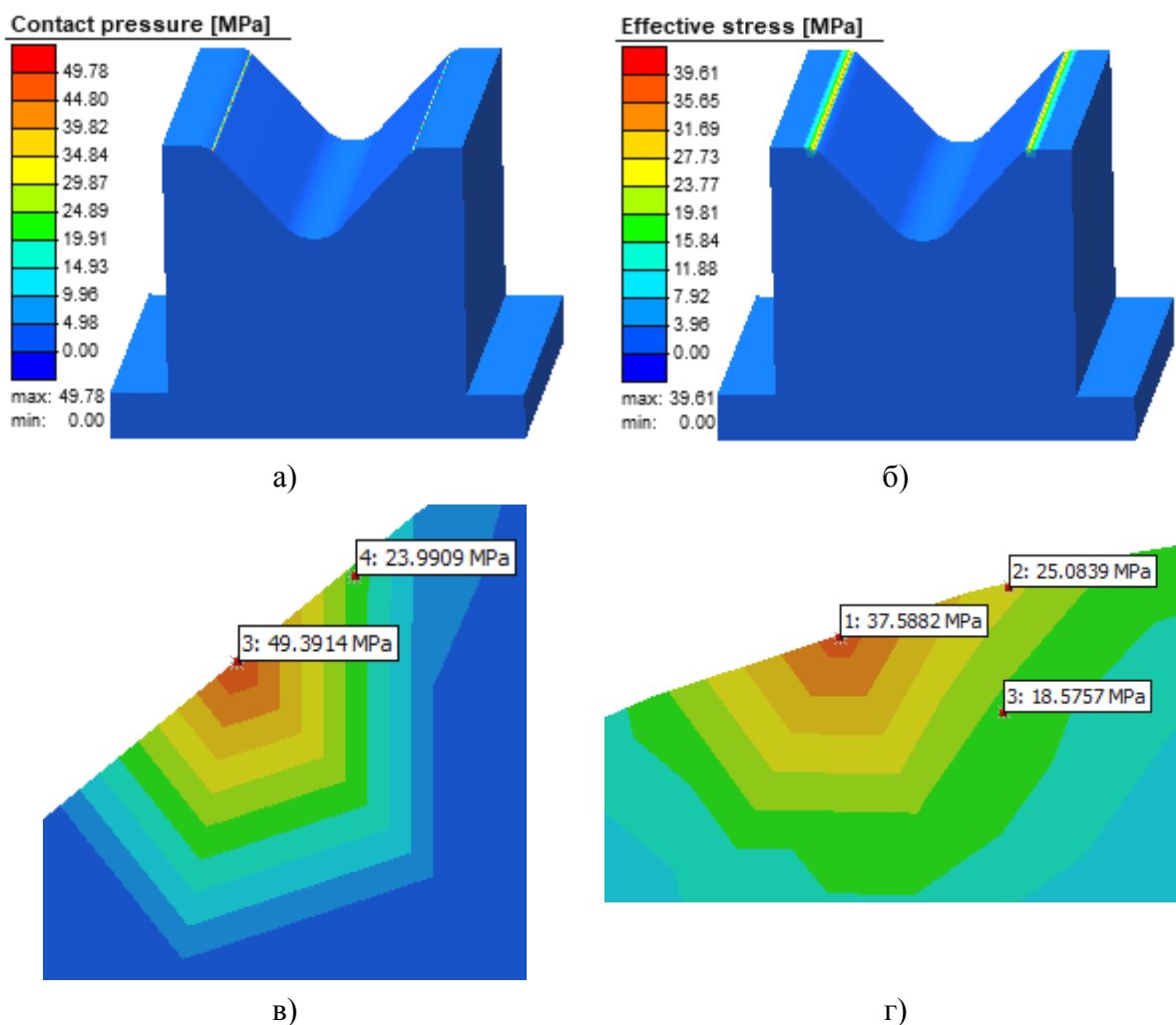
Деформације и напрезања на матрици направљеној од ABS-а приказане су на сликама 7.6 и 7.7. На слици 7.6 а) приказана је дистрибуција ефективне пластичне деформације а на слици 7.6 б) дистрибуција еластичне деформације. Резултати нумеричке симулације показују појаву малих деформација. Да би лакше биле анализирани добијене вредности дат је увећани приказ подручја у коме деформације постоје.

Увећани приказ расподеле пластичне деформације дат је на слици 7.6 в). Види се да се деформација јавља на малом подручју на радијусу заобљења. Постојање ове деформације се може објаснити малим одступањем тачности нумеричке симулације. Узрок може бити у величини елемената мреже или у дефинисању криве течења материјала. Као што је поменуто аналитичка апроксимација криве течења материјала је одређена за апроксимацију $K = C \cdot \varphi^n$ која апроксимира криву течења задовољавајуће али одређена одступања ипак постоје. Други разлог може бити у карактеристикама софтвера који је намењен пре свега обради метала чије механичке карактеристике су значајно боље него код полимерних.



Слика 7.6 Дистрибуција деформација у матрици од ABS-а: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација

Оптерећење матрице од ABS-а приказано је на слици 7.7. На слици 7.7 а) приказана је расподела контактеног притиска. Највећа вредност контактеног притиска је 49,78 МПа. На слици 7.7 б) приказана је расподела ефективног напона. Максимална вредност ефективног напона је 39 МПа. На слици 7.7 в) и г) дати су увећани прикази резултата. На увећаном приказу се види да су максималне вредности контактеног притиска и ефективног напона локалног карактера.



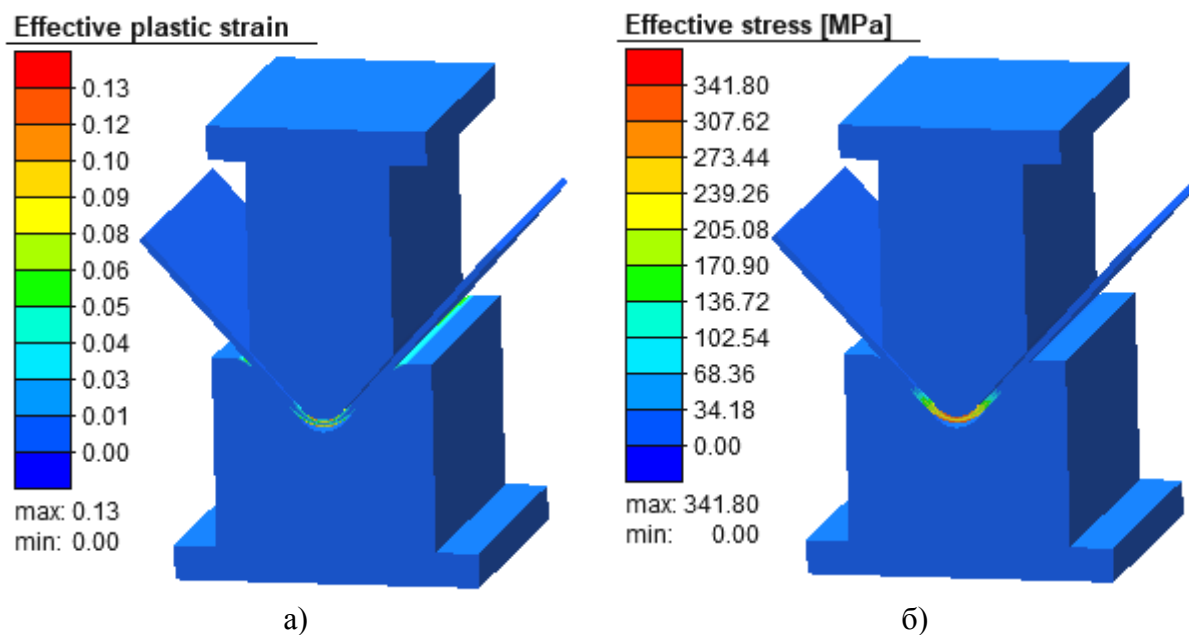
Слика 7.7 Напрезања на матрици од ABS-а: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон

7.1.3 Резултати нумеричких експеримената са алатом од Оникса

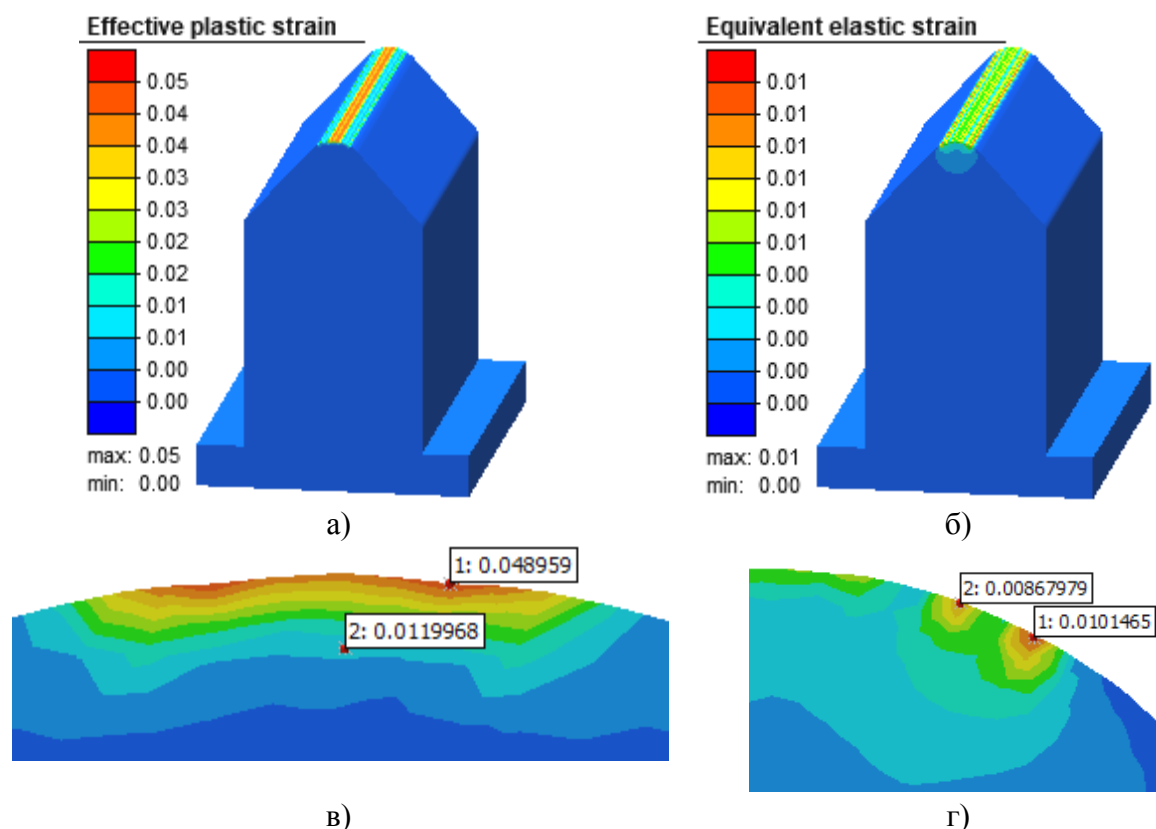
Нумеричка симулација поновљена је са алатима од материјала Оникс. Настале деформације и напони на лиму и алатима приказани су на слици 7.8. На слици 7.8 а) приказана је расподела ефективне пластичне деформације а на слици 7.8 б) расподела ефективног напона. Резултати су очекивани и не разликују се од резултата нумеричког експеримента са алатима од ABS-а.

Резултати нумеричке симулације за обликач приказани су на сликама 7.9 и 7.10. На слици 7.9 а) и б) приказана је дистрибуција пластичне и еластичне деформације на обликачу. На слици 7.9 в) и г) приказане су увећане зоне на којима се деформација појавила.

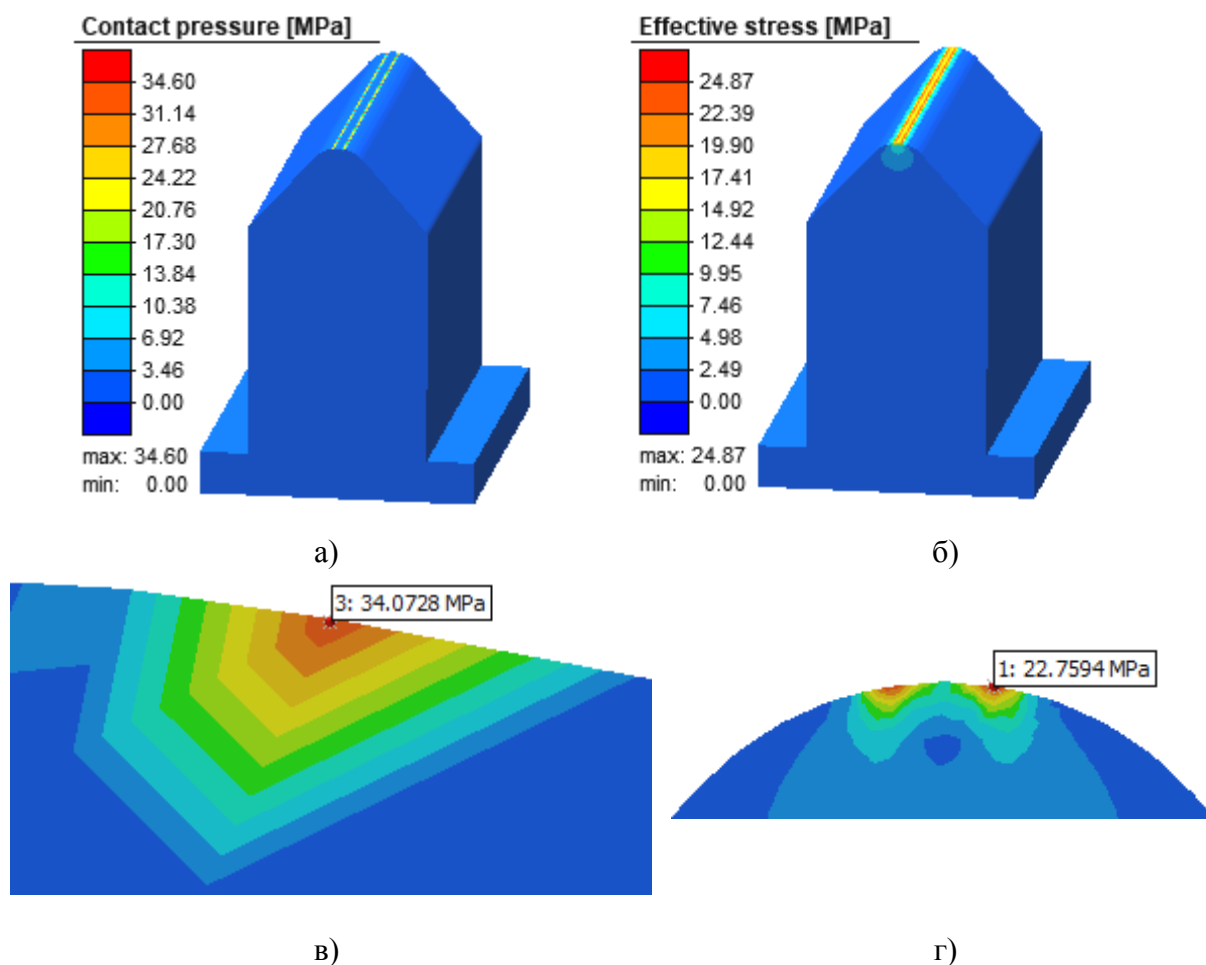
Увећана зона је приказана из истог разлога као у случају алата од ABS-а, да би било лакше анализирати утицај и разлог настајања ове деформације. Закључци су исти као у случају алата од ABS-а, деформација је локализована на веома малом подручју на површини дела. Разлози настајања ове деформације су исти као код алата од ABS-а.



Слика 7.8 Резултати нумеричке симулације процеса савијања алатима од Оникса: а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон



Слика 7.9 Дистрибуција деформација у обликачу од Оникса а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација

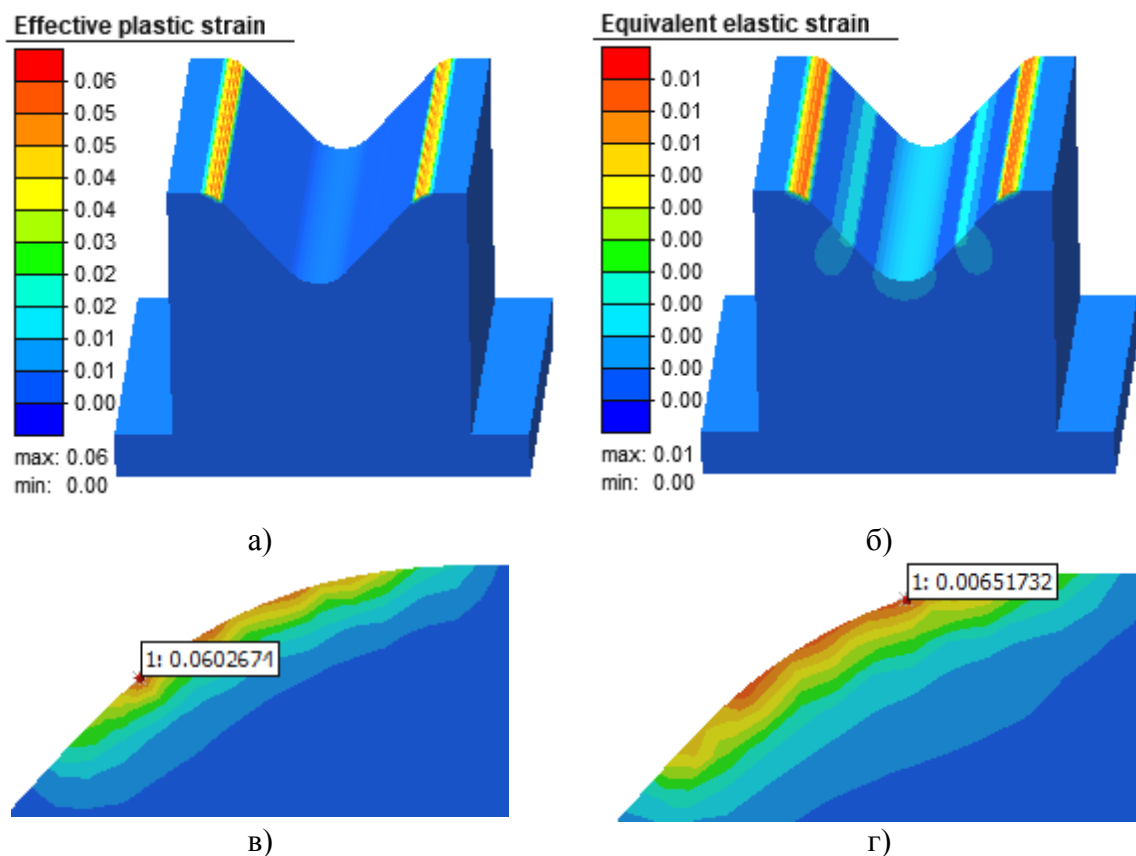


Слика 7.10 Напрезања на обликачу: а) контактни притисак б) ефективни напон
 в) контактни притисак г) ефективни напон

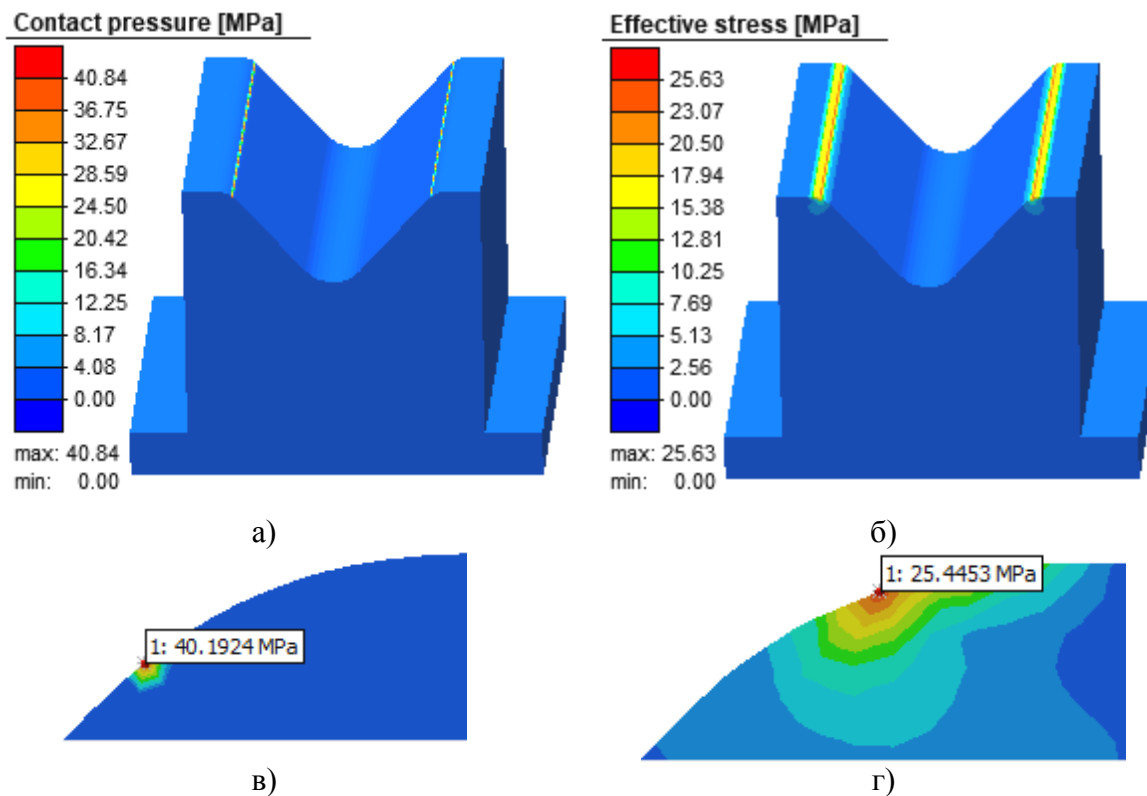
Резултати нумеричке симулације који показују оптерећење обликача од Оникса приказани су на слици 7.10. Расподела контактнoг притиска на обликачу приказана је на слици 7.10 а). Максимална вредност контактнoг притиска 34,6 МПа. Расподела ефективнoг напона на обликачу приказана је на слици 7.10 б). Максимална вредност ефективнoг напона је 24,87 МПа. На слици 7.10 в) и г) дат је увећан приказ зоне у којој се јављају највеће вредности контактнoг притиска и ефективнoг напона. Као у претходном случају и овде се види да су максималне вредности локализоване на малом простору.

Резултати нумеричке симулације за деформације и напрезања на матрици од Оникса приказани су на сликама 7.11 и 7.12. Расподела ефективне пластичне и еластичне деформације приказана је на слици 7.11 а) и б) док је увећана зона приказана на истој слици под в) и г). Вредности деформације су нешто веће него код ABS-а што се објашњава већом еластичношћу Оникса.

На слици 7.12 а) приказана је расподела контактнoг притиска чија максимална вредност износи 40,84 МПа. На слици под б) приказана је расподела ефективнoг напона где је максимална вредност 25,63 МПа. На слици под в) и г) приказана је увећана зона у којој су вредности деформације, контактнoг притиска и ефективнoг напона највеће.



Слика 7.11 Дистрибуција деформација у матрици: а) ефективна пластична деформација б) еластична деформација в) ефективна пластична деформација г) еластична деформација

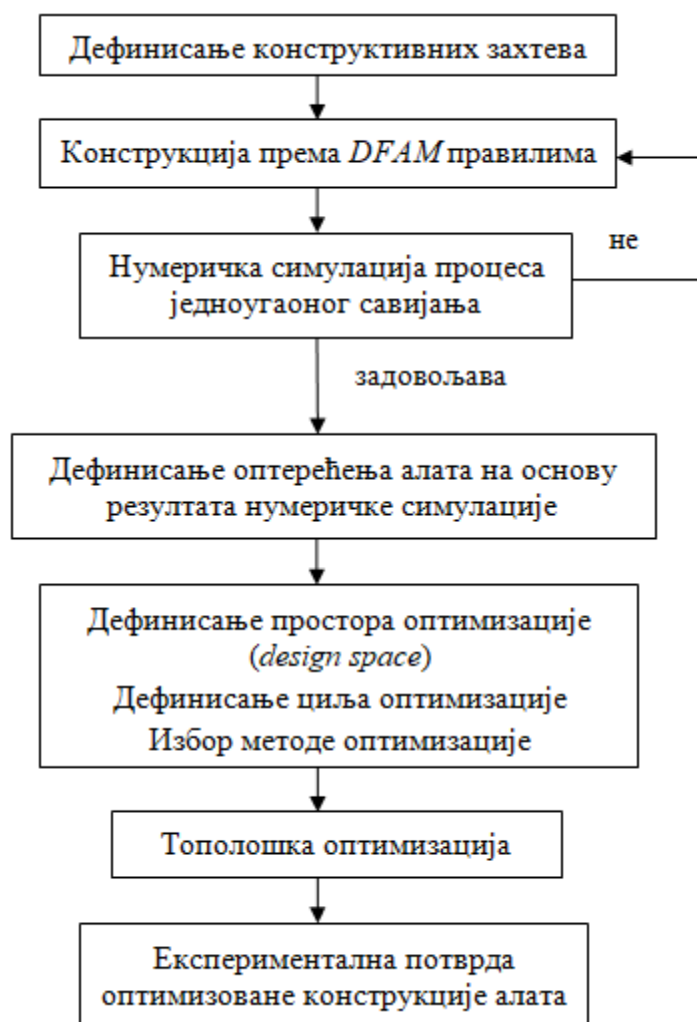


Слика 7.12 Напрезања на матрици: а) контактни притисак б) ефективни напон в) контактни притисак г) ефективни напон

Настале деформације на алату израђеном од Оникса су мало веће него у случају алата од ABS-а што је и очекивано с обзиром на понашање материјала које је уочено током испитивања механичких карактеристика. Испитивање тестовима затезања и притискивања је показало да материјал Оникс има већу еластичност од ABS-а. Вредности контактнoг притиска и ефективног напона су нешто мање али су зато вредности насталих деформација нешто веће. Због свега наведеног закључено је да штампање алата од Оникса треба урадити са одређеним бројем ојачаних слојева.

7.2 Тополошка оптимизација радних компоненти алата за једноугаоно савијање на основу нумеричког модела

Конструкција радних елемената полимерних алата коришћена у претходном нумеричком експерименту је детаљно анализирана и тополошки оптимизирана. Резултати нумеричке симулације као што су дистрибуција деформације и напрезања представљају један од главних података за успешну реализацију тополошке оптимизације.



Слика 7.13 Методологија тополошке оптимизације алата

Да би тополошки оптимизирана компонента алата могла да се адитивно произведе неопходно је водити рачуна о правилима конструисања делова за технологију депоновања топљеног материјала (FDM). Ограничења технологије заправо

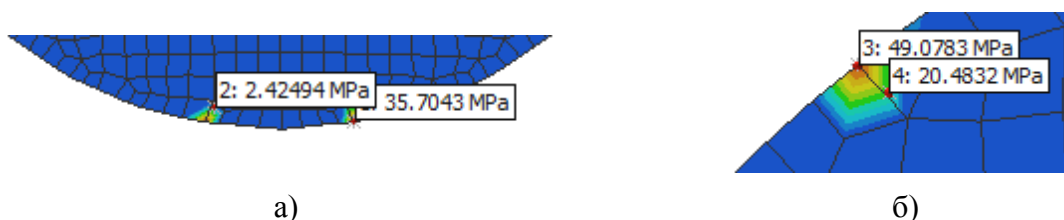
представљају скуп правила конструисања делова (DFAM) која су представљена у теоријском делу у одељку 4.2.

Улазни подаци за тополошку оптимизацију су геометрија алата, механичке карактеристике материјала и оптерећења која током процеса делују на алат. Геометрија алата је детаљно већ описана у претходном поглављу. Механичке карактеристике коришћених материјала (затезна чврстоћа, напон на граници течења, модул еластичности, крива течења) одређене су тестовима једноосног затезања и притискивања приказаним у поглављу 5. Оптерећење алата одређено је нумеричком симулацијом коришћењем методе коначних елемената (одељак 6.4). За одређивање оптерећења алата и потенцијалних еластичних деформација коришћен је софтвер *Simufact.forming*. Методолошки приступ у тополошкој оптимизацији алата приказан је на слици 7.13.

Тополошка оптимизација матрице и обликача урађена је у софтверу *nTopology*. Модел алата креиран у *Solidworks*-у се без промене екстензије учитава у софтвер и после тога могуће је дефинисати оптерећења и оптерећене површине.

7.2.1 Дефинисање оптерећења алата

На основу резултата нумеричких симулација у софтверу *Simufact.forming* дефинисано је оптерећење које ће бити задато током тополошке оптимизације. Сила је одређена на основу вредности контактеног притиска и вектора контактеног притиска. Максимална вредност контактеног притиска на обликачу је 37,79 МПа а на матрици 49,78 МПа. Највећи притисак је на радијусима који су приказани на слици 7.14. Вредност силе ће бити одређена за тренутак процеса савијања када је оптерећење највеће.



Слика 7.14 Контактни притисци на: а) обликачу и б) матрици

Да би сила била правилно одређена коришћена је опција вектор контактеног притиска да би поред интензитета били одређени правац и смер. Изглед вектора контактеног притиска приказан је на слици 7.15. Вектор контактеног притиска је компонента тензора напона који делује управно на контактну површину између тела у контакту. Вектор контактеног притиска може бити приказан само за површину.

Контактни притисак је једнак количнику силе и површине на коју делује према обрасцу:

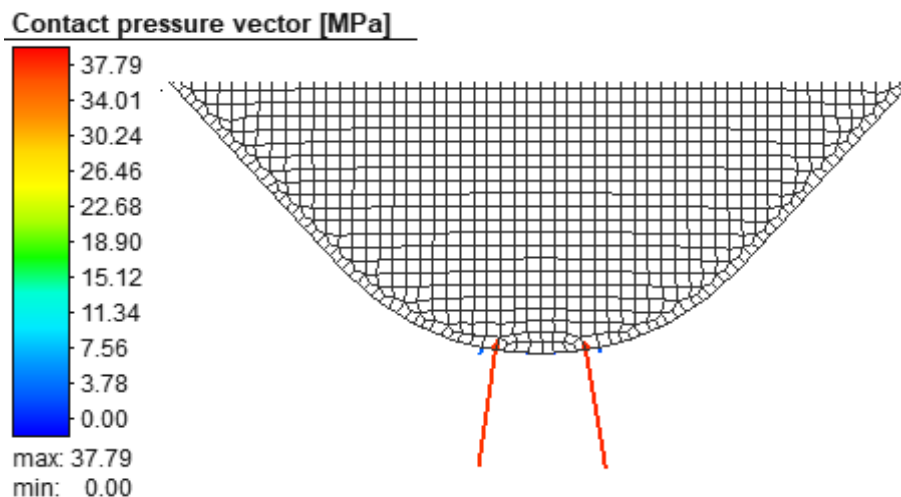
$$p = \frac{F}{A}. \quad 7.1$$

Из претходног обрасца следи да је сила која делује на обликач F_O и матрицу F_M :

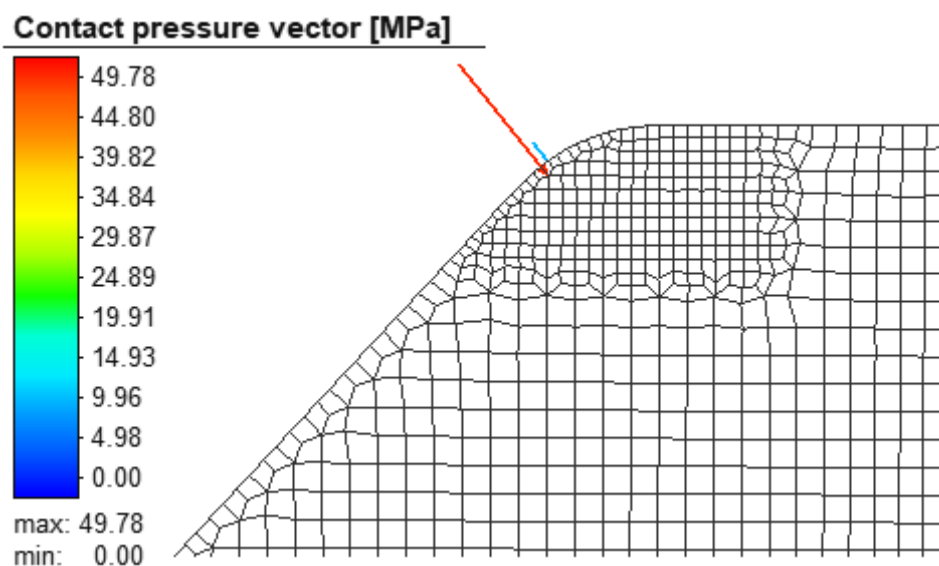
$$F_O = p_O \cdot A_O = 37,79 \frac{N}{mm^2} \cdot 4,625 mm^2 = 174,77N; \quad 7.2$$

$$F_M = p_M \cdot A_M = 49,78 \frac{N}{mm^2} \cdot 3,5 mm^2 = 174,23N. \quad 7.3$$

Вредност површина A_O и A_M се добија мерењем на моделима радних делова алата у софтверу *Simufact.forming*.



а)



б)

Слика 7.15 Вектор контактнoг притиска на: а) обликачу б) матрици

7.2.2 Параметри тополошке оптимизације

Коришћени софтвер *nTopology* се заснива на имплицитном моделирању чиме је време прорачуна и учитавања модела значајно смањено. Да би тополошка оптимизација била реализована потребно је дефинисати МКЕ модел односно дискретизовати запремину анализираног дела коначним елементима и дефинисати граничне услове.

Гранични услови подразумевају површине или области које су ослонци или су оптерећене.

Поред поменутих услова треба дефинисати циљ или одзив оптимизације и ограничења. У софтверима за оптимизацију користи се неколико одзива симулације [nTop]:

- одзив усклађености структуре (*Structural Compliance Response*),
- одзив напона (*Stress Response*),
- одзив померања (*Displacement Response*) и
- одзив запреминског удела (*Volume Fraction Response*).

Циљ усклађености структуре је остваривање максималне крутости дела иако се маса дела смањује. Одзив напона регулише вредност Вон-Мизесовог напона током оптимизације и регулише да после оптимизације при дефинисаним оптерећењима на оптимизованом делу не дође до прекорачења задате вредности напона. Одзив померање процењује максимално померање чвора при задатом оптерећењу при свакој итерацији тополошке оптимизације. Одзив запреминског удела представља однос запремине оптимизованог дела и почетног дела. Дефинисањем вредности на пример 0,4 за запремински удео значи да ће оптимизовани део имати запремину 40% почетног дела или мање од тога.

Циљ оптимизације представља заправо начин да се дефинише одзив симулације, односно да ли је неку карактеристику потребно свести на минимум или максимум. Према [nTop] највише се као циљ поставља оптимизација крутости, а ређе напон и померање. Оптимизација крутости захтева најмање времена за прорачун јер када су као циљ дефинисани напон и померање статичка анализа се ради при свакој итерацији.

На крају дефинисања услова потребно је одредити ограничења. Ограничења при ТО се дефинишу у виду блокова:

- ограничење одзива (*Design response constraint*),
- дефинисање пасивних региона (*Passive region constraint*),
- ограничења истискивања (*Extrusion constraint*),
- ограничења симетричности (*Planar symmetry constraint*),
- ограничење препуста (*Overhang constraint*) и
- ограничење понављања (*Pattern repetition constraint*).

Ограничење одзива представља квантитативно ограничење одређеног блока одзива, на пример ограничење запремине оптимизованог дела на 50% запремине почетног, ограничење да напон у одређеном региону не пређе дефинисану вредност нпр. 50 МПа или ограничење да померање чвора у неком региону не буде веће од 1 mm.

Дефинисање пасивних региона подразумева да се одреде региони на почетној запремини који неће бити укључени у процес оптимизације.

Ограничење истискивања подразумева да ће оптимизовани део бити константног профила дуж задате линије.

Ограничење симетричности се користи када је потребно да оптимизовани део буде симетричан због улоге дела.

Ограничење препуста дефинише угао који странице оптимизованог дела заклапају са подлогом и користи се у случајевима када ће оптимизовани део бити направљен помоћу адитивних технологија нарочито *FDM* технологије.

Ограничење понављања омогућава да на оптимизованом делу буде поштована правилност (шаблон) која постоји на почетном делу.

У овом случају тополошки су оптимизовани матрица и обликач а коришћени су параметри оптимизације приказани у табели 7.2.

Табела 7.2 Параметри тополошке оптимизације матрице и обликача

Алат	матрица, обликач
МКЕ модел	- МКЕ мрежа (запреминска мрежа, дужина ивице 2 mm) - карактеристике материјала (<i>ABS</i>)
Гранични услови	- оптерећени чворови (<i>FE face boundary</i>) - ограничени чворови (<i>FE face boundary</i>)
Циљ	- одржавање исте крутости - уз смањење масе
Ограничења	- ограничење одзива - <i>Volume fraction constraint</i> 0,3-0,5 - <i>Stress constraint</i> - R_p / степен сигурности 1,1 - ограничења симетричности - ограничење препуста (<i>DFAM</i>) - 45°

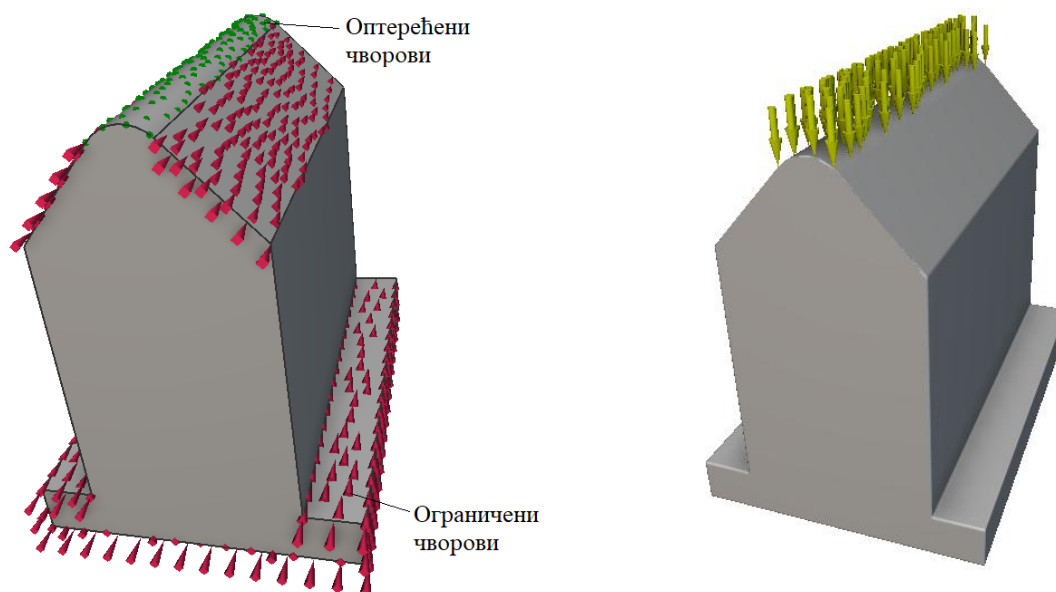
7.2.3 Тополошка оптимизација обликача

На обликачу су дефинисана два региона, ограничени и оптерећени чворови. Ограничења су постављена на површинама и припадајућим чворовима који су битни за правилно стежање лима и обликача. Оптерећени чворови се налазе на радијусу $r=3,2$ mm који је оптерећен и све време у контакту са лимом. На обликачу оптерећен је само радијус и оптерећење ће бити дефинисано на основу резултата симулације у *Simufact.forming*-у. Оптерећење које обликач трпи дефинисано је помоћу опције *Force*. На слици 7.16 приказано је оптерећење обликача дефинисано у софтверу *nTopology*.

Као што је наведено у табели 7.2, за циљ тополошке оптимизације изабрано је одржање крутости уз смањење масе (*Structural compliance response*). Поред циља дефинисана су и четири ограничења: ограничење запремине, ограничење симетричности, ограничење препуста и ограничење напона.

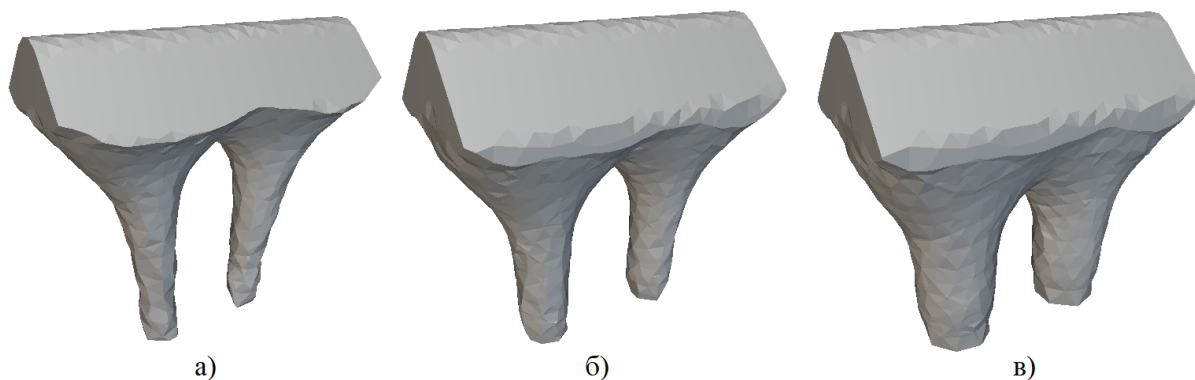
Ограничење симетричности је уведено за сваки случај иако је очекивано да софтвер због оптимизације крутости направи симетричан облик. Ограничење препуста је дефинисано да би правила дизајна за адитивну производњу била задовољена (*DFAM*). Доња површина обликача дефинисана је као подлога и вредност дозвољеног угла је 45°. Вредност угла (*Overhangs*) дефинисан је у упутству за коришћење штампача *Makerbot replicator 2X* [Makerbot]. Ова вредност угла је одабрана да би део могао да буде направљен *FDM* технологијом, то је *DFAM* правило за избегавање потпорне структуре где се угао мери у односу на вертикалу. Вредност напона је ограничена на вредност напона на граници течења да би се спречила појава пластичних деформација у алатима током процеса савијања. Пошто је вредност напона на граници течења параметар при оптимизацији и има вредност 38,24 МПа, потребно је одредити вредност фактора

сигурности тако да алат не буде угрожен али и да резултат оптимизације буде значајан. Изабрана је вредност фактора сигурности 1,1 па је дозвољена вредност напона 34,76 МПа. Вредност ограничења запремине је постављена на 0,3 али може бити повећана до вредности која омогућава да и остала ограничења буду задовољена.



Слика 7.16 Дефинисање граничних услова на обликачу (лево) и оптерећења (десно)

Због дужине трајања процеса тополошке оптимизације број итерација је ограничен на 100. Резултат тополошке оптимизације геометрије обликача приказан је на слици 7.17.

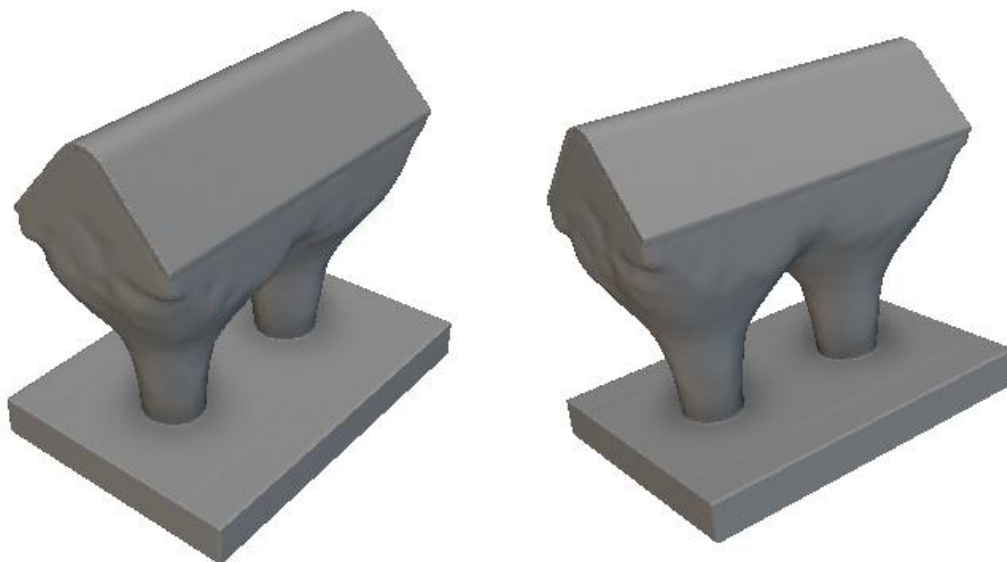


Слика 7.17 Резултат тополошке оптимизације обликача за различите вредности ограничења запремине: а) 0,3 б) 0,4 в) 0,5

За вредност запреминског ограничења 0,3 тополошка оптимизација је завршена у 72. итерацији, за 0,4 у 59. и за 0,5 у 52. итерацији. Проверу тополошки оптимизованих алата за једноугаоно савијање од полимера могуће је урадити статичком МКЕ анализом у софтверу *nTopology* или симулацијом процеса савијања лима са деформабилним полимерним и тополошки оптимизованим алатима у софтверу *Simufact forming*.

Анализом резултата тополошке оптимизације одређено је да је вредност ограничења запремине 0,4 најбоља за наставак рада. Постпроцесирање подразумева побољшање ТО модела, односно повећање глаткости површина да би после извоза део

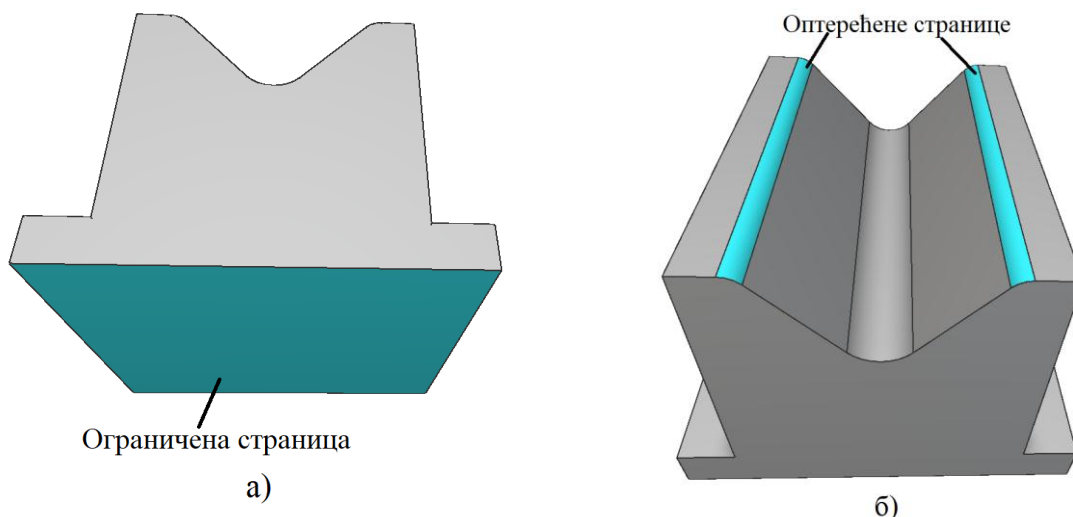
био погодан за коришћење у симулацијама и за адитивну производњу. За ту сврху, потребно је дефинисати пасивне регионе, односно додати делове који су неопходни за монтажу. Иако овакав начин рада смањује предности оптимизације због специфичности алата потребно је да доњи део алата ипак буде редизајниран и погодан за монтажу у постојећи алат. Изглед обликача после постпроцесирања ТО модела приказан је на слици 7.18.



Слика 7.18 Тополошки оптимизован обликач са додатком за монтирање у горњу плочу

7.2.4 Тополошка оптимизација матрице

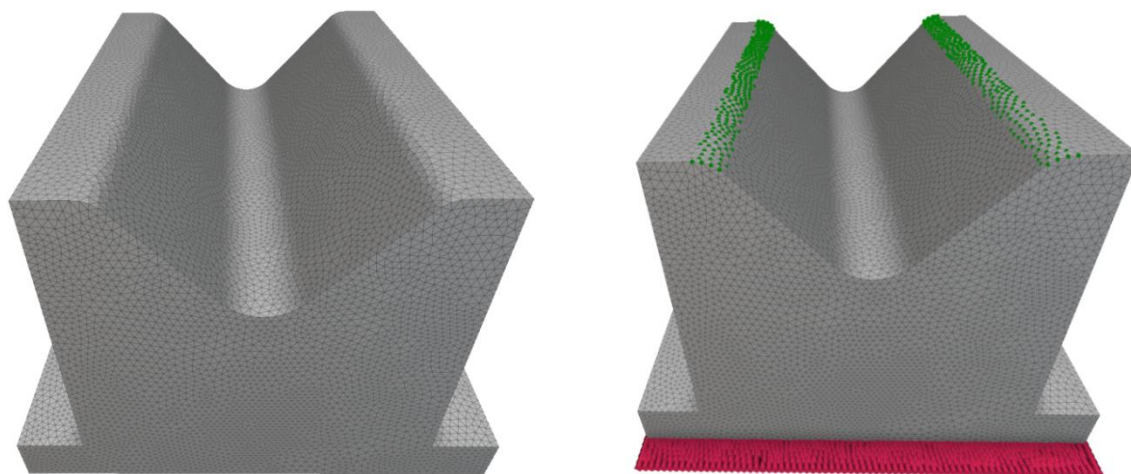
На матрици је дефинисано неколико важних површина, једна ограничена и две оптерећене. Ограничене површине су стране матрице које су у контакту са доњом плочом и стезачима. Оптерећене површине су површине на радијусу заобљења матрице $r=2\text{ mm}$ (слика 7.19).



Слика 7.19 Ограничене и оптерећене површине на матрици

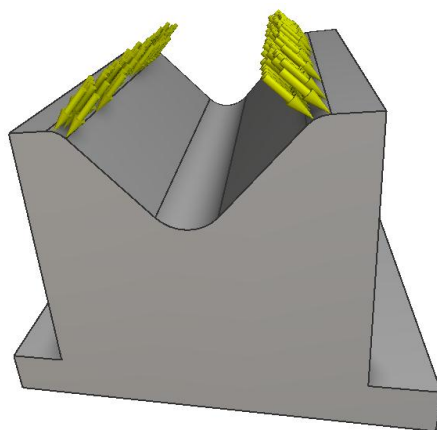
После дефинисања геометрије дефинисан је МКЕ модел. Од дефинисаног региона направљена је запреминска мрежа (*Volume mesh*). Дужина ивице (*Edge length*) дефинисана је као варијабилна променљива са вредношћу 2 mm чиме је од целе

запремине направљена мрежа са елементима троугаоног облика као што је приказано на слици. За креирање МКЕ модела потребни су мрежа преко целе запремине и дефинисане карактеристике материјала. Карактеристике материјала дефинисане су на основу података добијених испитивањем материјала, средњих вредности напона на граници течења и затезне чврстоће чије одређивање је приказано у петом поглављу. После дефинисања мреже дефинисани су гранични услови (*Boundary conditions*). Доња страна матрице је дефинисана као скуп непокретних чворова а радијуси полупречника 2 mm као група чворова који ће бити оптерећени. Изглед чворова приказан је на слици 7.20.



Слика 7.20 Мрежа коначних елемената на матрици у софтверу *nTopology* (лево) и непокретни и оптерећени чворови (десно)

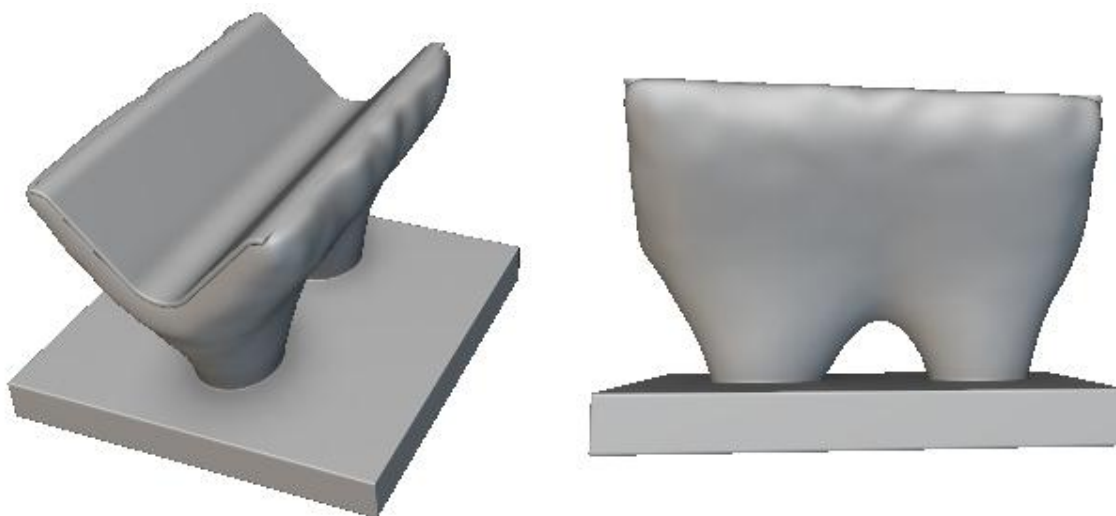
После дефинисања чворова који су оптерећени и оних који после оптимизације остају непромењени, потребно је дефинисати оптерећење које делује на матрицу током процеса једноугаоног савијања лима. На основу вредности контактеног притиска дефинисана је сила која је коришћена у тополошкој оптимизацији. Дефинисана сила приказана је на слици 7.21.



Слика 7.21 Силе које делују на матрицу

Први корак је дефинисање силе која делује на матрицу током процеса обликовања лима а затим су дефинисане површине које неће бити мењане током процеса. Тополошка оптимизација урађена је за три вредности ограничења запремине као у случају обликача (0,3; 0,4; 0,5). Изглед матрице после оптимизације за вредност ограничења запремине 0,4 приказан је на слици 7.22. На слици се види део са потпуно

равним странама које су неопходне за савијање лима. После оптимизације додат је део који служи за стезање.



Слика 7.22 Тополошки оптимизована матрица

7.3 Адитивна производња радних компоненти алата за једноугаоно савијање лима

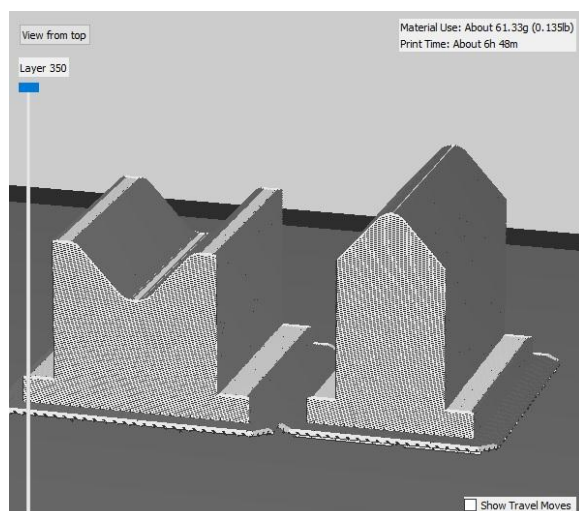
Три комплекта радних елемената алата од полимера су адитивно произведена на основу 3D модела:

- обликач са углом од 84° и матрица са углом од 85° од ABS-а,
- обликач са углом од 84° и матрица са углом од 85° од Оникса и
- тополошки оптимизовани обликач и матрица од ABS-а

На основу резултата нумеричког експеримента приказаног у шестом поглављу најбоље решење при избору углова радних елемената је било 85° . Узимајући у обзир тачност израде, да не би дошло до налегања лима на обе стране и раста силе, одлучено је да угао обликача буде 84° јер се вредност угла савијања разликује у односу на најбоље решење само $0,02^\circ$. За све наведене 3D моделе матрице и обликача припремљени су *stl* фајлови потребни за адитивну производњу, у софтверу *CATIA* коришћењем модула *Machining - STL Rapid prototyping*. Мрежа је формирана помоћу опције *Tessellation* правилним избором параметара *Step* и *Sag*, чије вредности су одабране тако да геометријско одступање *stl* фајла од 3D модела буде минимално. *Sag* представља растојање између геометрије и троуглова и изабрана је вредност $0,01\text{ mm}$. Дефинисањем вредности *Step*-а одређују се дужине ивица троуглова које су у овом случају $0,2\text{ mm}$.

7.3.1 Адитивна производња компоненти алата од ABS-а

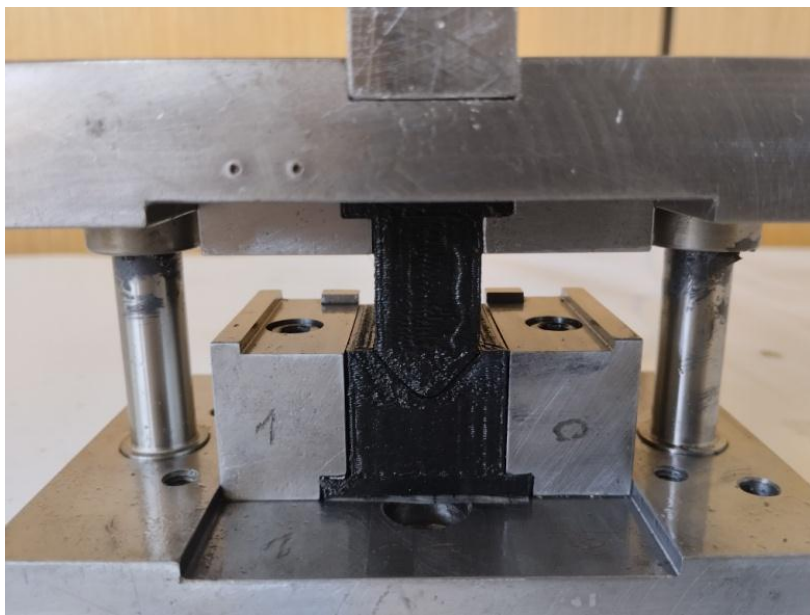
Полимерни алати од ABS-а су штампани на FDM штампачу *Makerbot replicator 2X*. У првом случају алати су израђени од ABS-а и табеларно су приказани потрошња материјала и време израде. Пошто при штампању долази до одређених одступања димензија (различита тачност дуж *x* и *y* осе) да би одступања била једнака матрица и обликач су штампани заједно. Положај штампања приказан је на слици 7.23. Параметри адитивне производње, потрошња материјала и време израде приказани су у табели 7.3.



Слика 7.23 Матрица и обликач приказани у софтверу Makerware

Табела 7.3 Потрошња и време израде радних делова алата на штампачу Makerbot replicator 2X (MBM1TU4O1I5P4B1S2)

	Параметри штампања	Време израде	Потрошња материјала
Матрица	дебљина слоја - 0,1 mm оријентација 45°/-45° брзина штампања 55 mm/s густина испуне 100%	3с 29мин	31,79 грама
Обликач		3с 16мин	29,52 грама
Матрица+обликач		6с 48мин	61,33 грама

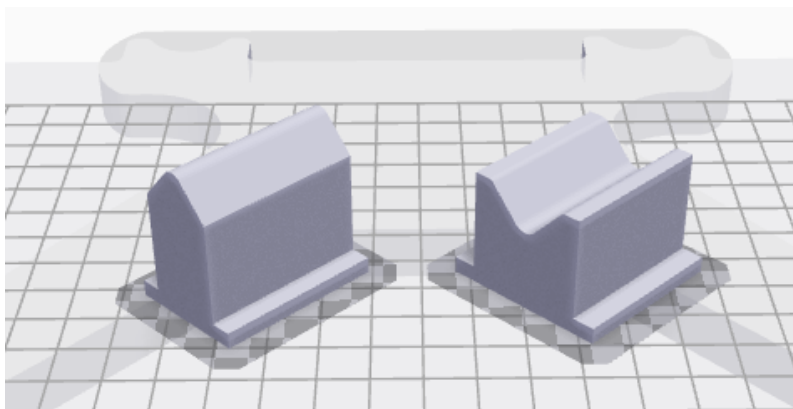


Слика 7.24 Матрица и обликач направљени од ABS-а

Након завршетка штампања алати су склоњени са стола машине и уклоњен је рафт. Површине које ће су битне за монтажу су брушене ситном шмирглом. После провере димензионе оптичким скенирањем тачности матрица и обликач монтирани су на алат и проверено је да ли су зазори одговарајући. Монтирани радни делови алата од ABS-а приказани су на слици 7.24.

7.3.2 Адитивна производња компоненти алата од Оникса ојачаног стакленим влакнима

У случају штампања са материјалом Оникс због велике еластичности материјала на критичном делу алата коришћено је ојачање стакленим влакнима. Коришћењем софтвера *Eiger* процењена је потрошња материјала Оникс са стакленим влакнима. Највеће вредности механичких карактеристика постигнуте су за оријентацију $0^\circ/90^\circ$ при потпуној испуни (слика 7.25). Угао штампања $0^\circ/90^\circ$ заправо представља угао између правца кретања главе која наноси истопљени материјал и осе x радног стола. Матрица и обликач на радном столу заузимају положај као на слици.



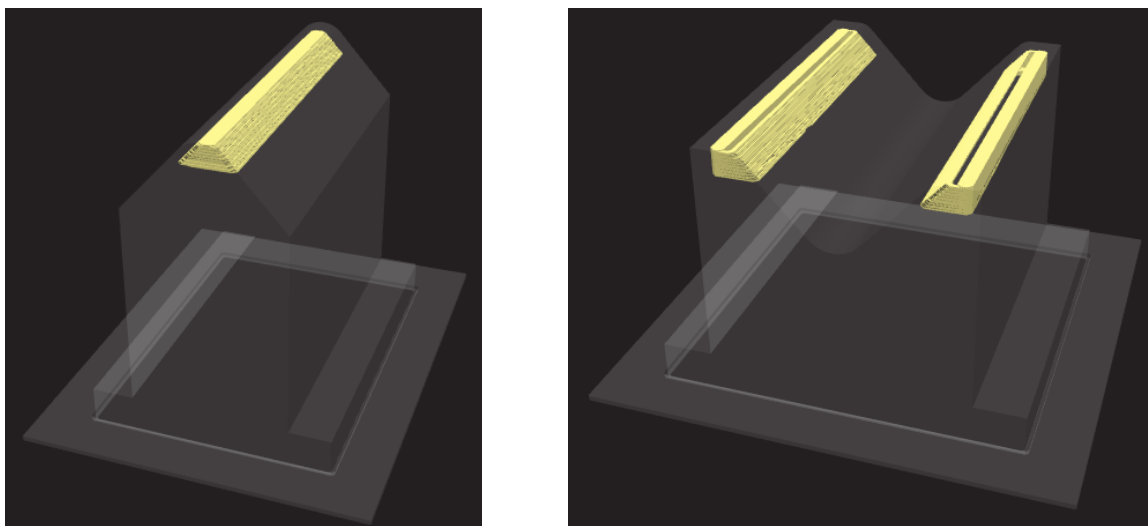
Слика 7.25 Положај обликача и матрице на радном столу штампача *Markforged Onyx Pro* у софтверу *Eiger*

Брзина штампања и дебљина слоја ($0,1\text{ mm}$) су дефинисани стандардом произвођача. Пошто материјал Оникс има велику еластичност потребно је дефинисати подручје које је ојачано стакленим влакнима да не би дошло до појаве деформација алата. На основу нумеричке анализе приказане у одељку 6.3.2 види се да је највеће напрезање на радијусу заобљења матрице $r=2\text{ mm}$ као што је приказано на сликама 6.27 и 6.28. Положај делова на радном столу приказан је на слици 7.26. Коришћено је концентрично ојачање са два концентрична прстена. На матрици су ојачана 32 слоја а на обликачу 31 слој. Због малих димензија слојеви ближи горњој површини алата имају по један прстен а остали по два концентрична прстена.

Табела 7.4 Потрошња материјала и време израде алата на *Markforged* – у када се користе ојачавајућа влакна

	Параметри штампања	Време израде	Потрошња материјала
Матрица	као претходни+ стаклена влакна	4с 30мин	$26,24\text{cm}^3$ Оникса + $0,41\text{cm}^3$ ст.влакна
Обликач		4с 32мин	$26,46\text{cm}^3$ Оникса + $0,23\text{cm}^3$ влакана
Матрица+ обликач		8с 9мин	$47,98\text{cm}^3$ Оникса+ $0,68\text{ст. влакана}$

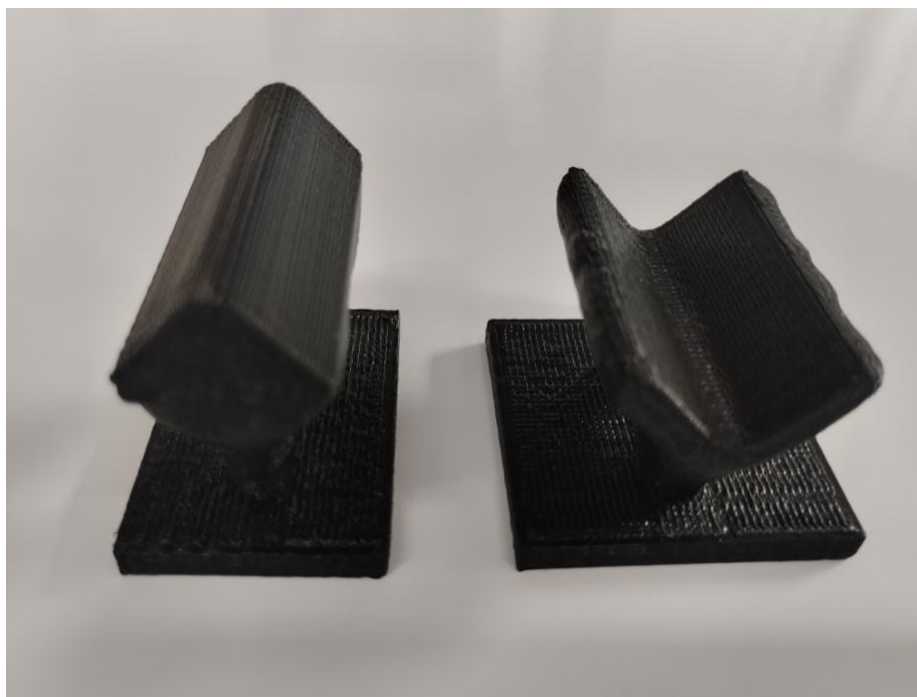
Потрошња материјала и време израде када су делови ојачани стакленим влакнима приказана је у табели 7.4 а изглед ојачаних радних елемената на слици 7.26.



Слика 7.26 Алати од Онукса са приказом ојачаних слојева у софтверу Eiger

7.3.3 Адитивна производња тополошки оптимизованих компоненти од ABS-а

Пошто су резултати симулације показали да тополошки оптимизовани алат може да задовољи услове операције савијања приступљено је изради. Анализирајући резултате експеримената одређивања механичких карактеристика приказаних у петом поглављу и експеримената савијања са адитивно произведеним полимерним алатима одлучено је да се за материјал тополошки оптимизованих радних елемената алата изабере ABS. Главни разлог је већа крутост материјала ABS. Алат је направљен на штампачу *Makerbot replicator 2X* са следећим параметрима: дебљина слоја - 0,1 mm, оријентација 45°/-45°, брзина штампања 55 mm/s и густина испуне 100%. Адитивно произведени матрица и обликач приказани су на слици 7.27. Потрошња материјала и време израде приказани су у табели 7.5.



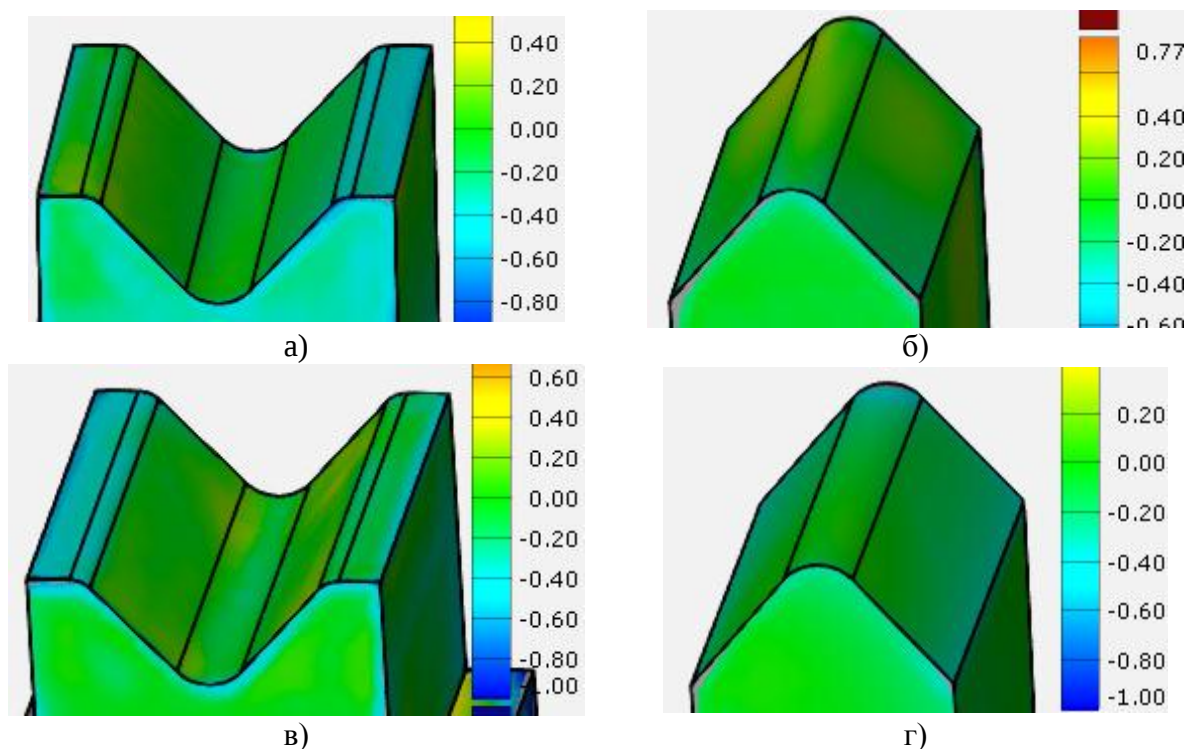
Слика 7.27 Тополошки оптимизовани радни елементи алата

Табела 7.5 Потрошња материјала и време израде тополошки оптимизованих радних елемената алата

	Потрошња материјала	Време штампања
Матрица	17,11 g	2 сата и 4 минута
Обликач	18,22 g	2 сата и 14 минута

7.3.4 Провера тачности адитивно произведених алата применом 3D скенера

Пре монтаже полимерних компоненти алата извршена је провера тачности алата упоређивањем са CAD моделом алата. Алати су скенирани 3D скенером David SLS 2. Облак тачака добијен скенирањем упоређен је са 3D моделом алата. Поређење делова урађено је у софтверу GOM Inspect и резултати су приказани на слици 7.28.



Слика 7.28 Упоређење CAD модела алата и облака тачака добијеног 3D скенирањем за: а) матрицу од ABS-а б) обликач од ABS-а в) матрицу од Оникса ојачану стакленим влакнима и г) обликач од Оникса ојачан стакленим влакнима

Провера тачности показала је да алати задовољавају очекивану тачност која код FDM технологије уноси око $\pm 0,2$ mm. Визуелним прегледом алата током монтирања закључено је да сви алати остварују добар контакт односно да је налегање задовољавајуће што ће експериментом бити доказано.

7.4 Експерименти једноугаоног савијања лима применом адитивно произведених алата

7.4.1 Резултати експеримената са радним елементима алата од ABS-а

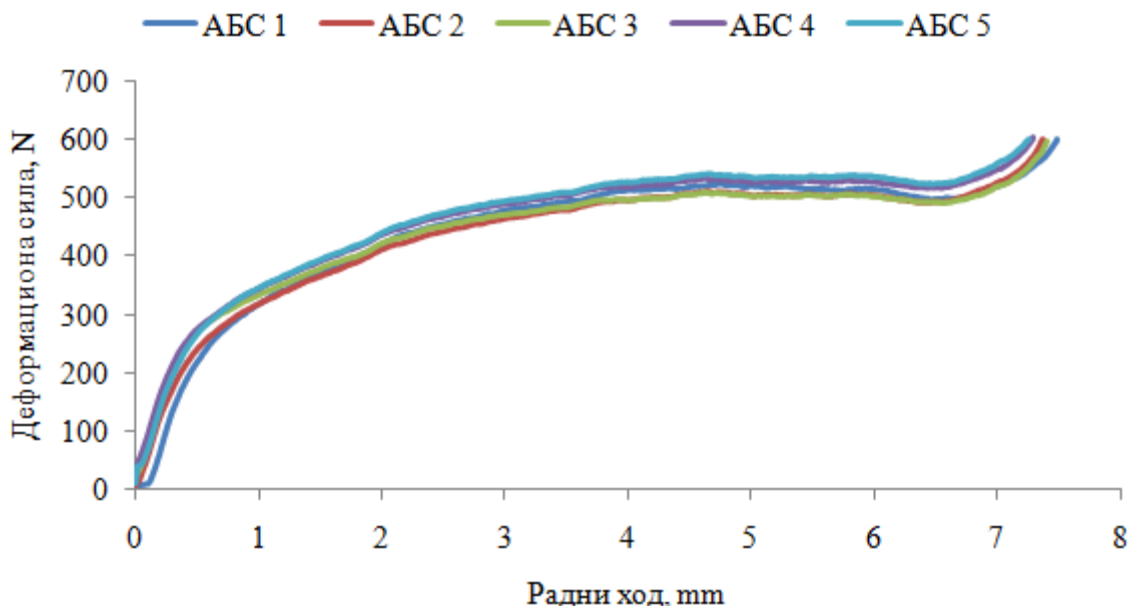
Експеримент је поновљен на машини Zwick/Roell Z100 са полимерним алатом од ABS-а. Током процеса савијања коришћењем софтвера testXpert урађена је аквизиција података односно снимљени су дијаграми деформациона сила – радни ход чије су вредности веома сличне као при савијању са металним алатом. Савијање алатом од

ABS-а приказано је на слици 7.29. Дијаграми су приказани на слици 7.30. На слици 7.30 приказани су дијаграми за пет поновљених експеримената.



Слика 7.29 Алат од ABS-а на почетку и током процеса савијања

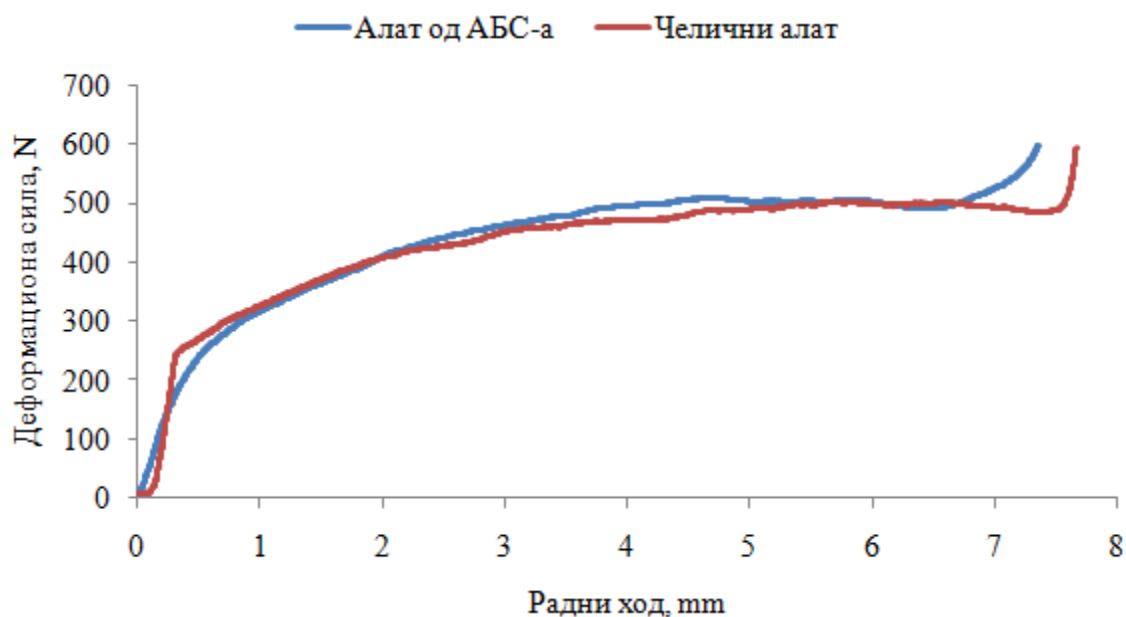
Експерименти су изведени са пет понављања у идентичним условима. Са слике 7.30 се види да је поновљивост добра. Разлика вредности деформационе силе или радног хода између поновљених експеримената настаје због трења између вођица и чауре.



Слика 7.30 Дијаграми деформациона сила – радни ход у процесу једноугаоног савијања у алату са радним компонентама адитивно произведеним од ABS-а

На слици 7.31 приказани су упоредни дијаграми деформационе силе у процесима једноугаоног савијања лима применом металних и адитивно произведених алата од ABS-а. Приметна је одређена разлика у току дијаграма и вредностима деформационе силе. Разлика се објашњава утицајем трења између вођица и чаура. Као што је у уводном експерименту показано (одељак 6.4, слика 6.31), вредности силе могу бити увећане услед трења у клизним елементима од 30 N до 70 N и примећено је да је она била нешто већа у експерименту реализованим са радним елементима од ABS-а. С обзиром да је вредност деформационе силе у експерименту ограничена на 600 N, већим вредностима силе изазване трењем брже се постиже максимална вредност силе односно савијање се прекида при мањим вредностима радног хода што доводи до нешто веће вредности угла савијања. Вредности измерених углова савијања приказане су у табели 7.6. Скенирање делова урађено је на начин описан у поделуци 6.2.1. Разлика у

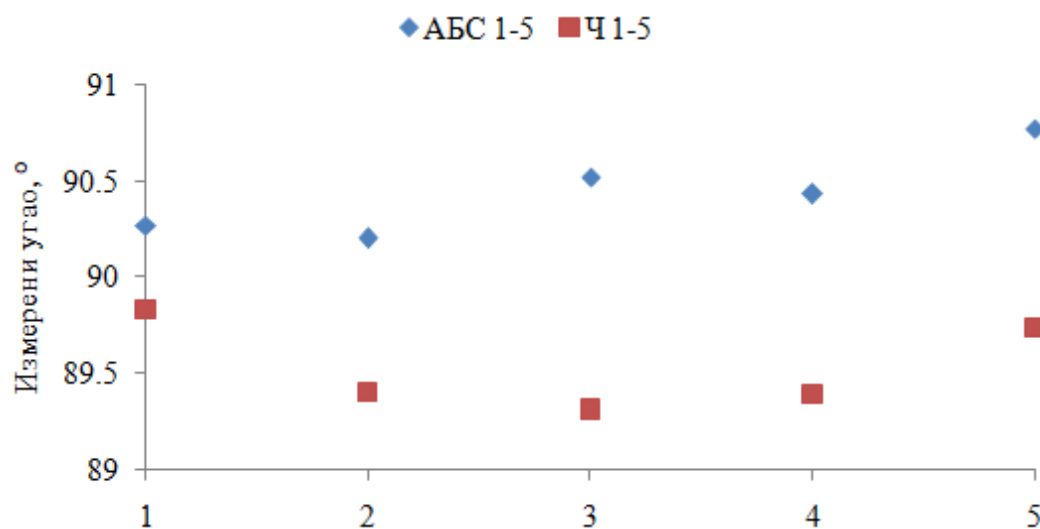
результатима измерених углова добијеним у експериментима када су алати направљени од ABS-а и челика приказана је на слици 7.32.



Слика 7.31 Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход у процесима једноугаоног савијања лима применом металних и адитивно произведених алата од ABS-а

Табела 7.6 Резултати експеримената једноугаоног савијања са полимерним радним елементима алата од ABS-а

Експеримент	Измерени угао	Угао - симулација	Одступање	
АБС1	90,27°	89.89°	0,38°	0,42%
АБС2	90,20°		0,31°	0,34%
АБС3	90,52°		0,63°	0,70%
АБС4	90,43°		0,54°	0,60%
АБС5	90,77°		0,88°	0,98%
Средња вредност	90,43°	/	0,54°	0,61%



Слика 7.32 Поређење добијених вредности угла

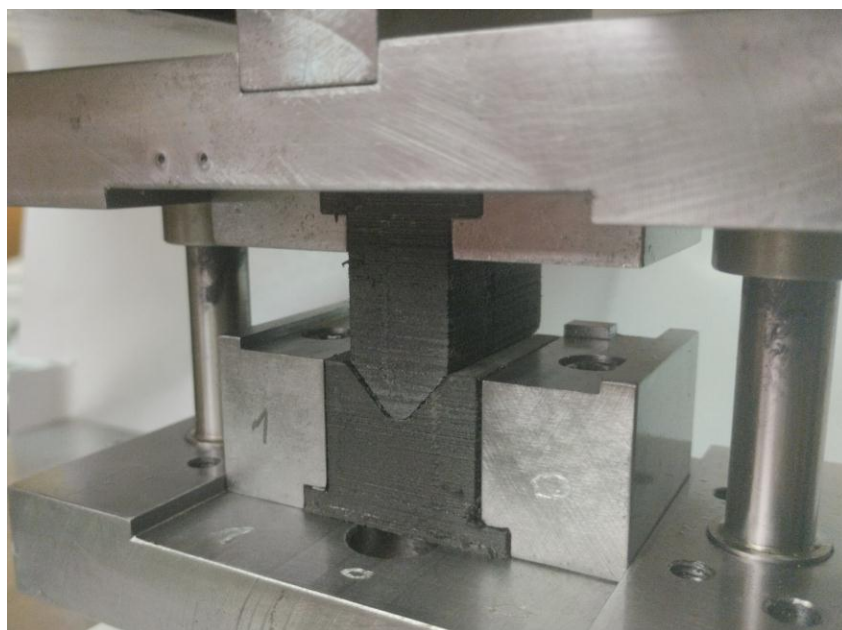
На основу резултата експеримената може се извести више закључака. С обзиром да не постоје оштећења на полимерним компонентама алата и да су измерене вредности углова задовољавајуће закључено је да је могућа замена металних компоненти алата полимерним добијених адитивном производњом. За правилно функционисање алата неопходно је да сви делови попут стезача буду израђени према документацији тј. да имају брушене површине. Због тога је веома битна прецизна израда матрице и обликача на 3D штампачу. Стандардна вредност густине испуне за коришћени штампач је 10% тако да при штампању потпуно испуњеног комада површине нису потпуно глатке. Постоји више начина да површине делова буду мање храпаве попут обраде ацетоном (ацетонско купатило или лагано брушење са наношењем ацетона) или брушење финим брусним папиром као што је урађено у овом случају.

Могући разлози одступања вредности измереног угла и тока на дијаграму деформационе силе су:

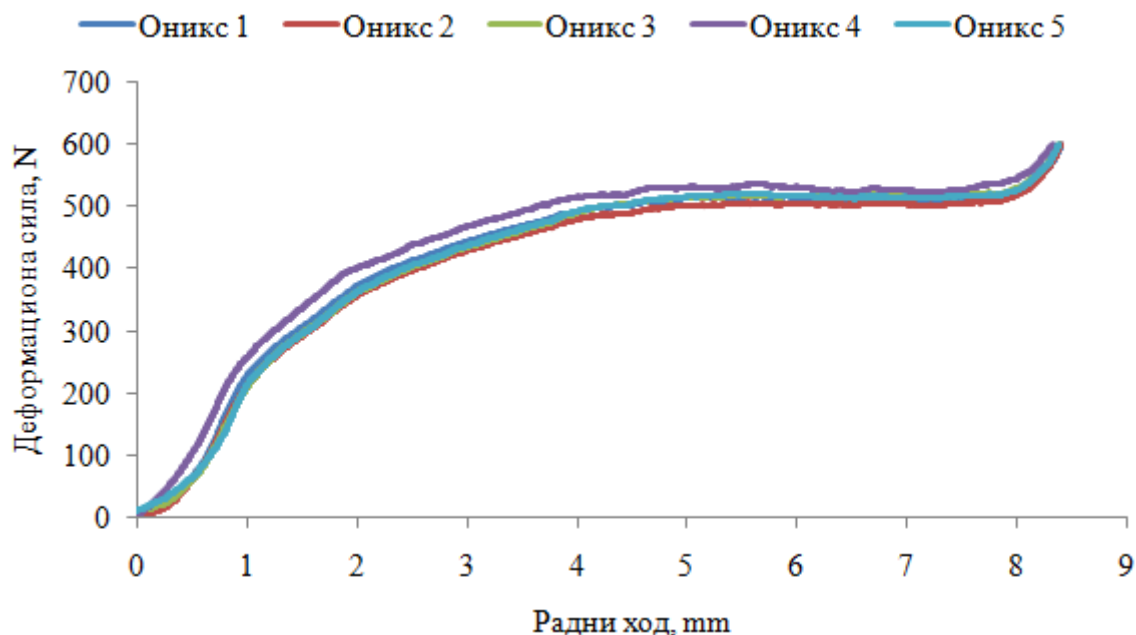
- мања прецизност технологије *FDM* штампе (између $\pm 0,2$ mm и $\pm 0,5$ mm, за *Makerbot replicator* $\pm 0,3$ mm) у односу на обраду резањем (глодање и брушење),
- пораст силе настале услед трења између вођица и чаура што утиче на вредност силе и радни ход,
- грешке (непрецизност) при монтажи,
- одступања дебљине лима (веома мала али при прецизном записивању дијаграма постоје),
- грешке оператера (различита удаљеност обликача од лима на почетку експеримента) и
- грешке при монтирању алата настале због крутости машине (грешке услед стезања плоча стезним чељустима – упредање алата).

7.4.2 Резултати експеримената са алатом од Оникса ојачаног стакленим влакнима

Експеримент савијања са алатом направљеним од Оникса урађен је у идентичним условима као у претходном случају са алатом од *ABS*-а. Експеримент је изведен са пет понављања. Изглед монтираног алата приказан је на слици 7.33. Дијаграми деформациона сила - радни ход приказани су на слици 7.34.

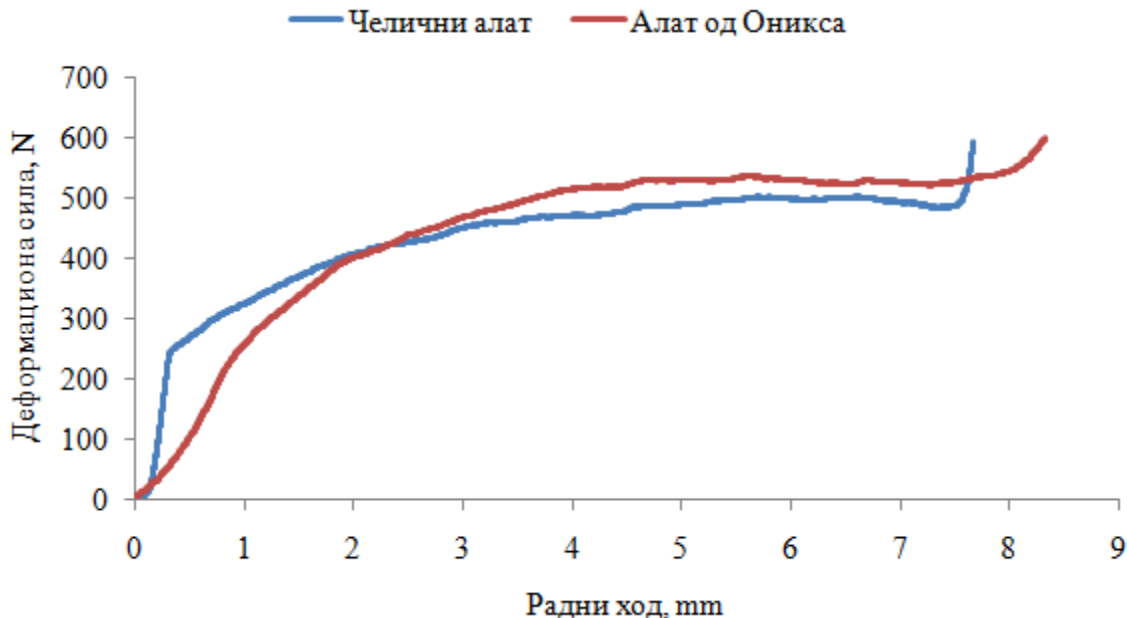


Слика 7.33 Алат од Оникса



Слика 7.34 Дијаграми деформациона сила – радни ход за експеримент савијања са алатом од Оникса

Углови савијања на деловима од лима су мерени посредством 3D скенирања и применом софтвера *Geomagic design X*. Упоредни дијаграми деформациона сила - радни ход за савијање лима применом металног и адитивно произведеног од Оникса приказан је на слици 7.35.



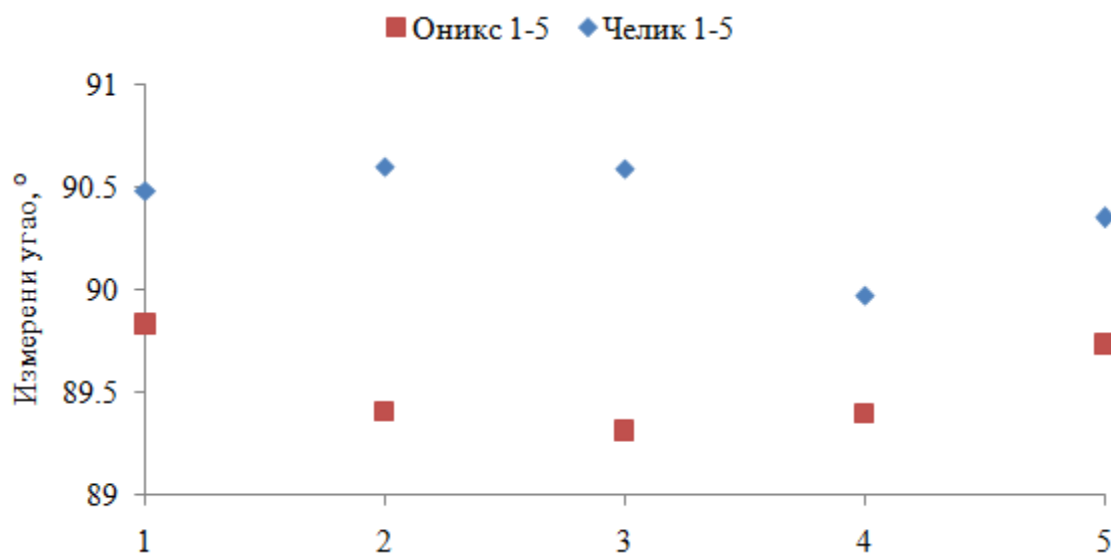
Слика 7.35 Упоредни дијаграми деформационе силе – радни ход за савијање алатом од челика и алатом од Оникса

На упоредном дијаграму приказаном на слици 7.35 види се разлика у вредности деформационе силе и радног хода. Овако велика разлика објашњава се великом еластичношћу Оникса. Иако су обликач и матрица били ојачани на критичним местима потребно је делове који су изложени концентрисаном оптерећењу ојачати у потпуности што би сигурно довело до повећане крутости али и до значајног повећања цене и

времена израде алата. Вредности измерених углова приказани су у табели 7.7. Углови су мерени коришћењем 3D скенера на исти начин како је приказано у претходном поглављу. Вредности угла савијања се налазе у прихватљивим границама јер је средња вредност одступања $0,5^\circ$. Разлика у резултатима добијеним у ова два експеримента приказана је на слици 7.36. Као у претходном случају када су алати били израђени од ABS-а, бројни фактори су имали утицаја попут трења између вођица и чаура, прецизности израде, еластичних особина алата итд.

Табела 7.7 Измерени углови савијања у експерименту са полимерним алатом од Оникса

Експеримент	Измерени угао	Угао - симулација	Одступање	
Оникс 1	$90,48^\circ$	89.89°	0.59°	0.66%
Оникс 2	$90,60^\circ$		0.71°	0.79%
Оникс 3	$90,59^\circ$		0.7°	0.78%
Оникс 4	$89,97^\circ$		0.08°	0.09%
Оникс 5	$90,35^\circ$		0.46°	0.51%
Средња вредност	90.39°	/	0.508°	0.57%



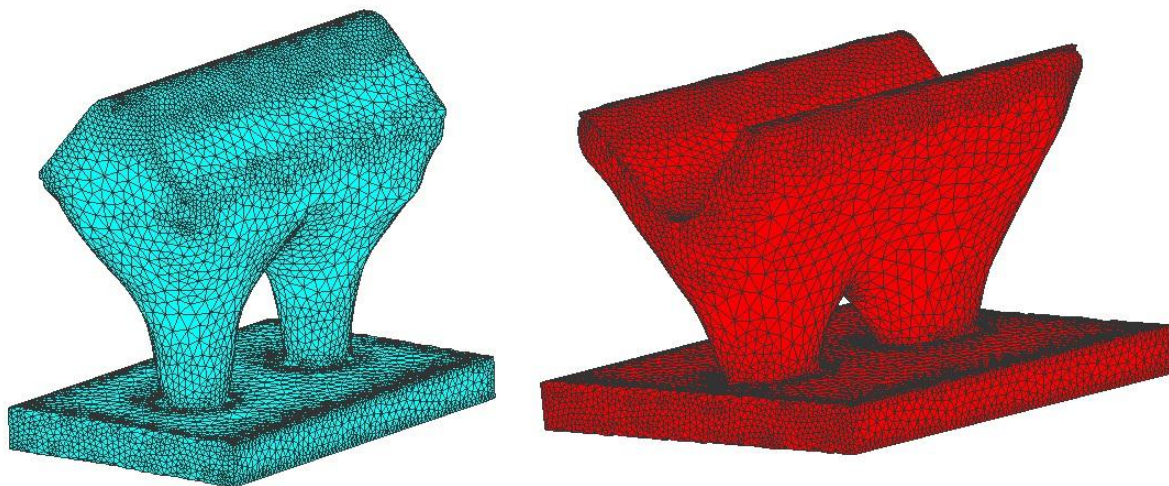
Слика 7.36 Поређење добијених вредности углова (алати од челика и Оникса)

На основу анализираних података као и претходно поменутих карактеристика материјала закључак је да је ABS најпогоднији материјал и да ће тополошки оптимизован алат бити одштампан од ABS-а.

7.4.3 Експериментално-нумеричка анализа процеса једноугаоног савијања лима применом тополошки оптимизованих радних делова алата

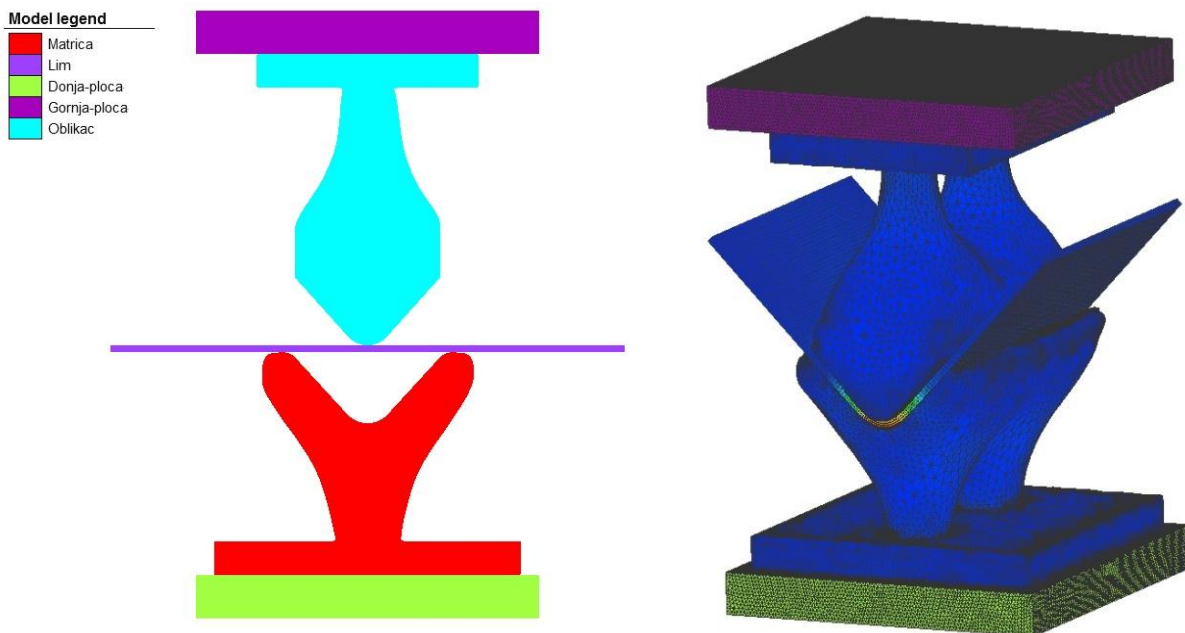
На основу разматрања у претходном поглављу одлучено је да тополошки оптимизован алат буде израђен од материјала ABS. Пре адитивне производње радних компоненти алата урађена је нумеричка симулација процеса савијања са тополошки оптимизованим моделима матрице и обликача, како би се проверила поља напона и деформација и евентуална појава деформација на алату.

За лим је коришћен тип мреже *Sheetmesh* и хексаедарски елементи, као и у претходним симулацијама. Величина елемента мреже је 0,5 mm, а на делу лима где настаје зона савијања постављен је *Refinement box* за уситњавање мреже са фактором 2. Лим је дискретизован са укупно 39468 елемената. За обликач и матрицу коришћена је мрежа *Tetmesh* и тип елемента 134 (величине 2 mm) за дискретизацију деформабилних алата. На деловима алата где је контактни притисак најинтензивнији постављени су *Refinement box*-еви за уситњавање МКЕ мреже са фактором 2. Обликач је дискретизован са 68631 елементом а матрица са 88811 елемената. Изглед мреже на тополошки оптимизованим деловима алата приказан је на слици 7.37.



Слика 7.37 Мрежа коначних елемената на обликачу и матрици

Припремљени нумерички модели процеса у *Simufact.forming* едитору на почетку и крају симулације једноугаоног савијања лима приказани су на слици 7.38.

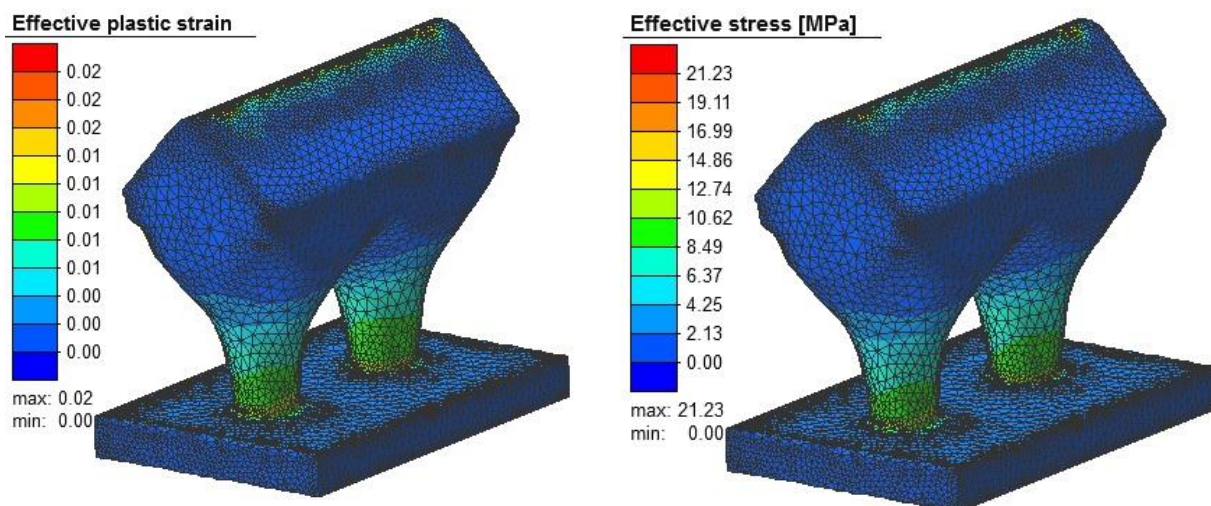


Слика 7.38 Припремљени нумерички модел процеса (лево) и модел на крају симулације обликовања (десно)

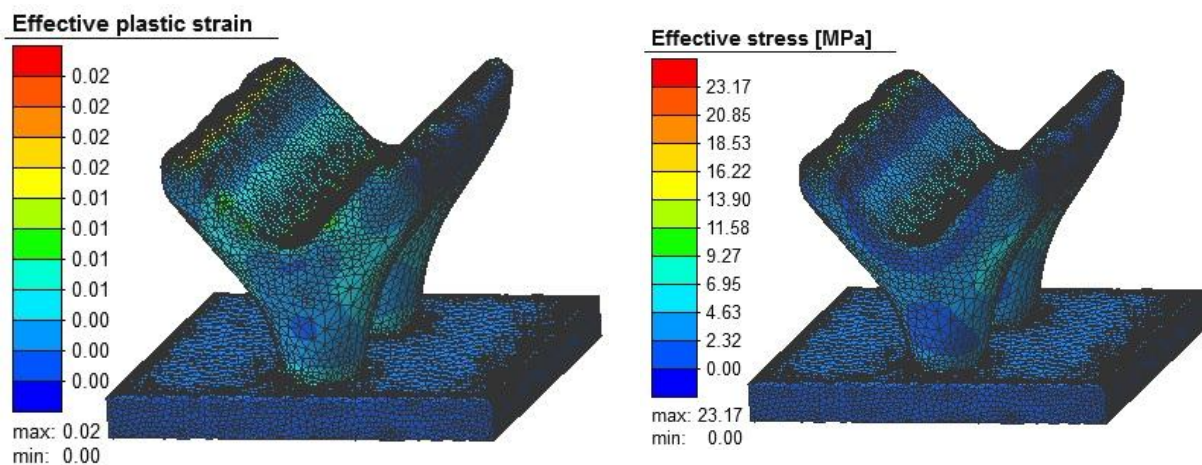
Пластична деформација и ефективни напон који се јављају на обликачу и матрици су приказани на сликама 7.39 и 7.40. Резултати нумеричке симулације су показали да ће настати минималне деформације, до 0,04, и да вредност ефективног напона није превише велика и износи највише 21,23 МПа. Максимална вредност ефективног напона на обликачу је 21,23 МПа а на матрици 23,17 МПа. Наведене вредности су значајно мање од напона на граници течења материјала *ABS* који има вредност између 38 и 39 МПа. Највеће вредности напона су очекивано на самом радијусу матрице док на најужем делу тополошки оптимизованог облика не прелазе 15 МПа.

На основу прегледа резултата симулације закључено је да је алат погодан за употребу и да не постоје критични пресеци у којима би могло доћи до деформације алата или кртог лома. Тополошки оптимизован и адитивно произведен алат од *ABS*-а приказан је на слици 7.41 заједно са конструкционим деловима склопа алата.

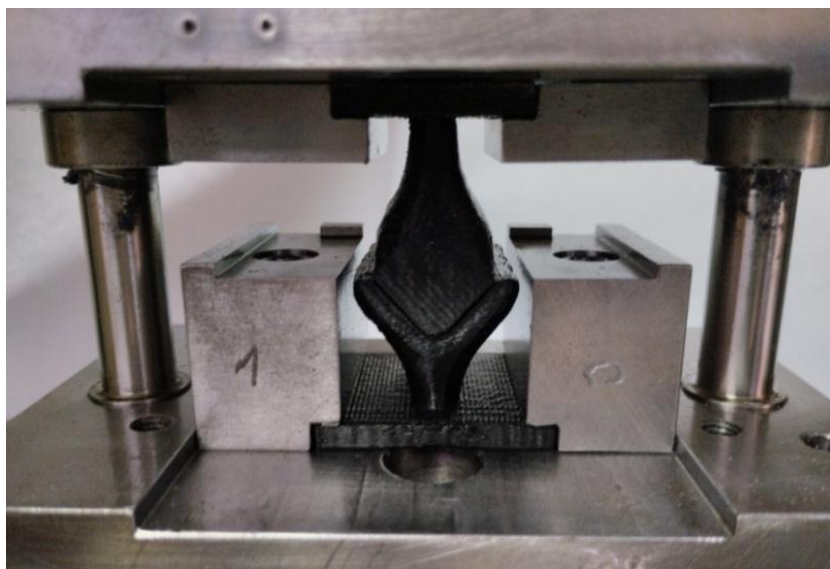
Током процеса савијања нису уочене деформације или појава савијања алата. На слици 7.42 приказан је процес савијања.



Слика 7.39 Дистрибуција резултата на обликачу: а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон

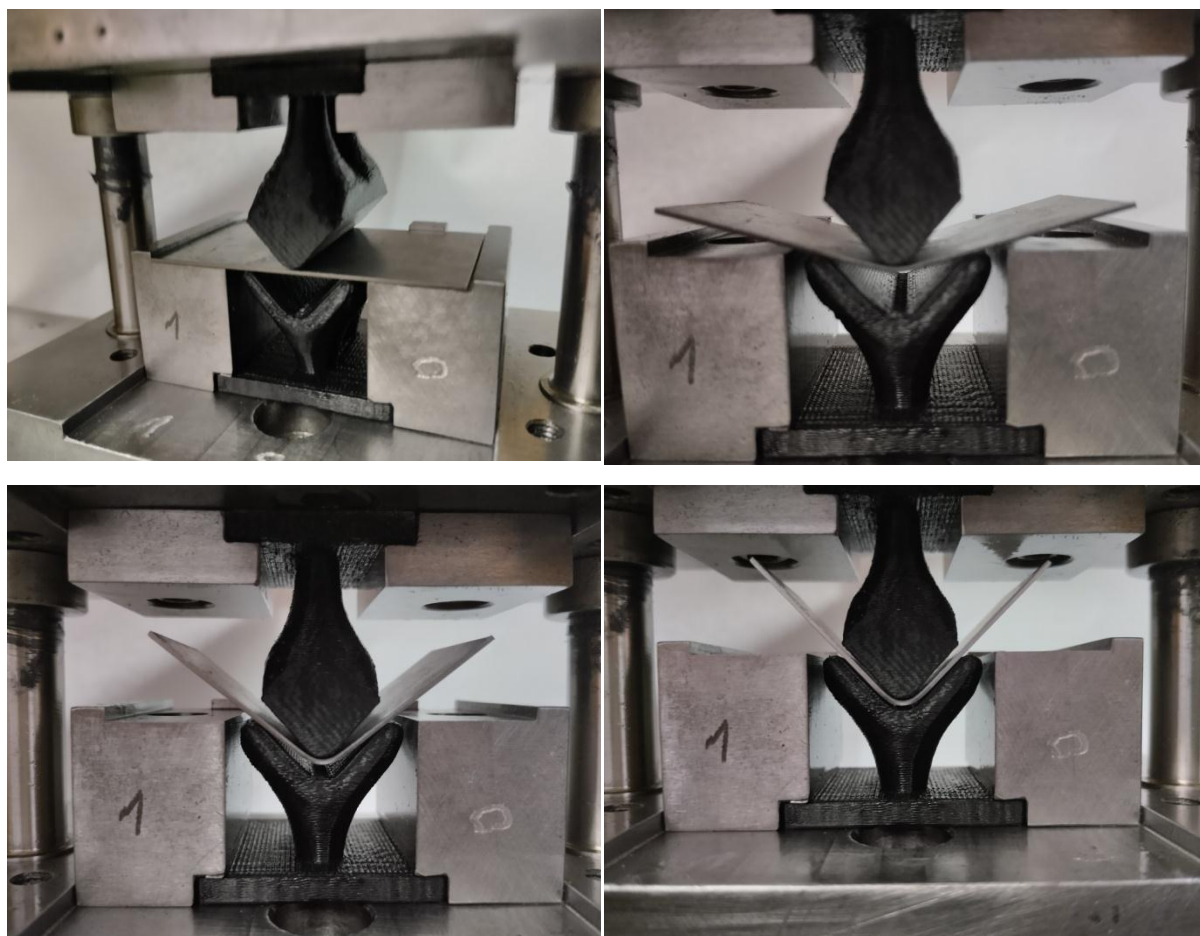


Слика 7.40 Дистрибуција резултата на матрици а) ефективна пластична деформација и б) ефективни напон

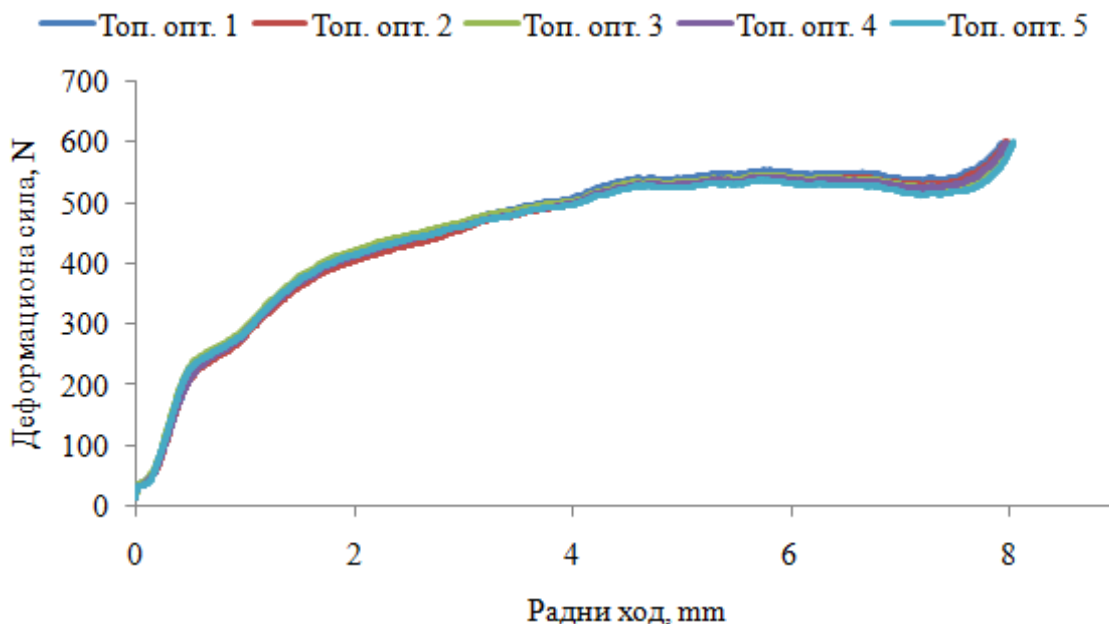


Слика 7.41 Изглед тополошки оптимизованих радних елемената алата од ABS-а после монтаже

Експеримент је изведен у истим условима као експерименти са алатима од ABS-а и Оникса, са пет понављања. Дијаграми деформационе силе, приказани на слици 7.43, потврђују задовољавајућу поновљивост резултата и да нема великих одступања.

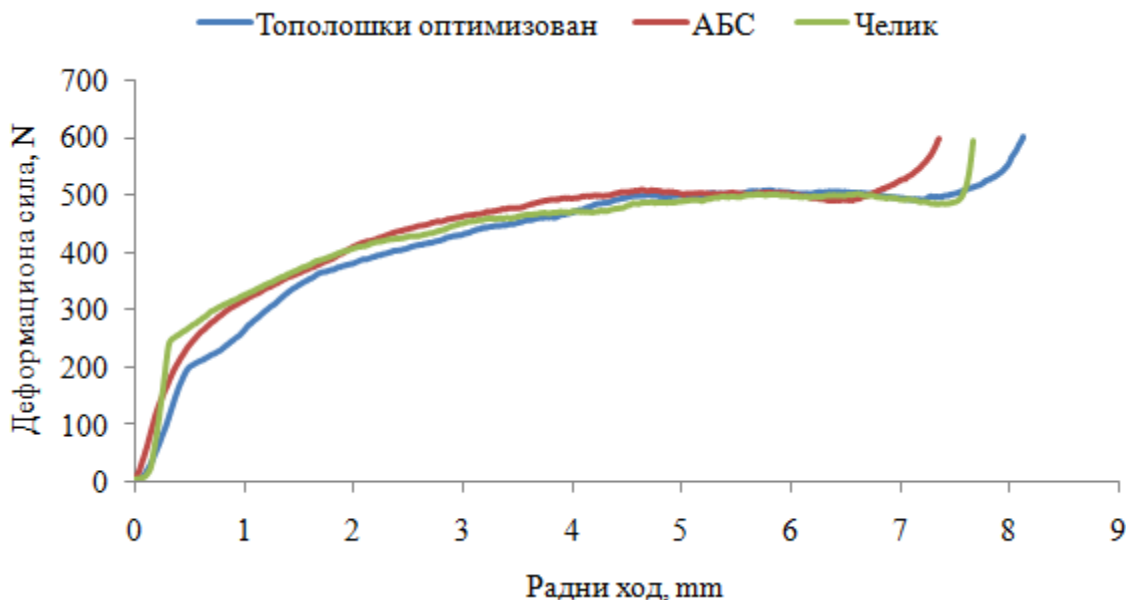


Слика 7.42 Процес савијања лима коришћењем тополошки оптимизованог алата адитивно произведеног од ABS-а



Слика 7.43 Дијаграми деформациона сила – радни ход за савијање тополошки оптимизованим алатом од ABS-а

За истраживање је нарочито интересно упоредити дијаграме деформационе силе добијене у овом експерименту са дијаграмима добијеним када су коришћени алати од ABS-а (100% испуне), тополошки оптимизовани алати од ABS-а и алати са радним елементима од челика. Упоредни дијаграм приказан је на слици 7.44.



Слика 7.44 Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход процесима једноугаоног савијања лима применом алата од различитих материјала

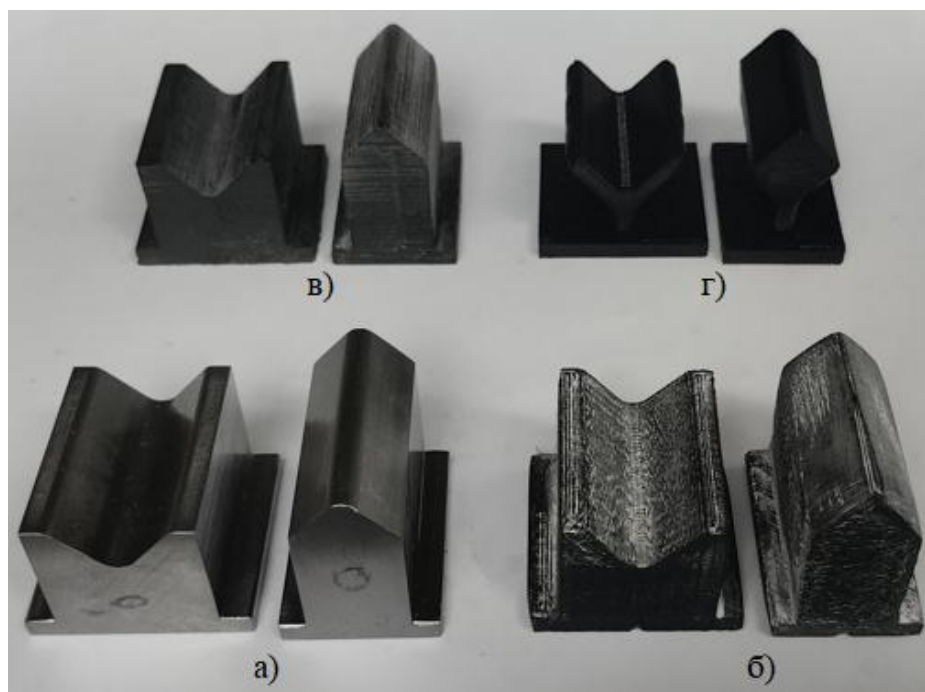
После експеримента узорци су скенирани коришћењем оптичког 3D скенера David SLS 2 (одељак 6.3.1) и резултати су приказани у табели 7.8. Средња вредност измереног угла је $90,4^\circ$ па је средња вредност одступања 0,24% што је сасвим прихватљиво.

Табела 7.8 Углови савијања у експерименту са тополошки оптимизованим полимерним алатом од ABS-а

Експеримент	Измерени угао	Угао - симулација	Одступање	
Топ. опт. 1	89,86°	90,19°	-0,33	0,37%
Топ. опт. 2	90,76°		0,57	0,63%
Топ. опт. 3	90,59°		0,4	0,44%
Топ. опт. 4	90,39°		0,2	0,22%
Топ. опт. 5	90,43°		0,24	0,27%
Средња вредност	90,4°	/	0,216	0,24%

7.4.4 Упоредна анализа примењених алата за једноугаоно савијање лима

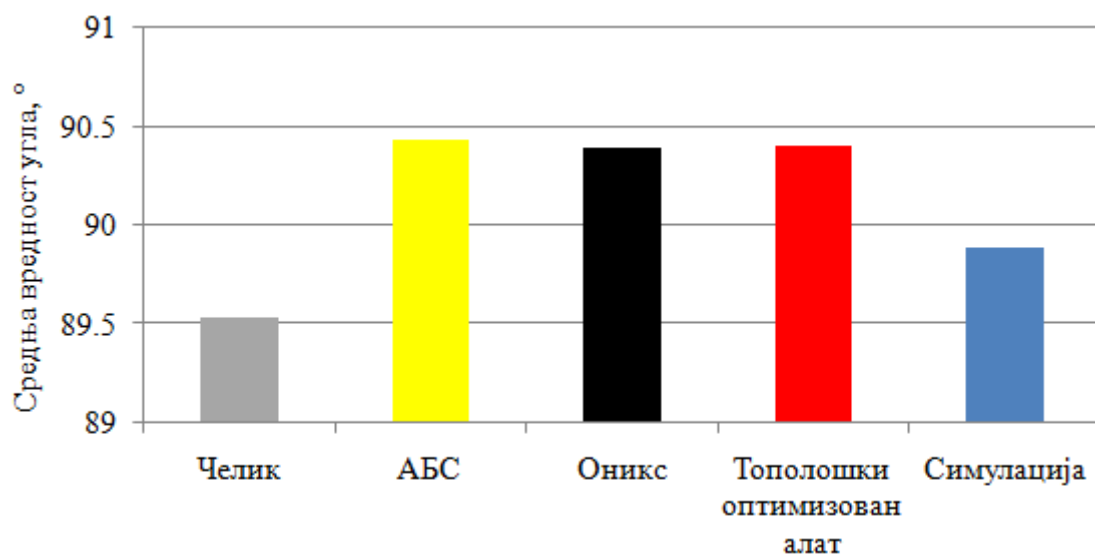
Да би био изведен коначан закључак о могућности и погодности употребе адитивно произведених полимерних алата потребно је упоредити резултате експеримената изведене са полимерним алатима са експериментима где је коришћен алат од челика. На основу резултата експеримената изводи се закључак да је коришћење полимерних 3D штампаних алата за савијање потпуно оправдано. Коришћени алати приказани су на слици 7.45. Тополошки оптимизовани радни делови алата приказани су већ на слици 7.27. Резултати за угао савијања приказани су на слици 7.46.



Слика 7.45 Коришћени радни делови алата за једноугаоно савијање лима: а) челични б) полимерни – ABS в) полимерни – Оникс г) тополошки оптимизован алат

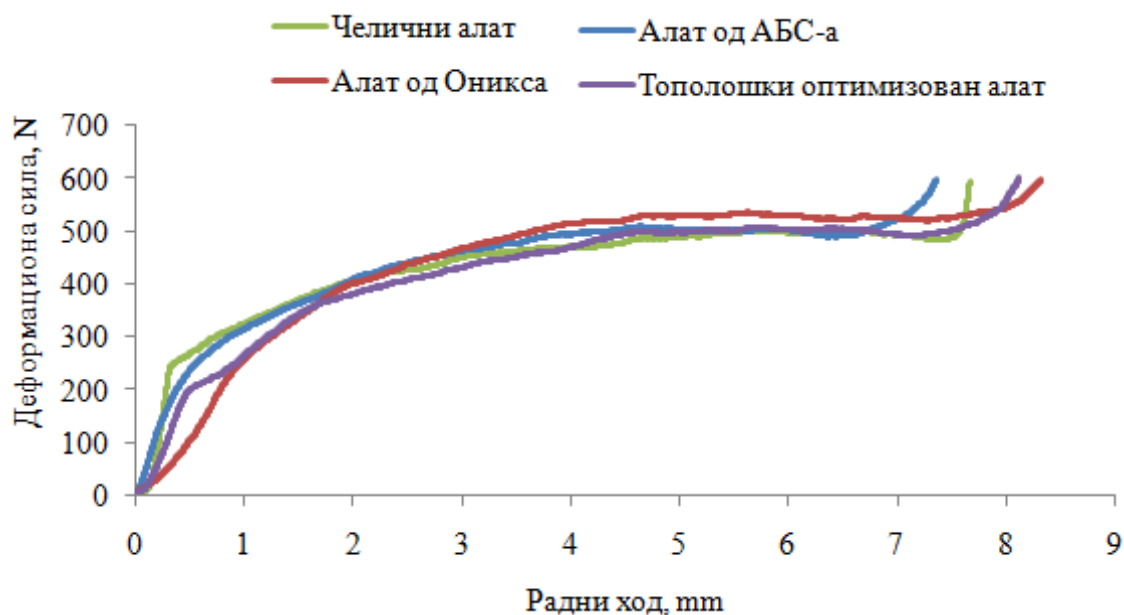
Резултати савијања са свим примењеним алатима и у нумеричким моделима показују високу прецизност јер се мерени и процењени углови савијања на обратку од

лима налазе у опсегу $90 \pm 0,5^\circ$. Постоје одређене разлике у вредности углова добијених челичним и полимерним алатима. Једна потешкоћа примећена током рада је монтирање полимерних алата која код металног алата не постоји. Површине челичног алата су брушене и погодне су за монтажу док су површине код 3D штампаних алата значајно храпавије и потребно је коришћењем брусног папира (P220) припремити површину при чему треба бити опрезан да не би била угрожена тачност алата. Ипак, главни узрок одступања резултата је свакако појава трења на вођицама при чему долази до промене радног хода до 0,1 mm. Поред трења битан узрок појаве већег еластичног исправљања приликом примене полимерних алата је њихова већа еластичност односно веће угибање током процеса савијања лима.



Слика 7.46 Упоређење средњих вредности измерених углова савијања лима

Упоредни дијаграм деформационих сила за сва четири типа експеримената са различитим радним елементима алата приказан је на слици 7.47.



Слика 7.47 Упоредни дијаграми деформациона сила – радни ход добијени коришћењем алата од различитих материјала (челик, ABS, Оникс, тополошки оптимизован)

Дијаграми деформационе силе за челични алат и алат од ABS-а су веома слични док се дијаграм за алат од Оникса ојачаног у зонама највећих притисака стакленим влакнима разликује. Овако велика разлика се једино може објаснити постојањем одређених еластичних деформација на алату током процеса савијања.

Најчешће се за израду алата користи челик али резултати претходних експеримената су показали могућа замена полимерним алатима. Техно-економска анализа израде алата у зависности од коришћеног материјала приказана је у табели 7.9. Ознака X значи да алат од датог материјала задовољава услов (тачност или крутост) а ознака **X** значи да је алат од тог материјала најбољи избор према разматраном параметру.

Цена радних елемената од челика је одређена тржишном понудом алатнице која их је направила. Цена адитивно произведених радних елемената алата од полимера је израчуната на основу цене материјала, цене рада штампача која се користи при дефинисању комерцијалних понуда и утрошка материјала при постпроцесирању.

Табела 7.9 Техно-економска анализа израде алата у зависности од коришћеног материјала

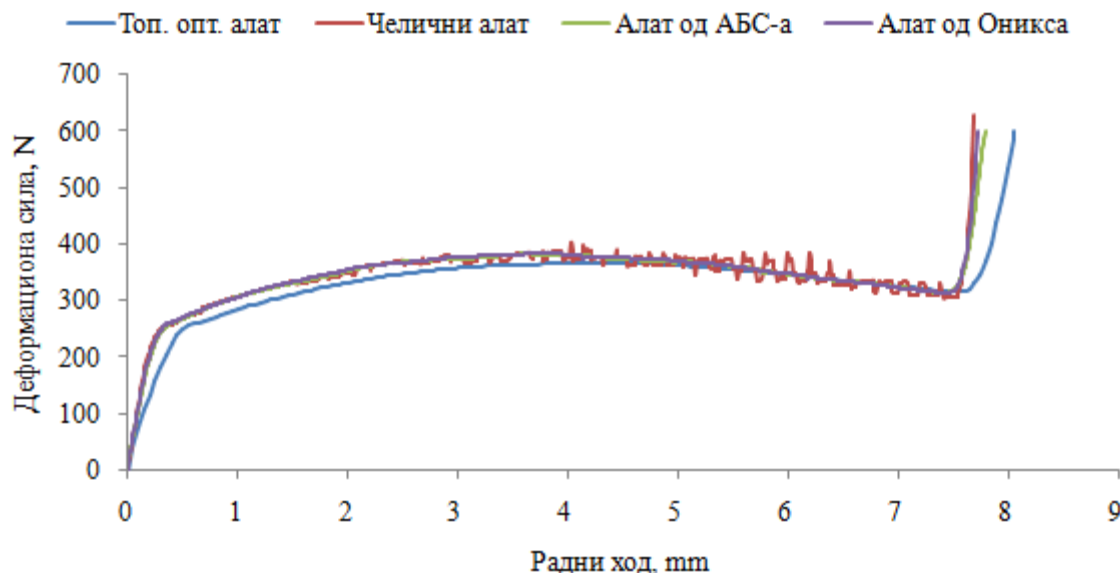
Материјал алата	Челик	ABS (100% испуна)	Оникс ојачан стакленим влакнима
Време израде	~2 радна дана	~8,5ч (6,8ч штампање + 1ч припрема + 0,5 ч постпроцесирање)	~9,5ч (8,15 сати штампање + 1сат припрема + 0,5ч постпроцесирање)
Цена израде	~8000дин	~500дин	~1350дин
Задовољава тачност израде	X	X	X
Тачност добијених делова	X	X	X
Крутост	X	X	

За анализу резултата значајно је упоредити дијаграме деформационе силе добијене нумеричким симулацијама када су материјали алата различити а алати деформабилни. Дијаграми су приказани на слици 7.48. Разлика постоји али је веома мала па се сматра да су сви алати погодни за употребу. Подударност облика дијаграма заправо показује да нема појаве неких већих деформација на радним елементима алата, било пластичних или еластичних, и да је ток процеса сличан са било којим алатом.

Када се анализирају резултати добијени експериментално и нумерички уочава се разлика вредности деформационе силе, посебно у другој половини процеса, када трење између стубних вођица и чаура у склопу алата постаје израженије. Због тога се и раније достиже лимит максималне силе од 600 N па је укупни хода алата мањи око 0,1 mm. То додатно прави разлику и у мереним угловима савијања на деловима од лима, у односу на оне процењене у нумеричком моделу процеса, где нема утицаја трења у водећим елементима виртуелног алата. Упркос томе, вредности угла савијања у експериментима и нумерички процењени остају у опсегу $90 \pm 1^\circ$, што је у границама дозвољеног [Јовичић, 1980].

Током нумеричке анализе уочен је проблем да софтвери који се користе за симулације процеса обраде деформисањем раде пре свега са металним материјалима који имају значајно већи модул еластичности. Други проблем је дефинисање

аналитичке апроксимације криве ојачања за полимерне материјале јер софтвери користе неколико апроксимација које не могу довољно прецизно да опишу понашање полимерних материјала током деформисања. Ова два проблема могу да доведу до појаве неких мањих одступања, нумеричка симулација је показала појаву минималне деформације на полимерним алатима.



Слика 7.48 Упоредни дијаграми деформационе силе добијени нумеричком симулацијом са деформабилним алатима од различитих материјала

На основу резултата приказаних у овом поглављу, добијених експериментално и нумерички, могу се извести следећи закључци:

- нумерички модел процеса једноугаоног савијања лима са деформабилним радним елементима алата, дефинисаним од различитих материјала (челик, ABS, Оникс ојачан стакленим влакнима) и тополошки оптимизованих, даје прецизну процену целог процеса обликовања, укључујући и фазу растерећења лима уз ефекат еластичне повратности, као и прецизну геометрију обликованог дела

- примена полимерних адитивно произведених алата је у потпуности оправдана јер су сви резултати процеса савијања задовољили тражену тачност и није било појаве никаквих деформација алата и

- применом тополошке оптимизације радних елемената алата са савијање могуће је остварити значајне уштеде у потрошњи материјала у адитивној производњи полимерних алата и времену израде, при чему се процес савијања реализује идентично и са истим излазним перформансама процеса као код металних или полимерних алата који нису оптимизовани.

Применом тополошке оптимизације постигнута је значајна уштеда материјала. Маса обликача је смањена са 29,52 g на 18,22 g а матрице са 31,79 g на 17,11 g. Уштеда јесте велика, маса обликача смањена је 38,28% а матрице 46,18%, али је уштеда материјала могла бити већа. Ипак, постигнути резултати су доказ да ће примена тополошке оптимизације све више бити заступљена у области адитивно произведених алата и компоненти.

8. Студија случаја: примена адитивно произведеног и тополошки оптимизованог полимерног алата у индустрији

У претходном поглављу експериментално је доказана хипотеза да је могуће користити полимерне адитивно произведене и тополошки оптимизоване алате у процесима савијања лима. Експериментални резултати се подударају са резултатима нумеричких симулација што додатно потврђује полазне хипотезе. Ипак, сви експерименти су изведени у лабораторијским условима на машини за испитивање материјала при мањим брзинама деформисања и оптерећењима која се разликују од индустријских услова. За практичну примену резултата дисертације у индустрији потребно је експериментално-нумерички приступ базиран на адитивној производњи и тополошкој оптимизацији верификовати на индустријском примеру.

Изабрана студија случаја за индустријску верификацију новог приступа се односи на вишеоперационо савијање лима на апкант преси за израду носача од лима, приказаног на слици 8.1. Циљ је да се кроз серију индустријских експеримената верификује методологија замене металних алата полимерним, адитивно произведеним и тополошки оптимизованим, у индустријским условима, са силама које превазилазе лимите дефинисане у лабораторијским експериментима, и са фазом калибрације савијене зоне која се примењује при савијању на апкант пресама. Димензије носача из спецификације производа су $102 \times 32 \times 3000$ mm. Носач је израђен од поцинкованог лима ознаке *DX51D Z200*. Дебљина лима је 0,7 mm а носач је израђен са пробном ширином од 30 mm, с обзиром да је у питању равански процес, и да треба ограничити ширину алата за потребе адитивне производње и ове студије случаја.



Слика 8.1 Цртеж носача

Индустријски експерименти су реализовани са адитивно произведеним и тополошки оптимизованим алатом. Студија случаја обухвата следеће фазе: пројектовање алата, нумеричке симулације процеса савијања са циљем провере алата и тачности добијеног дела, тополошка оптимизација алата, адитивна производња компоненти алата, индустријски експерименти на апкант преси, мерења и контрола,

обрада и анализа добијених резултата. Шематски приказ тока оптимизације алата изложен је већ у седмом поглављу и приказан на слици 7.13.

На основу конструктивног цртежа носача лима и цртежа универзалних алата који се користе у компанији Елвод конструисани су алати који могу да буду произведени адитивном производњом а током конструисања водило се рачуна о димензијама које су неопходне за успешно монтирање алата на апкант пресу.

Материјал лима од којег је носач израђен је испитан тестом једноосног затезања и дефинисана је аналитичка апроксимација криве течења.

Конструкција алата проверена је коришћењем методе коначних елемената. Прво је урађена нумеричка симулација са крутим алатима да би било проверено да ли је са том конструкцијом алата могуће добити тражени облик профила а затим је симулација поновљена са деформабилним алатима чиме је проверено колико напрезање трпе алати.

На основу резултата симулације са деформабилним алатима и дефинисаног оптерећења које алат трпи, урађена је тополошка оптимизација алата.

После провере конструкције алата коришћењем методе коначних елемената, приступљено је изради алата од материјала *ABS*.

После израде урађени су експерименти и мерење делова и анализирани су резултати.

8.1 Одређивање криве течења материјала *DX51DZ200*

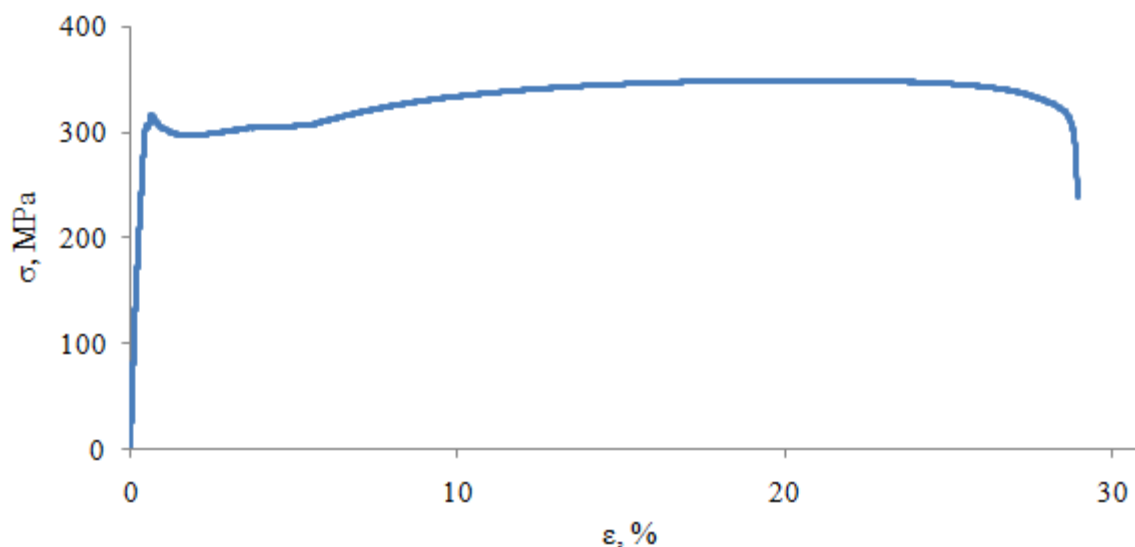
Крива течења материјала лима *DX51D Z200*, која је неопходна за нумеричку симулацију процеса обликовања, одређена је као и у претходном случају за материјал *DC04*. Урађен је тест једноосног затезања чији резултати су приказани у табели 8.1. У табели су приказан резултати за напон на граници течења, затезну чврстоћу и релативно издужење. Дијаграм затезања приказан је на слици 8.2.

Табела 8.1 Резултати испитивања затезањем материјала лима *DX51D Z200*

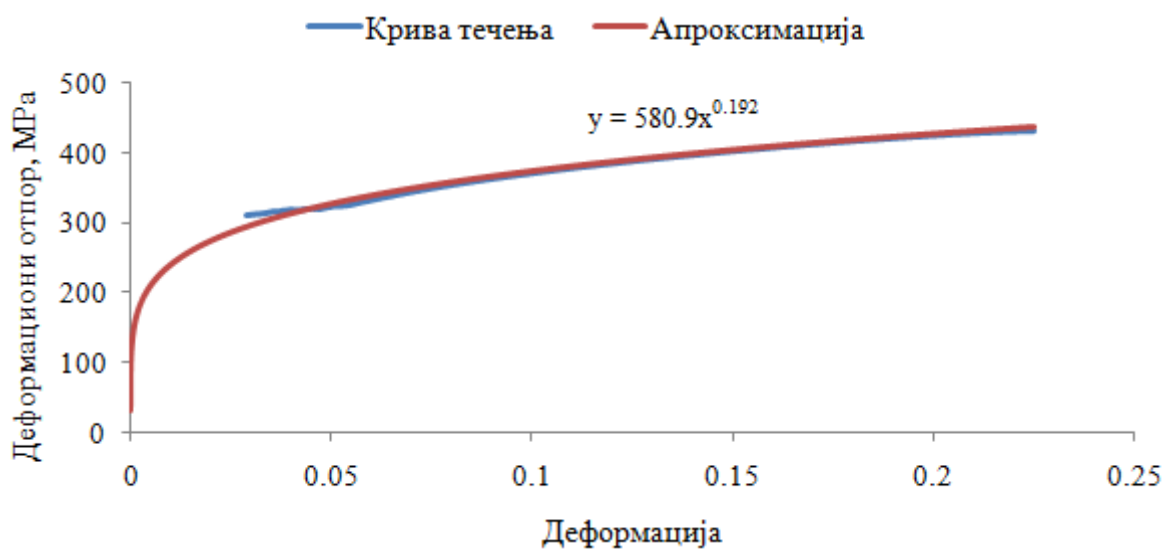
Експеримент	Rp 0,2, МПа	Rm, МПа	ε, %
1	318,34	351,30	29,90
2	317,28	348,55	27,10
3	316,13	346,20	29,46
4	315,03	348,80	28,62
5	315,55	348,70	30,98
Средња вредност	316,47	348,71	29,21

Вредност напона на граници течења је 316,47 МПа а затезне чврстоће 348,71 МПа. Издужење при кидању је 29,21 %. На основу дијаграма затезања који је дат у облику напон – издужење одређена је крива течења. Дијаграм напон – деформација је преведен у дијаграм стварни напон – деформација. Коришћењем софтвера *Excel* и опције *Solver* која се заснива на методи најмањих квадрата одређена је крива течења у облику $K = C \cdot \varphi^n$. Крива течења материјала *DX51DZ200* приказана је на слици 8.3 и дефинисана је аналитичком апроксимацијом:

$$K = 580,9 \cdot \varphi^{0,192}. \quad 8.1$$



Слика 8.2 Дијаграм затезања материјала DX51DZ200



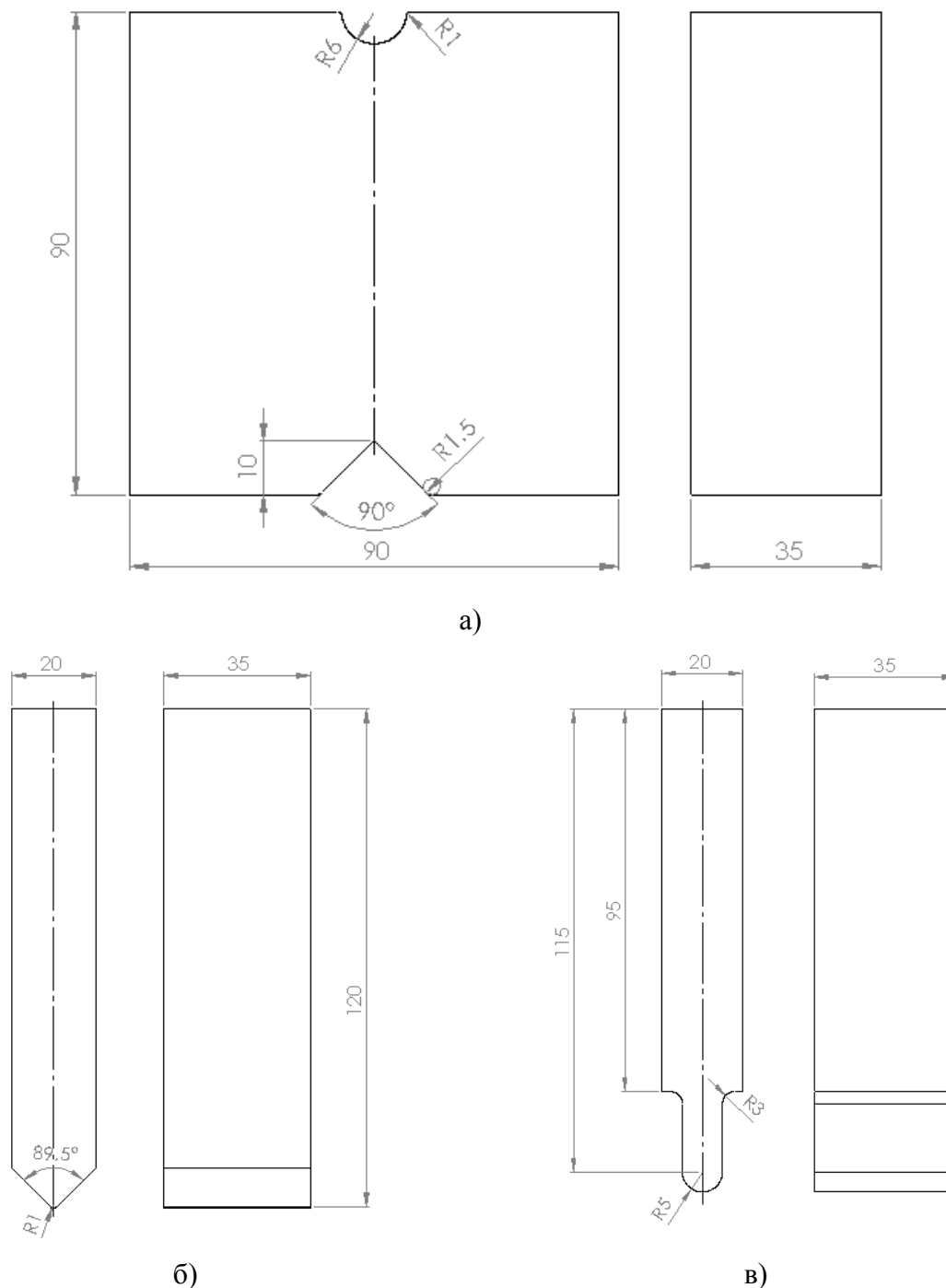
Слика 8.3 Крива течења материјала DX51DZ200

8.2 Конструкција алата

При конструисању алата вођено је рачуна о димензијама које су битне за обликовање и димензијама које су значајне за монтирање алата на машину. Цртежи алата приказани су на слици 8.4.

Матрица је конструисана да се користи за обе операције, савијање радијуса и за савијање под углом од 90°. Обликачи за обе операције имају нешто већу дужину да би било могуће монтирање на апкант пресу са стандардним држачима.

Део матрице који служи за савијање радијуса израђен је са полупречником 6 mm и полупречником заобљења 1 mm. Иако према теорији полупречник заобљења треба да буде већи, ова вредност одабрана је јер је универзални алат са овом геометријом коришћен у оригиналном процесу. Део матрице који је намењен савијању под углом 90° израђен је са тим углом, висином 10 mm и полупречником заобљења 1,5 mm. Ширина матрице и оба обликача је 35 mm. Обликач за савијање радијуса израђен је са полупречником 5 mm. Обликач за савијање под углом 90° је израђен са углом 89,5° и полупречником на врху од 1 mm.



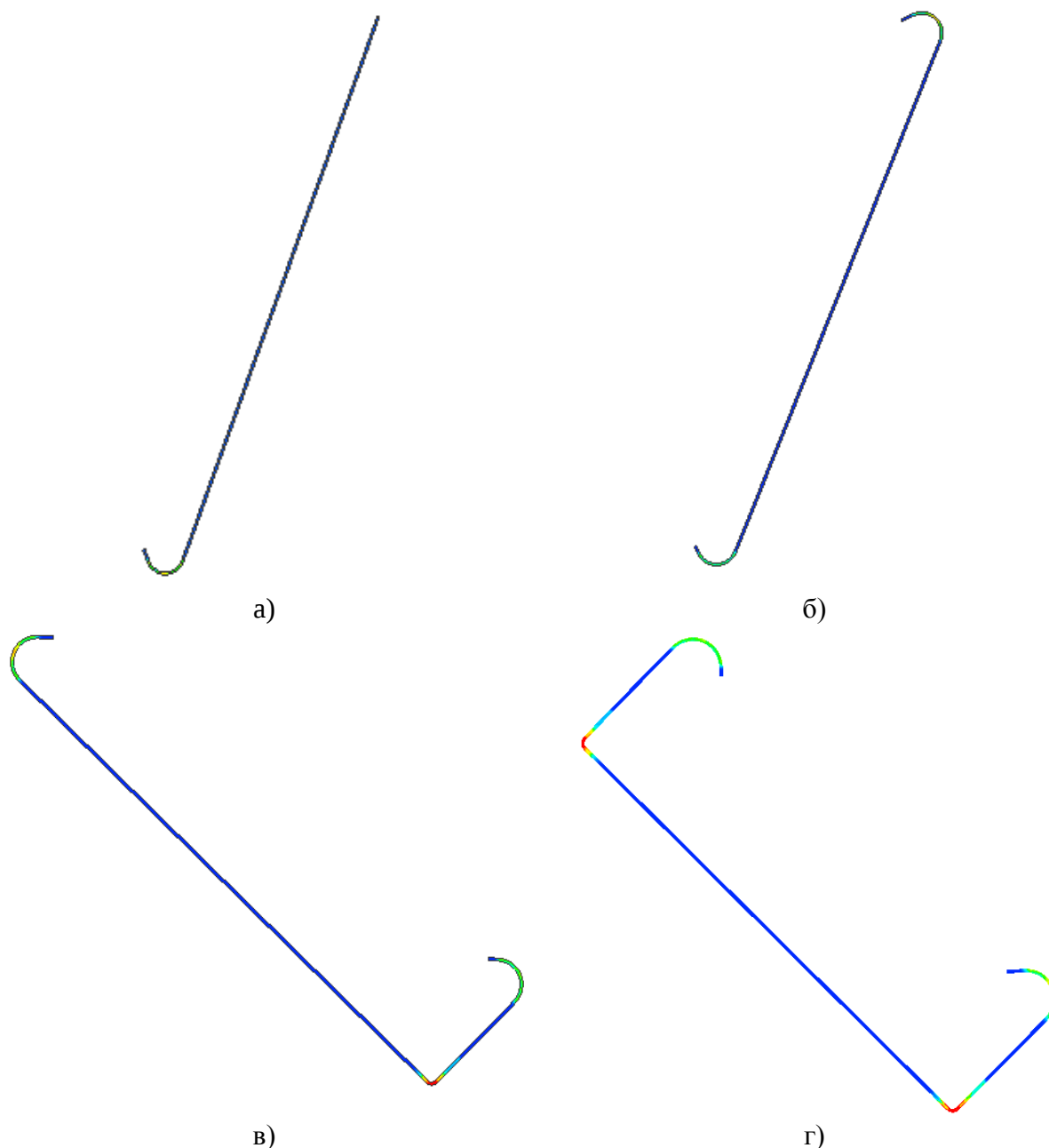
Слика 8.4 Цртежи радних елемената алата за савијање на апкант преси: а) матрица, б) обликач за прву операцију и в) обликач за другу операцију

8.3 Анализа процеса применом методе коначних елемената

Нумеричка симулација процеса савијања је урађена у софтверу *Simufact.forming* као и претходне симулације. Прво је урађена симулација процеса савијања са крутим алатима да би било проверено да ли је са оваквом геометријом алата могуће добити тражени облик. Све четири операције процеса савијања приказане су на слици 8.5.

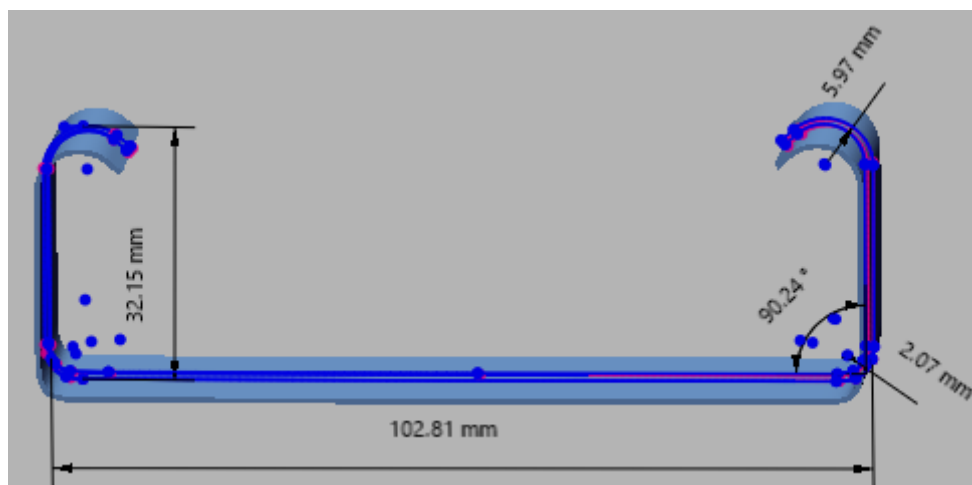
Коришћен је 2D равански тип симулације и за прављење мреже коришћен је тип *Quadtree*, величине елемента 0,3 mm и укупно је коришћен 1581 елемент. Дужина

развијеног стања лима који се савија је 183 mm као што је предвиђено у поступу рада. Крива течења материјала дефинисана је једначином $K = 580,9 \cdot \varphi^{0,192}$. Коришћен је Кулонов закон трења са коефицијентом трења $\mu = 0,1$. При подешавању симулације дефинисано је да се на крају радног хода уради подфаза растерећења (*substage*) односно да се у обзир узме еластично исправљање. Еластично исправљање је одређено коришћењем опција *Release dies attached to press* и *Release workpiece from stationary dies* са параметром *At once* са три временска корака.



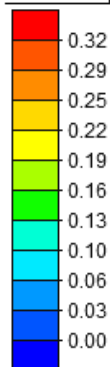
Слика 8.5 Нумерички модели обратка у операцијама савијања профила од лима за израду носача: а) прва б) друга в) трећа и г) четврта операција

Завршни облик дела је извезен као *stl* фајл и мерење димензија виртуелног обратка и углова савијања је извршено у софтверу *Geomagic design X* (слика 8.6). На слици 8.7 приказани су резултати нумеричке симулације као што су ефективни напон и деформација.



Слика 8.6 Мерење виртуелног обрадка у софтверу Geomagix design X

Effective plastic strain

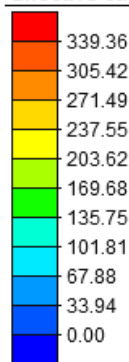


max: 0.32
min: 0.00



а)

Effective stress [MPa]



max: 456.32
min: 0.00

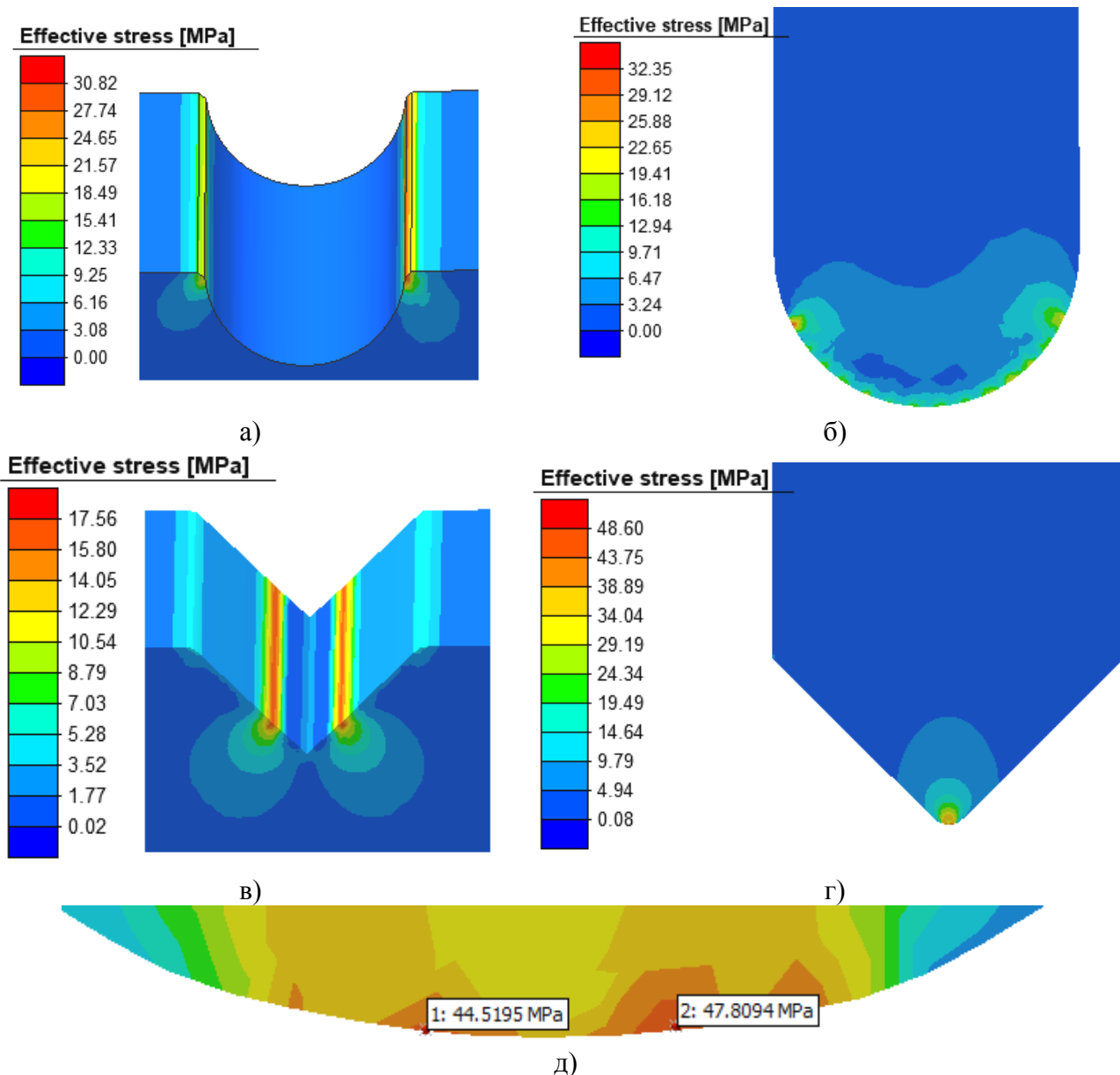


б)

Слика 8.7 Резултати нумеричке симулације за савијени део: а) ефективна пластична деформација дела и б) ефективни напон

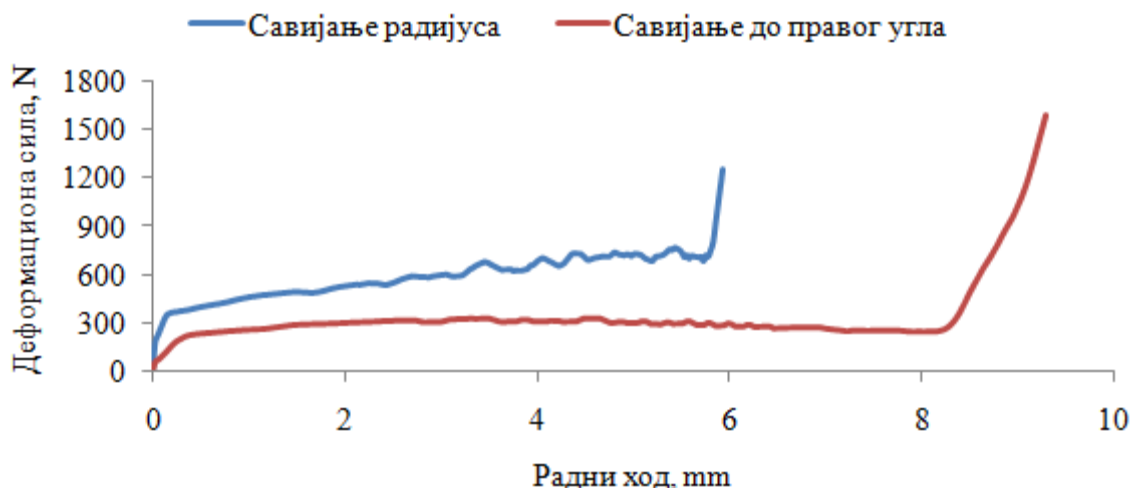
С обзиром да су вредности напона, деформације и геометрија виртуелног носача добијени нумеричком симулацијом показали да ће процес савијања носача бити успешан, следи анализа напрезања полимерних алата. Као и у претходној анализи, приказаној у пододељцима 7.1.2 и 7.1.3, обликач и матрица су дефинисани као деформабилни алати и дефинисани су мрежа коначних елемената и материјал алата.

Резултат симулације је приказан на слици 8.8. Вредност ефективног напона на обликачу за савијање под правим углом је већа од вредности затезне чврстоће, износи 48,6 МПа, па ће оптерећење обликача бити додатно анализирано. На слици 8.8 д) дат је увећан приказ врха обликача где се види да су високе вредности концентрисане на малом подручју у оквиру два чвора.



Слика 8.8 Резултати нумеричке симулације: а) ефективни напон на делу матрице за савијање радијуса б) ефективни напон на обликачу за радијус в) ефективни напон на делу матрице за савијање под углом од 90° г) ефективни напон на обликачу за савијање под углом од 90° д) увећан врх обликача за савијање под углом од 90°

Дијаграми деформационе силе за случај савијања радијуса (прва и друга операција) и савијању угла од 90° (трећа и четврта операција) добијени нумерички приказани су на слици 8.9.



Слика 8.9 Дијаграми деформациона сила – радни ход за савијање на апкант преси добијени нумеричким симулацијама

На дијаграму на слици 8.9 види се да остварене силе имају прихватљиву вредност, знатно мању од 2000 N. Снага машине значајно превазилази потребну силу обликовања. У реалном експерименту ће се вредност ове силе мало разликовати због подешавања хода али та разлика неће бити велика.

8.4 Тополошка оптимизација алата

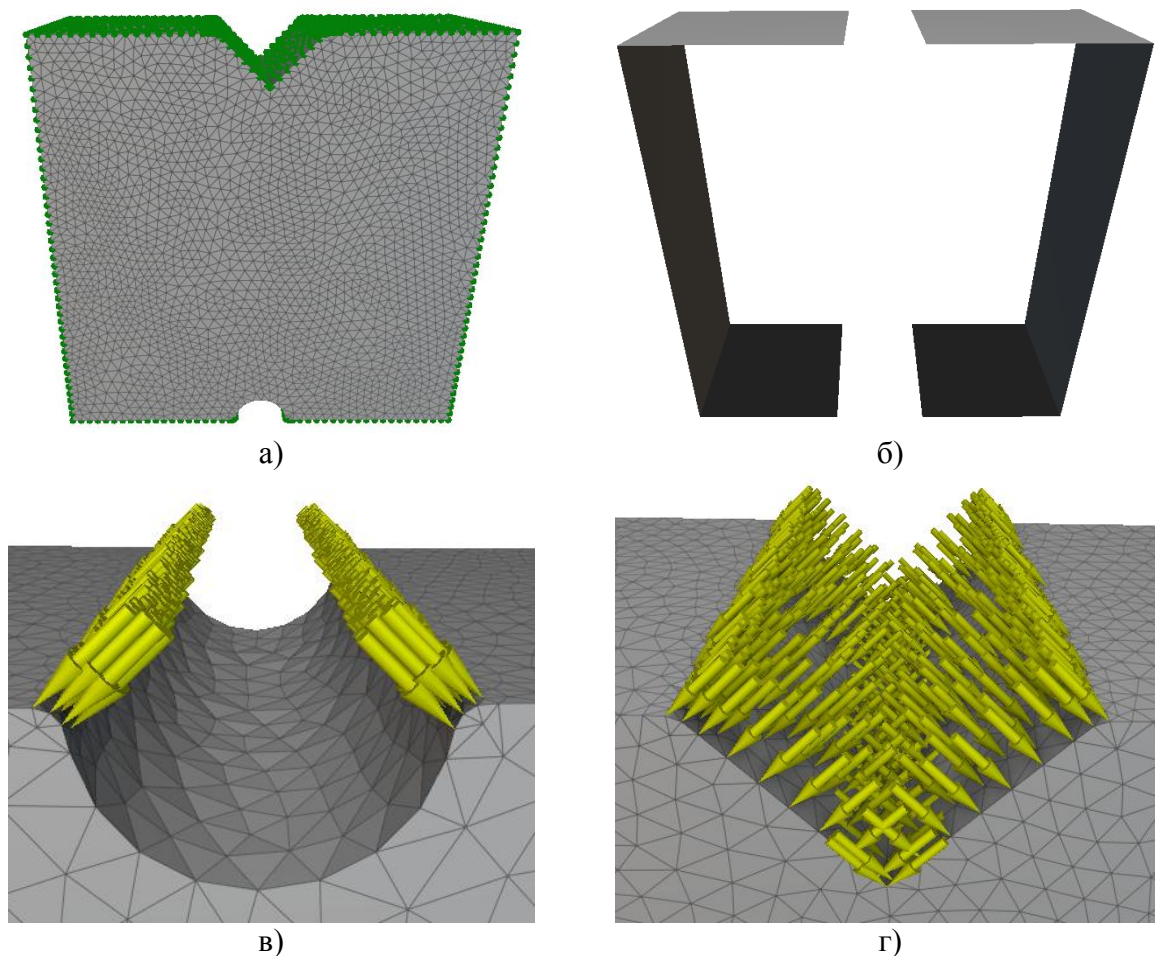
На основу резултата нумеричке симулације којом је одређено оптерећење које адитивно произведени алати трпе урађена је тополошка оптимизација. И у овом индустријском примеру коришћени су исти софтвер и метода који су примењени у одељку 7.2, софтвер *nTopology* и метода *SIMP*.

Направљена је мрежа елемената троугаоног облика са величином елемента 2 mm. Разматрањем димензија алата одлучено је да се тополошком оптимизацијом обради само матрица. На слици 8.10 приказани су дефинисана мрежа и оптерећења која алат трпи.

На слици 8.10 а) означени су сви чворови на матрици који су у контакту са лимом током процеса савијања или су битни за монтажу матрице. На основу анализе страница и чворова који су битни за монтажу направљене су странице које ће током постпроцесирања резултата тополошке оптимизације бити додате да би монтажа тополошки оптимизоване матрице била олакшана (слика 8.10 б).

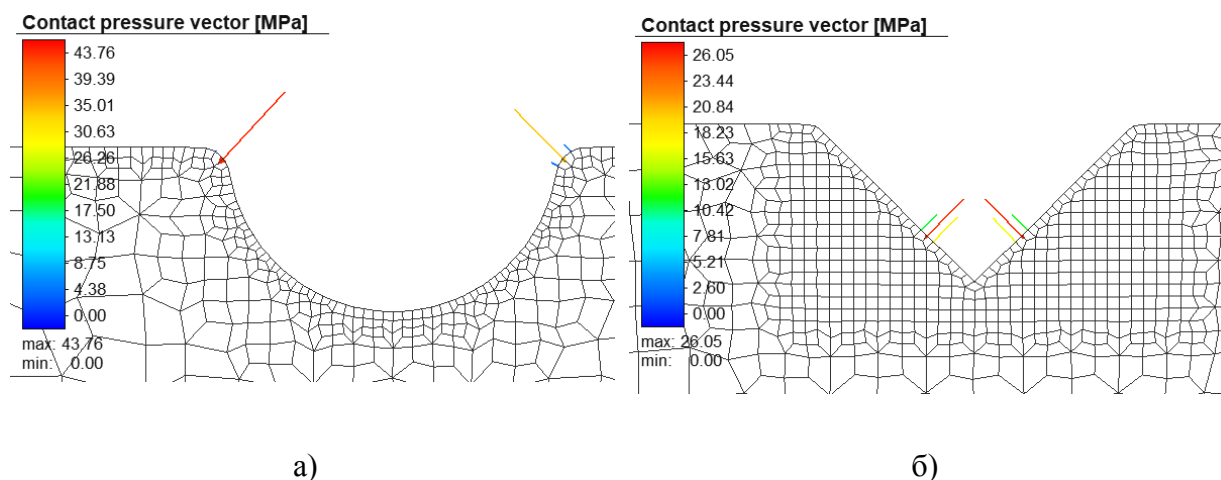
У случају савијања радијуса силе делују на полупречник заобљења као што је приказано на слици 8.10 в). На самом радијусу матрице контакт је веома мали односно калибрација није предвиђена па због тога нису дефинисане силе које делују на тај део. Приказани правац и смер вектора силе су одређени на основу вектора контактеног притиска што ће бити приказано у наставку.

На слици 8.10 г) приказане су силе које делују на део матрице који служи за савијање под углом од 90°. У овом случају вредност деформационе силе је нешто већа јер постоји калибрација. Као што се са слике види дефинисано је да су истовремено оптерећене и странице којима се калибрише лим као и полупречник заобљења. Радијус на обликачу за ову операцију је израђен са малим полупречником при врху па је матрица направљена без заобљења на дну.



Слика 8.10 Дефинисање ограничења на матрици: а) ограничени и оптерећени чворови б) стране неопходне за монтажу алата в) деловање сила на делу матрице за савијање радијуса и г) деловање сила на делу матрице за савијање до правог угла

На основу резултата нумеричке симулације који су приказани на слици 8.8 дефинисане су вредности сила које ће бити задате у софтверу *nTopology*. Правац и смер вектора силе су одређени на основу вектора контактеног притиска који је приказан на слици 8.11.



Слика 8.11 Вектор контактеног притиска: а) у тренутку највећег оптерећења матрице на делу за савијање радијуса и б) на делу за савијање под правим углом

Вредности сила чије дејство је приказано на слици 8.11 износе:

$$F_{\text{радијуса}} = 572,75 \text{ N};$$

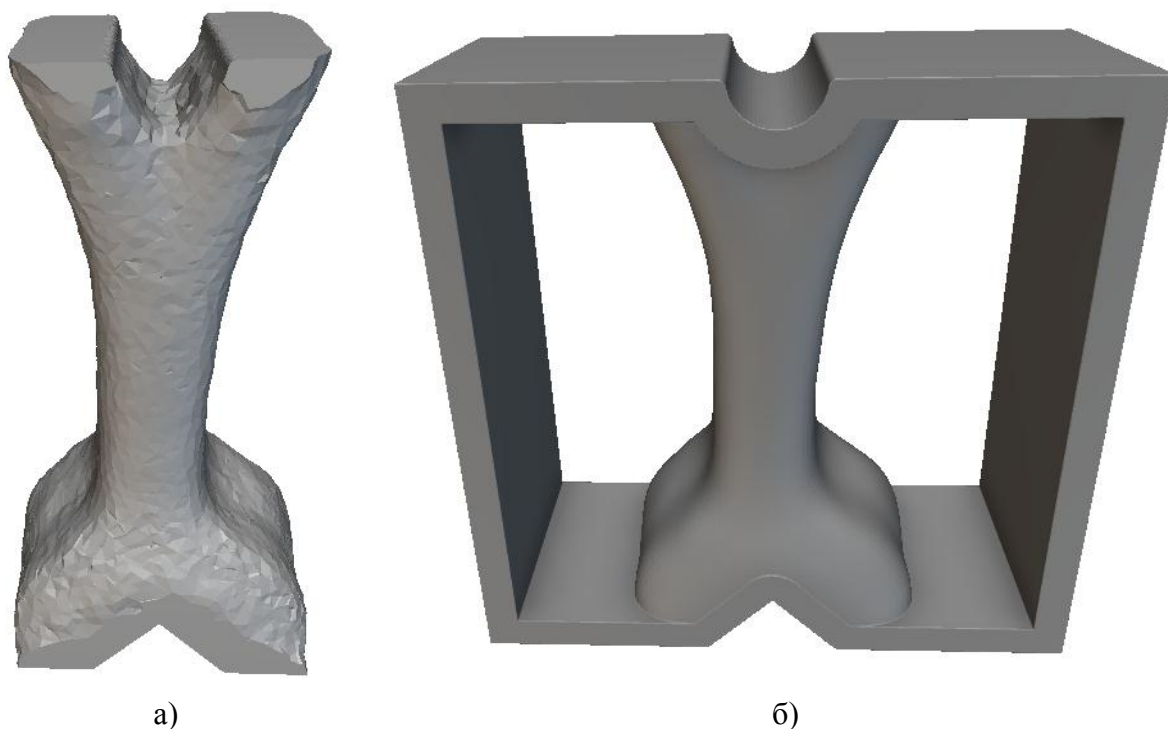
$$F_{90\text{--страна}} = 861,25 \text{ N};$$

$$F_{90\text{--радијус}} = 202,23 \text{ N}.$$

Дефинисано је да све силе делују истовремено на алат. Карактеристике материјала су дефинисане као и у претходном случају (поделељак 7.2.1). Дефинисана су четири ограничења која су битна за тополошку оптимизацију: ограничење одзива (*Volume fraction constraint* 0,5), ограничење напона (*Stress constraint* - R_p / степен сигурности), ограничење симетричности и ограничење препуста од 45° (*DFAM*). Сва ограничења се односе на материјал *ABS* и технологију депоновања топљеног материјала (*FDM*) и иста су као у претходном случају па неће бити посебно објашњена у овом одељку.

Изглед оптимизоване матрице приказан је на слици 8.12 а). После тополошке оптимизације површине су доста грубе и потребно их је детаљно постпроцесирати. У софтверу *nTopology* помоћу опције *Smoothen body* могуће је поправити изглед површина и направити да буду потпуно глатке. Постпроцесирање је урађено у шест итерација са величином мреже од 1 mm. После постпроцесирања резултата тополошке оптимизације потребно је проверити да ли је облик алата погодан за монтажу. Да би матрица могла да буде монтирана неопходно је направити рам на основу површина које су приказане на слици 8.12 б).

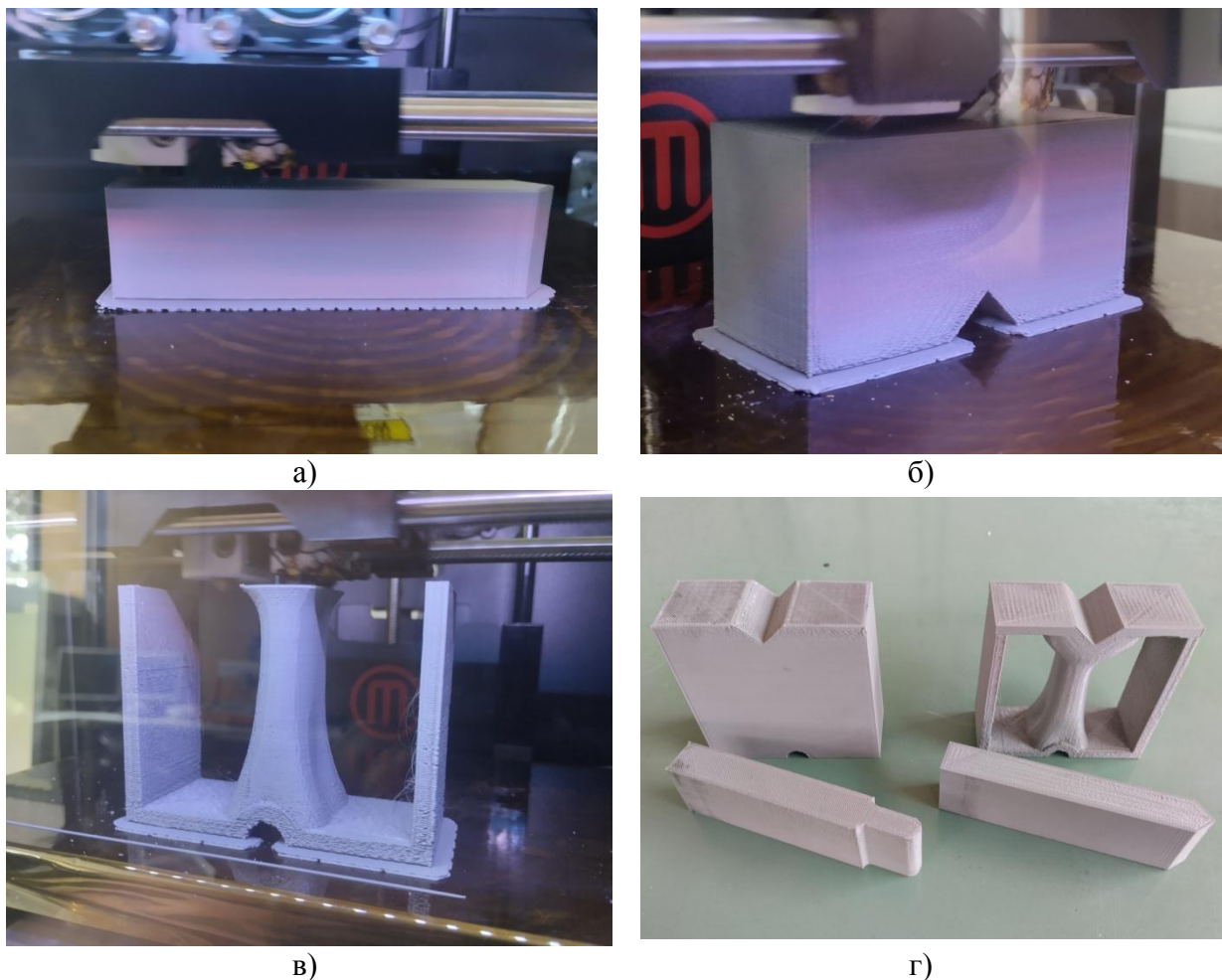
Део који је добијен тополошком оптимизацијом и рам су сједињени помоћу опција *Boolean union* и *Boolean intersect*. На основу јединствене запремине која је добијена направљена је мрежа опцијом *Mesh* и извезен је квалитетан *stl* фајл на основу кога ће бити направљен алат на 3D штампачу. Коначан облик матрице приказан је на слици 8.12 б).



Слика 8.12 Матрица: а) тополошки оптимизована и б) тополошки оптимизована матрица после постпроцесирања

8.5 Адитивна производња радних елемената алата

Алати, оригиналне конструкције и тополошки оптимизовани, су направљени на штампачу *Makerbot replicator 2X* са густином испуне 100%. Израда алата приказана је на слици 8.13.



Слика 8.13 Адитивна производња радних компоненти алата за савијање на апкант преси: а) обликача б) матрице в) тополошки оптимизоване матрице и г) алати након постпроцесирања

Због бољег пријањања за радни сто при штампању коришћен је рафт као што је на слици 8.13 приказано. Параметри штампе радних елемената алата, обликача и матрице, као и тополошки оптимизоване матрице приказани су у табели 8.2.

Табела 8.2 Параметри штампе радних елемената алата за савијање на апкант преси

Угао штампања	45°/-45°
Оријентација штампања	усправна (слика 8.13)
Густина испуне	100%
Брзина штампања	55 mm/s
Дебљина слоја	0,2 mm

Утрошак времена и материјала приказани су у табели 8.3. Приметно је да је тополошком оптимизацијом постигнута значајна уштеда материјала и времена. Потрошња материјала, рачунајући и рафт за оба случаја, смањена је за 60,86% а време израде смањено је за 55,69 %. Алати су штампани појединачно.

Табела 8.3 Потрошња материјала и време израде алата за савијање на апкант преси

Алат	Потрошња материјала	Време израде
Обликач - радијус	90,89 g	5с 1 минут
Обликач – савијање	96,35 g	5с 17 минута
Матрица	377,54 g	19с 54 минута
Тополошки оптимизована матрица	147,75 g	8с 49 минута

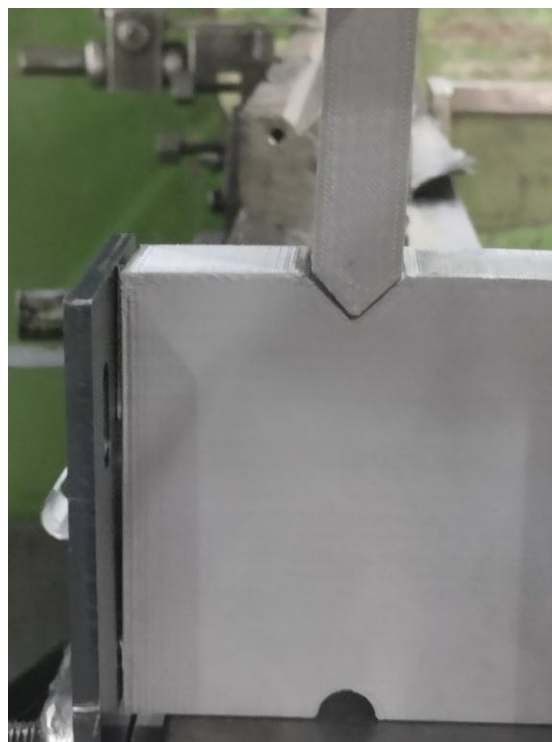
8.6 Савијање профила носача на апкант преси

Експеримент је урађен на хидрауличној апкант преси *НАРА 80/30* произвођача Јелшинград. Максимална вредност радне дужине пресе је 3000 mm, максимална сила је 800 kN, максимални притисак 290 bar, максимални ход притискивача је 120 mm, док је вредност брзине деформисања 9 mm/s (карактеристика машине).

Алати су монтирани на пресу и прво је урађена операција савијања радијуса са потпуно испуњеном (100%) а после тога и са тополошки оптимизованом матрицом. Матрица и обликач су стегнути коришћењем стезача који постоје на машини и правилно је одређен положај који обликач треба да заузме на крају операције. Исти поступак поновљен је за обе операције као што је приказано на слици 8.14.



а)



б)

Слика 8.14 Монтирање алата на радни сто апкант пресе

Као што је већ описано прва и друга операција, савијање радијуса, урађене су са оригиналном и тополошки оптимизованом матрицом и тек пошто је мерењем (шаблонима за радијус) показано да димензије задовољавају, приступљено је трећој и четвртој операцији. Приказ извођења прве и друге операције приказан је на слици 8.15.



а)



б)

Слика 8.15 Савијање радијуса (прва и друга операција) са: а) оригиналном матрицом и б) са тополошки оптимизованом матрицом

После успешног извођења прве две операције урађено је савијање дела до 90° односно изведене су трећа и четврта операција. Изглед операције приказан је на слици 8.16.



а)



б)

Слика 8.16 Савијање лима (трећа и четврта операција) на: а) матрици оригиналне конструкције и б) тополошки оптимизованој матрици

8.7 Контрола квалитета савијених носача на адитивно произведеним алатима

Након завршених индустријских експеримената урађено је мерење тачности носача од лима. Мерено је пет узорака за сваки експеримент. Савијени узорци (слика 8.17) су мерени на два начина, коришћењем помичног мерила и 3D скенера *Matter and form*. Готови узорци и поступак мерења приказани су на слици 8.17. Прецизност коришћеног скенера према спецификацијама произвођача иде до $\pm 0,1$ mm. Скенер се заснива на примени ласерске триангулације.

Мерене су све димензије које су наведене у произвођачкој спецификацији носача од лима. Неке мере су толерисане док су неке отворене. С обзиром да је контрола угла вршена механичким угломером проверавано је само да ли савијени угао одговара прописаној толеранцији и није навођена тачна вредност. После мерења механичким угломером углови и радијуси мерени су на основу облака тачака добијених 3D скенирањем. Облак тачака је извезен у *stl* формату и димензије су мерене у софтверу *Geomagic design X*. Мерење је урађено коришћењем опције *Mesh sketch* која омогућава да облак тачака буде пресечен једном равни и да пресек буде скица на којој је могуће измерити димензије. Измерене димензије скенираног носача приказане су на слици 8.18, а резултати мерења у табели 8.4.



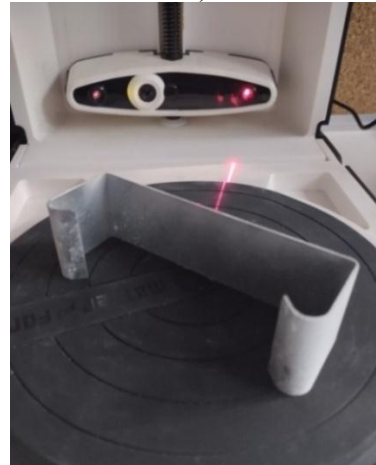
а)



б)



в)



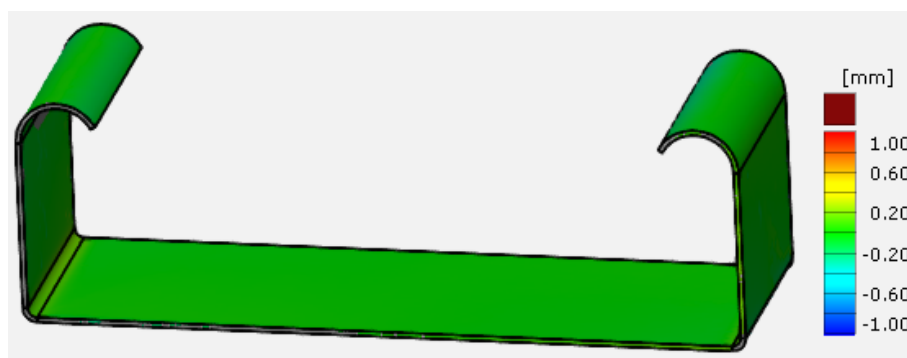
г)

Слика 8.17 Делови после савијања: а) обе серије експеримената б) мерење димензија помичним мерилом в) мерење угла коришћењем механичког угломера и г) контрола на 3D скенеру *Matter and form VI*

Табела 8.4 Измерене димензије носача

Узорак	Димензија					
	102±1 mm	32±1 mm (лево)	32±1 mm (десно)	90°±1° (лево)	90°±1° (десно)	R6
Матрица 1	102,6 mm	32,1 mm	32 mm	90,5°	90,4°	6,2 mm
Матрица 1	102,1 mm	32 mm	31,9 mm	90,6°	90,7°	6,2 mm
Матрица 1	102,5 mm	32 mm	31,9 mm	90,1°	90,9°	6,1 mm
Матрица 1	102,1 mm	32 mm	31,9 mm	90,8 °	90,1°	6,1 mm
Матрица 1	102, 4 mm	32,5 mm	32 mm	90,2°	90,3°	6,1 mm
Матрица 2 (топ. опт.)	102, 7 mm	31,5 mm	31,7 mm	90,4°	90,5°	6,2 mm
Матрица 2 (топ. опт.)	102,8 mm	31,8 mm	31,8 mm	90,7°	90,8°	6,2 mm
Матрица 2 (топ. опт.)	102,9 mm	31,9 mm	31,9 mm	90,3°	90,6°	6,1 mm
Матрица 2 (топ. опт.)	102,5 mm	31,7 mm	31,9 mm	90,8°	90,3°	6,2 mm
Матрица 2 (топ. опт.)	102,8 mm	31,7 mm	31,9 mm	90,7°	90,8°	6,1 mm

После скенирања лимова добијени *stl* фајлови су упоређени са *CAD* моделом носача као додатна провера тачности израде. Поређење тј. одступање димензија носача је приказано на слици 8.18. Модел носача и облак тачака у *stl* формату упоређени су у софтверу *Gom Inspect* тако што су прво преклопљени (опција *Aligment*) а затим је одређено одступање површина (опција *Surface comparison on CAD*).



Слика 8.18 Приказ одступања између *CAD* модела носача и облака тачака добијеног скенирањем

Део експеримента који је изведен у индустријским условима пре свега је имао за циљ да покаже да је могуће користити адитивно произведене и тополошки оптимизоване алате и у условима који нису лабораторијски па је због тога експеримент предвиђен овом студијом случаја изведен у индустријском погону компаније Елвод из Крагујевца. Елвод д.о.о. је предузеће које се бави производњом носача каблова од лима и у машинском парку има неколико апкант преса.

На основу резултата изведени су закључци:

- све димензије задовољавају захтеве из конструкционе документације па се изводи закључак да је експеримент успео чиме су полазне хипотезе додатно потврђене односно потврђено је да полимерни адитивно произведени алати могу бити коришћени и у индустријским условима,
- постигнуте су значајне уштеде материјала и времена израде (60,86% уштеда материјала за адитивну производњу тополошки оптимизоване матрице и 55,69% уштеда у времену израде), чиме је потврђен значај примене методе тополошке оптимизације.

9. Закључак

У овој докторској дисертацији разматрана је могућност употребе полимерних адитивно произведених алата за савијање танких лимова. Поред експерименталних истраживања примењене су метода коначних елемената и *SIMP* метода тополошке оптимизације. План је да се за савијање лима користе полимерни алати, па је веома битно било предвидети услове у којима ће процес савијања бити изведен. Коришћење полимерних адитивно произведених алата подразумева коришћење мањих вредности деформационе силе за једноугаоно савијање лима односно потребно је пројектовати алат и изабрати параметре процеса да се реализује успешно савијање без калибрације која захтева вишеструко веће силе. Да би процес био успешно пројектован према наведеним захтевима коришћена је метода коначних елемената. За дефинисање потребних улазних параметара који су потребни за реализацију нумеричких експеримената коришћено је неколико стандардних тестова материјала.

Стандардним тестовима испитивања карактеристика материјала затезањем и притискивањем одређене су механичке карактеристике полимерних материјала *ABS* и *Оникс* као што је приказано у поглављу 5. Регресионом анализом одређене су криве течења за оба материјала што је представљало основу за каснију нумеричку симулацију процеса савијања. Циљ испитивања приказаних у поглављу 5 је одређивање параметара штампања чијом применом ће бити постигнуте најбоље механичке карактеристике узорака, односно дефинисање параметара који ће обезбедити добре механичке карактеристике адитивно произведених радних делова алата. Због оптерећења којима ће адитивно произведени радни елементи алата бити изложени одређено је да два материјала која су разматрана буду испитана тестовима једноосног затезања и притискивања. Тестови једноосног затезања су погодни јер је на основу резултата могуће дефинисати криве течења материјала које је касније могуће користити у нумеричким симулацијама. Експеримент је подељен на три дела и на основу сваког дела изведени су закључци који су касније коришћени за дефинисање параметара штампања алата.

На основу опширног прегледа литературе издвојени су параметри који имају највећи утицај на механичке карактеристике адитивно произведених узорака од полимера. Анализиран је утицај угла штампања, оријентације штампања, облика испуне, густине испуне, брзине штампања, дебљине слоја и утицај ојачања стакленим влакнима. Добијени резултати су подударни резултатима који су прегледом литературе издвојени. У експерименту *M1* у којем су испитане карактеристике материјала *ABS* изведени су закључци о утицају сваког параметра посебно.

Анализирана су три угла штампања ($0^{\circ}/90^{\circ}$, $30^{\circ}/-60^{\circ}$, $45^{\circ}/-45^{\circ}$) и резултати експеримента су показали да је за добијање најбољих механичких карактеристика погодно користити угао штампања $45^{\circ}/-45^{\circ}$. Овај угао представља угао који заклапају x оса радног стола *3D* штампача и путања наношења материјала што значи да је део који треба одштампати потребно оријентисати тако да његова предња страна буде паралелна x оси радног стола.

Утицај три разматране дебљине слоја (0,1 mm; 0,2 mm; 0,3 mm) је доста сложен. Да би најбоље карактеристике адитивно произведеног дела биле постигнуте погодно је користити најмању вредност дебљине слоја од 0,1 mm. Најмања вредност дебљине слоја при штампању делова од ABS-а без обзира на угао штампања даје најбоље механичке карактеристике али истовремено повећава време штампања у односу на примену друге две дебљине. Узорци штампани са дебљинама слоја од 0,2 mm и 0,3 mm имају мало слабије механичке карактеристике. Закључак је да је са аспекта механичких карактеристика дебљина слоја 0,1 mm најбоља али и остале дебљине дају задовољавајуће резултате. При избору дебљине неопходно је водити рачуна о квалитету површине, за израду алата за обликовање лима погодне су дебљине 0,1 mm и 0,2 mm.

У наставку експеримента разматран је утицај брзине штампања (20 mm/s, 55 mm/s и 90 mm/s) на механичке карактеристике и издужење. Најбољи резултати, за затезну чврстоћу и издужење, постигнути су коришћењем препоручене вредности брзине од 90 mm/s. Разлика вредности механичких карактеристика је неколико процената па је закључено да је прихватљиво коришћење и мањих брзина од препоручене ако су у питању већи делови односно ако се уоче неке вибрације током рада.

Од великог значаја за практичну примену је било одређивање утицаја облика и густине испуне. За материјал ABS испитан је утицај квадратног и шестоугаоног облика испуне и три вредности густине испуне (10%, 40%, 70%). Коришћење квадратног облика испуне обезбеђује боље механичке карактеристике при свакој густини испуне. Повећање густине испуне доводи до повећања вредности механичких карактеристика. Додатном анализом резултата увођењем коефицијента који је једнак количнику вредности механичке карактеристике и масе види се да је повећање вредности механичких карактеристика потпуно зависно од густине испуне односно да је вредност коефицијента за све вредности густине испуне приближно иста.

Испитивање притисних карактеристика материјала ABS подељено је на два дела, у првом је одређен утицај положаја штампања, брзине штампања и дебљине слоја а у другом делу одређен је утицај облика и густине испуне. Резултати експеримента су показали да положај штампања има значајан утицај на притисне карактеристике и да је повољнији усправни положај штампања. Као и при испитивању затезањем и у овом случају боље механичке карактеристике су добијене када је коришћена брзина штампања 90 mm/s. Мањој вредности дебљине слоја одговара већа вредност притисног напона. У другом делу испитивања притискивањем материјала ABS поређене су карактеристике узорака штампаних са квадратним и шестоугаоним обликом испуне, штампаних са три вредности густине испуне од 10%, 40% и 70%. При најмањој вредности густине испуне за оба облика испуне постигнути су слични резултати док је код већих вредности густине испуне доста повољније користити квадратни облик.

Да би закључци појединачних експеримената били потврђени урађен је додатни експеримент испитивања затезањем који је организован према правилима Тагучијевог експеримента L18. После статистичке обраде изведени су закључци који се поклапају са закључцима претходних експеримената. Главно запажање је да је материјал ABS веома крт када је оптерећен затезућом силом, да сила нагло расте и да брзо долази до лома узорка. У случају притисног оптерећења материјал је показао задовољавајућу пластичност и на основу тога је закључено да боље подноси притисно оптерећење.

У експерименту M2, тестовима затезања и притискивања, испитан је утицај параметара штампања на карактеристике материјала Оникс. Утврђено је да је

најповољнији угао штампања $0^\circ/90^\circ$. Вредности напона на граници течења и затезне чврстоће за тај угао штампања имају највећу вредност. Затим су тестом затезања испитани узорци штампани са троугаоним, квадратним, шестоугаоним и таласастим обликом испуне са две густине испуне, минималном и препорученом као што је произвођач штампача *Markforged* прописао. Повећањем густине испуне расте вредност затезне чврстоће. За минималну густину испуне најповољнији је троугаони облик испуне а за препоручену густину испуне таласаста облик. Вредност затезне чврстоће узорака штампаних са неким обликом испуне значајно је мања од затезне чврстоће узорака штампаних са испуном од 100%. Издужење узорака од Оникса је знатно веће него код узорака од ABS-а. Код узорака од Оникса уочена је велика еластичност. После кидања узорка уочено је да постоји велико растојање између два дела узорка односно да су еластичне деформације велике. Тестом притискивања испитани су узорци од Оникса са троугаоним, шестоугаоним и таласастим обликом испуне и резултати су показали да механичке карактеристике имају највећу вредност за троугаони облик испуне, следе таласаста и шестоугаони.

У експерименту М3 испитан је утицај ојачања стакленим влакнима на механичке карактеристике узорака од Оникса. Вариран је број ојачаних слојева и број концентричних прстенова. Повећањем запреминског удела ојачања постижу се значајно боље вредности механичких карактеристика. Узорак од Оникса, штампан са троугаоним обликом испуне, ојачан са четири концентрична прстена ојачања и шест ојачаних слојева има затезну чврстоћу око 70 МПа што је око четири пута више у односу на узорак без ојачања. Закључак експеримента М3 је да коришћењем ојачања могу бити постигнуте високе вредности затезних карактеристика.

Први експеримент савијања изведен је са металним алатима. Процес једноугаоног савијања у коме је вредност деформационе силе ограничена на 600 N, 1000 N, 1500 N и 2000 N урађен је да би био проверен утицај деформационе силе на еластично исправљање. Исти експеримент анализиран је методом коначних елемената и на основу подударности експерименталних и нумеричких резултата одређена је геометрија алата која ће при ограниченој вредности деформационе силе од 600 N дати жељену вредност угла савијања од 90° . Нумеричка симулација процеса савијања урађена је у софтверу *Simufact.forming*. Симулација је дефинисана као 2D раванска, коришћени су елементи *Advancing front quad* и *Quads*. Урађене су две симулације, у првој су алати дефинисани као крута а у другој као деформабилна тела. Дефинисано је да деформисање престане после достизања ограничења вредности деформационе силе и да затим уследи симулација растерећења односно процена еластичног исправљања. Варирано је неколико вредности углова и на основу резултата нумеричке симулације одређено је да угао обликача треба да буде 84° а угао матрице 85° . Крива течења материјала лима DC04 одређена је тестом једноосног затезања.

Експеримент је поновљен са металним алатом са одређеним угловима који ће при максималној вредности деформационе силе од 600 N обезбедити угао савијања 90° . На овај начин доказано је да је могуће коришћењем нумеричких метода прецизно проценити ефекат еластичног исправљања лима при савијању, и кориговати сходно томе карактеристичне углове на радним деловима алата (матрица, обликач) како би се при малим вредностима деформационе силе добили делови од лима са тачним угловима савијања. Услови мале деформационе силе и елиминације калибрисања при савијању су неопходни при замени металних алата полимерним радним компонентама.

Пре употребе полимерних адитивно произведених алата урађена је нумеричка симулација савијања у којој су алати дефинисани као деформабилни и дефинисане су

карактеристике материјала, свакако најважнија је крива течења која је одређена у поглављу 5. За одређивање криве течења коришћени су резултати теста затезања материјала ABS и Оникс.

Процес савијања лима је успешно изведен са полимерним радним компонентама алата од ABS-а и Оникса. Никаква оштећења нису уочена ни на обликованом лиму ни на алатима чиме је доказано да је могуће користити полимерне алате у процесу савијања лима. Ови резултати су у потпуности доказали прву хипотезу да је могуће користити полимерне 3D штампане алате у одређеним процесима обликовања лимова. Експеримент је потврдио резултате нумеричке симулације, никаквих промена на алатима није било и тачност савијених делова, одређена 3D оптичким скенирањем, је била у теоријски предвиђеном опсегу $\pm 1^\circ$. Експерименти са полимерним алатима доказали су другу хипотезу да је на основу познавања карактеристика материјала и резултата нумеричке симулације на бази методе коначних елемената могуће прецизно одредити угао компензације еластичног исправљања код једноугаоног савијања лима како у металним тако и у полимерним алатима.

После потврђивања прве и друге хипотезе приступљено је последњем делу експерименталног истраживања, анализи процеса савијања лима коришћењем тополошки оптимизованих алата. На основу резултата нумеричке симулације са деформабилним алатима дефинисано је оптерећење којим су алати изложени током процеса савијања. Оптерећење алата је дефинисано за тренутак процеса савијања када је контактни притисак највећи. На основу површине алата која је оптерећена и вредности контактеног притиска дефинисани су интензитет, правац и смер силе која делује на алат у критичним местима. Приликом дефинисања параметара процеса тополошке оптимизације дефинисани су услови које захтевају правила конструисања за адитивну производњу и механичке карактеристике материјала одређене у петом поглављу. У софтверу за тополошку оптимизацију *nTopology* је према резултатима испитивања материјала наведена максимална вредност напона коју материјал може да издржи узимајући у обзир степен сигурности 1,1. Дефинисана је вредност угла од 45° , која представља минималну вредност угла препуста према DFAM правилима, да би алат добијен тополошком оптимизацијом могао да буде штампан без употребе потпорних структура. Анализом два испитана материјала закључено је да је боље користити материјал ABS јер код њега нису уочене велике еластичне деформације. Према препорученим параметрима штампања тополошки оптимизовани радни делови алата су израђени и коришћени у експерименту. Резултати експеримента са тополошки оптимизованим алатима су били успешни, алати су били без оштећења и сви узорци су задовољили тражену тачност. Овим експериментом је у потпуности потврђена и трећа хипотеза.

Трећа хипотеза је успешним експериментом са тополошки оптимизованим алатом потврђена али пошто је експеримент изведен у лабораторијским условима на машини за испитивање материјала, одлучено је да се експеримент понови са једним примером из индустрије, као студија случаја. На одабраном примеру носача поновљена је процедура, методом коначних елемената направљена је симулација процеса и на основу резултата дефинисани су геометрија алата и оптерећење алата. Разматрани носач се прави у четири операције савијања са универзалним алатима, две операције савијања радијуса и две савијања под углом 90° . На основу геометрије универзалних алата конструисан је алат који је направљен адитивном производњом. Матрица је направљена тако да може да се користи за све операције а поред ње конструисани су обликачи за савијање радијуса и савијање под 90° . Урађена је нумеричка симулација све четири операције и одређена су оптерећења која делују на алат. Резултат нумеричке

симулације је показао да геометрија носача одговара прописаној техничком документацијом. Урађена је тополошка оптимизација матрице поштујући правила конструисања за адитивну производњу да употреба потпорних структура не би била потребна. Алата су адитивно произведени на штампачу *Makerbot replicator 2X* од материјала *ABS*. Експеримент је изведен са адитивно произведеним алатом као и са тополошки оптимизованим алатом. Тачност направљених носача је проверена оптичким скенирањем тако што је геометрија носача добијена скенирањем извезена као *stl* фајл који је у софтверу *Gom inspect* упоређен са *CAD* моделом носача. Експериментом су добијени носачи који одговарају конструктивним захтевима чиме је трећа хипотеза још једном потврђена.

Доказивањем све три хипотезе испуњен је циљ ове дисертације. Доказано је да је познавањем механичких карактеристика и криве течења адитивних полимерних материјала могуће направити прецизну нумеричку симулацију и пројектовати процес обликовања лимова при малим вредностима деформационе силе. На основу резултата нумеричке симулације могуће је оптимизовати алате методом тополошке оптимизације и направити значајне уштеде у времену и материјалу. Техно-економском анализом закључено је да овакав начин израде алата за савијање значајно може да смањи време израде и цену алата који се могу користити за мале производне серије.

Остварени резултати потврђују да је применом нумеричких метода и познавањем механичких карактеристика полимерних материјала могуће ефикасно пројектовати алате за савијање лимова, чиме се отварају нове могућности за бржу, економичнију и флексибилнију производњу у малим серијама.

Предложени модел оптимизације је прилагодљив и може бити коришћен и на другим технологијама обликовања лима за добијање сложенијих облика. С обзиром да су све хипотезе доказане применом два материјала на једноставном моделу једноугаоног савијања, правци будућих истраживања биће усмерени на: 1) разматрање употребе других материјала и технологија адитивне производње, 2) примени оствареног модела на сложенијим примерима обликовања лима попут дубоког извлачења делова сложеног облика и 3) темељну анализу утицаја сложених параметара тополошке оптимизације.

Литература

- [Александровић, 2010] Александровић, С., Стефановић, М. (2010). Технологија пластичног обликовања метала. *Машински факултет у Крагујевцу, Србија*.
- [Александровић, 2012] Предавања из предмета Производне технологије са *moodle portal*-а Факултета инжењерских наука
- [Вујовић, 1990] Вујовић, В. (1990). Технологија пластичности у машинству I део. Факултет техничких наука, Институт за производно машинство.
- [Девецић, 1975] Девецић, Б. (1975). *Основи теорије пластичног деформисања метала. Машински факултет У Крагујевцу*.
- [Девецић, 1981] Девецић, Б. (1981). Обрада метала деформисањем: (Увод у теорију и технологију индустријске обраде лима). Део 2. Грађевинска књига, Београд.
- [Делић, 2014] Марко Делић, Теоријске основе Тагучијевих метода са примером практичне примене, Мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014.
- [Јовичић, 1980] Јовичић, М., Димитријевић-Марковић, Л. (1980). *Приручник за конструисање алата за обраду деформацијом*. Машински факултет.
- [Малов, 1963] Malov, A. N. (1963). *Tehnologija holodnoї štampovki*. OBORONGIZ.
- [Мандић, 2012] Мандић, В. (2012). Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу
- [Мандић, скрипта CAD/CAM/CAE/2] Мандић, В. CAD/CAM/CAE 2. Скрипта. Moodle portal, Факултет инжењерских наука Крагујевац.
- [Мусафија, 1988] Musafija, B. (1988). *Obrada metala plastičnom deformacijom*, 5. izdanje. *Sarajevo Svjetlost*.
- [Поповић, 2020] Марко Поповић, Примена техника и система за адитивну производњу у брзој изради прототипова алата, Мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.
- [Секуловић, 1982] Миодраг Секуловић, (1982). *Метод коначних елемената*. Грађевинска књига, Београд.
- [Ћирић Костић, 2020] Ćirić Kostić, S., Bogojević, N. (2020). *Principi i primena aditivne proizvodnje*, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu.
- [3dsystems] интернет страница http://www.3dsystems.ru/products/productiontooling/3dkeltool/products_3dkel_howitworks.asp.htm, датум приступа 10.9.2024.
- [Agrawal, 2023] Agrawal, A. P., Kumar, V., Kumar, J., Paramasivam, P., Dhanasekaran, S., & Prasad, L. (2023). An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. *Heliyon*, 9(6), 1-12.
- [Aleksandrović, 2021] Aleksandrović, M., Ratković Kovačević, N., Kreculj, D., Dihovični, Đ., Jakovljević, P. (2021). Making a 3d printer of delta configuration using open-source project. *Structural integrity and life*. 22 (1), 125–130.
- [all3dp] интернет страница <https://all3dp.com/>, датум приступа 6.6.2023.

- [Alvarez, 2016] Alvarez C, K. L., Lagos C, R. F., & Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110-116.
- [Amirruddin, 2022] Amirruddin, M.S., Ismail, K.I., Yap, T.C. (2022). Effect of layer thickness and raster angle on the tribological behavior of 3D printed materials, *Materials Today: Proceedings*, 48, 1821–1825.
- [Asnafi, 2019] Asnafi, N., Rajalampi, J., & Aspenberg, D. (2019, November). Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 651, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- [Ayatollahi, 2020] Ayatollahia, M., Nabavi-Kivia, A., Bahramia, B., Yazid Yahyab, M., Khosravani, M.R. (2020). The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, 237, 1-13.
- [Aydın, 2022] Aydın, M., Öztürk, O., Türköz, M. (2022). Determination Of Geometrical Properties of Formed Sheet Metal Parts With 3D Scanning Method, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'22)*, November 17-19, Konya, Turkey.
- [Azam, 2024] Azam, M. U., Belyamani, I., Schiffer, A., Kumar, S., Askar, K. (2024). Progress in selective laser sintering of multifunctional polymer composites for strain-and self-sensing applications. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [Bakhshi-Jooybari, 2009] Bakhshi-Jooybari, M., Rahmani, B., Daezadeh, V., Gorji, A. (2009). The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes, *Materials and Design*, 30, 2410–2419.
- [Bárník, 2019] Bárnika, F., Vaško, M., Handrika, M., Dorčiaka, F., Majkoa, J. (2019). Comparing mechanical properties of composites structures on Onyx base with different density and shape of fill, *Transportation Research Procedia*, 40, 616–622.
- [Bârsan, 2023] Bârsan, A., Racz, S., Breaz, R., Crenganis, M. (2023). Evaluation of the dimensional accuracy through 3D optical scanning in incremental sheet forming, *Materials Today: Proceedings*, 93, 594-598.
- [BCN3D] интернет страница <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>, датум приступа 17.8.2024.
- [Bist, 2022] Bist, A., Dobriyal, R., Gwalwanshi, M., & Avikal, S. (2022). Influence of layer height and print speed on the mechanical properties of 3D-printed ABS. In *AIP Conference Proceedings*, 2481(1), 1-8.
- [Bourell, 2017] Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 66(2), 659-681.
- [Bouzaglou, 2023] Bouzaglou, O., Golan, O., & Lachman, N. (2023). Process design and parameters interaction in material extrusion 3D printing: a review. *Polymers*, 15(10), 1-35.
- [Brackett, 2011] Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing.
- [Britannica] интернет страница <https://www.britannica.com/science/acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer>, датум приступа 23.7.2024.
- [Callister, 2020] Callister Jr, W. D., Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.

- [Cicero, 2021] Cicero, S., Martínez-Mata, V., Castanon-Jano, L., Alonso-Estebanez, A., Arroyo, B. (2021). Analysis of notch effect in the fracture behaviour of additively manufactured PLA and graphene reinforced PLA, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114, 1-11.
- [Claus, 2021] Claus, F., Hamann, B., Leitte, H., Hagen, H. (2021). Decomposing deviations of scanned surfaces of sheet metal assemblies, *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 125-138.
- [Clausen, 2016] Anders Clausen, Phd thesis, Topology optimization for additive manufacturing, Technical university of Denmark, Lyngby, 2016.
- [David] интернет страница <https://www.manualslib.com/products/David-Sls-2-3577600.html>, упутство за коришћење скенера David SLS 2, датум приступа 29.10.2024.
- [Delić, 2023] Delić, M., Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D. (2023). Determination of the influence of infill pattern and fiberglass reinforcement on the tensile properties of additively manufactured material by FDM technology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(11), 5569-5575.
- [Delić, 2024] Delić, M., Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, D., Adamović, D., Ratković, N. (2024). Influence of FDM printing parameters on the compressive mechanical properties and fracture behavior of ABS material. *European Conference on Fracture 2024, August 26 - 30, 2024. Zagreb, Croatia. Book of abstracts*, 309.
- [Delić, 2025a] Delić, M., Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, D. (2025). Determination of the influence of FDM printing parameters on tensile strength and fracture occurrence of additively manufactured ABS material. *International Journal of Structural Integrity*, 16(3), 570-590.
- [Delić, 2025b] Delić, M., Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, D., Ratković, N., Adamović, D. (2025). Influence of FDM printing parameters on the compressive mechanical properties and fracture of ABS material. *Procedia Structural Integrity*, 68, 741-745.
- [Dezelak, 2012] Dezelak, M., Pahole, I., Ficko, M., Brezocnik, M. (2012). MACHINE LEARNING FOR THE IMPROVEMENT OF SPRINGBACK MODELLING. *Advances in Production Engineering & Management*, 7(1).
- [Dizon, 2018] Dizon, J. R. C., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive manufacturing*, 20, 44-67.
- [Dorčiak, 2019] Dorčiak, F., Vaško, M., Handrika, M., Bárnika, F., Majko, J. (2019). Tensile test for specimen with different size and shape of inner structures created by 3D printing, *Transportation Research Procedia*, 40, 671-677.
- [Durgun, 2014] Durgun, I. (2014). Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool, *Rapid Prototyping Journal*, 21, 412-422.
- [Ezeh, 2019] Ezeh, O.H., Susmel, L. (2019). Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of raster angle and non-zero mean stresses, *International Journal of Fatigue*, 126, 319-326.
- [Formlabs] интернет страница <https://formlabs.com/applications/rapid-tooling/>, датум приступа 10.9.2024.
- [Frohn-Sörensen, 2021] Frohn-Sörensen, P., Geueke, M., Tuli, T.B., Kuhnhen, C., Manns, M., Engel, B. (2021). 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 2623-2637.

- [Gan, 2004] Gan, W., Wagoner, R. H. (2004). Die design method for sheet springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 (7), 1097-1113.
- [Gao, 2016] Gao, H., Sheikholeslami, Dearden, G., Edwardson, S.P. (2016). Development of scan strategies for controlled 3D laser forming of sheet metal components, *Physics Procedia*, 83, 286 – 295.
- [Gao, 2017] Gao, H., Sheikholeslami, Dearden, G., Edwardson, S.P. (2017). Reverse analysis of scan strategies for controlled 3D laser forming of sheet metal, *Procedia Engineering*, 183, 369–374.
- [Garmendia, 2020] Garmendia, I., Floresa, J., Madarietaa, M., Lamikizb, A., Uriarte, L.G. (2020). Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts, *Procedia CIRP*, 94, 425–429.
- [Geueke, 2021] Geueke, M., Frohn-Sorensen, P., Reuter, J., Padavu, N., Reinicke, T., Engel, B. (2021). Structural optimization of additively manufactured polymer tools for flexible sheet metal forming, *Procedia CIRP*, 104, 1345–1350.
- [Ghebretinsae, 2019] Ghebretinsae, F., Mikkelsen, O., & Akessa, A. D. (2019). Strength analysis of 3D printed carbon fibre reinforced thermoplastic using experimental and numerical methods. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 700 (1), 12–24.
- [Gibson, 2021] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- [Gibson, 2021] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- [Gong, 2021] Gong, Z., Singh, M., Fang, B., & Wei, D. (2021). An Enhanced Hybrid Springback Compensation Approach: Springback Path–Displacement Adjustment Method For Complex Shaped Products of Sheet Metal Forming.
- [Guajardo-Trevino, 2022] Guajardo-Trevino, A.M., Ahuett-Garza, H., Orta-Castanon, P., Urbina-Coronado, P.D., Saldana, C., Kurfess, T. (2022). Effects of deposition - strategy - induced raster gaps and infill voids on the compressive strength of 3D printed isogrid structures, *Manufacturing Letters*, 31, 15–19.
- [GVR] интернет страница <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>, датум приступа 18.8.2024.
- [Helle, 2021] Helle, R., Lemu, H. (2021). A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control, *Materials Today: Proceedings*, 45, 5255–5262.
- [Heralić, 2012] Heralić, A., Christiansson, A., Lennartson, B. (2012). Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning, *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 1230–1241.
- [Hetrick, 2020] Hetrick, D. R., Sanei, S. H. R., Bakis, C. E., & Ashour, O. (2021). Evaluating the effect of variable fiber content on mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(9-10), 365-377.

- [Ibson, 2014] Ibson, H., Souza, J., Buijk, A., Pursell, Z. (2014). Study on the determination of optimal parameters for the simulation of the forming process of thick sheets, *4^a Conferência Internacional de Conformação de Chapas*, 8-10 October, Porto Alegre, Brasil.
- [ISO/ASTM 52900] ISO/ASTM 52900:2021(en), Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2021.
- [Jakovljević, 2022] Jakovljević, P., Dihovični, Đ., Bijelić, I., Kreculj, D., Ratković Kovačević, N., (2022). Experiences in 3d printing applied in education. *Structural integrity and life*. 22 (1), 43–47.
- [Jap, 2019] Jap, N., Pearcea, G., Hellierb, A., Russellc, N., Parrc, W., Walshc, W. (2019). The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer, *International Journal of Fatigue*, 124, 328–337.
- [Kamer, 2022] Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., & Akay, O. R. H. A. N. (2022). Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(3), 1197-1211.
- [Kandemir, 2018] Kandemir, V., Dogan, O., Yaman, U. (2018). Topology optimization of 2.5D parts using the SIMP method with a variable thickness approach, *Procedia Manufacturing*, 17, 29-36.
- [Khosravani, 2020] Khosravani, M.R., Reinicke, T. (2020). Effects of raster layup and printing speed on strength of 3D-printed structural components, *Procedia Structural Integrity* 28, 720–725.
- [Kim, 2008] An, J. H., Ko, D. C., Lee, C. J., Kim, B. M. (2008). Springback Compensation of Sheet Metal Bending Process Based on DOE & ANN. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 32(11), 990-996.
- [Klimyuk, 2021] Klimyuk, D., Serezhkin, M., Plokhikh, A. (2021). Application of 3D printing in sheet metal forming, *Materials Today: Proceedings*, 38, 1579–1583.
- [Krishna, 2017] Siva Rama Krishna, L., Mahesha, N., Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 4, 1414–1422.
- [Kumar, 2016] Kumar, S., Choudhary, A. K. S., Singh, A. K., Gupta, A. K. (2016). A comparison of additive manufacturing technologies. *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol*, 3, 147-152.
- [Kumar, 2021] Kumar, S. P., Elangovan, S., Mohanraj, R., Ramakrishna, J. R. (2021). A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7892-7906.
- [Lal, 2016] Lal, R. K., Bhagat, M. K., Dwivedi, J. P., Singh, V. P., & Patel, S. K. (2016). Springback analysis in sheet metal forming by using the Ramberg–Osgood stress–strain relation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 57, 1133-1140.
- [Li, 2016] Li, Q., Chen, W., Liu, S., Tong, L. (2016). Structural topology optimization considering connectivity constraint. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 971-984.

[Liu, 2018] Liu, H., Yanga, D., Hao, P., Zhu, X. (2018). Isogeometric analysis based topology optimization design with global stress constraint, *Computers and Structures*, 342, 625–652.

[Makerbot] интернет страница https://downloads.makerbot.com/replicator2x/MakerBot_Replicator2X_UserManual_Eng.pdf, упутство за коришћење 3D штампача Makerbot replicator 2X, датум приступа 23.12.2024.

[Мандић, 2022] Предавања из предмета Адитивна производња са moodle portal-а Факултета инжењерских наука

[Markforged] интернет страница <https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/Material+Datasheets/Composites/MaterialDatasheet.pdf>, сајт компаније Markforged, датум приступа 24.7.2024.

[Mazzanti, 2019] Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019). FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers*, 11(7), 1094.

[Minetola, 2020] Minetola, P., Calignano, F., Galati, M. (2020). Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers, *Additive Manufacturing*, 32, 1-10.

[Mohamed, 2015] Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in manufacturing*, 3, 42-53.

[Mohamed, 2018] Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L. (2018). Analysis of wear behavior of additively manufactured PC-ABS parts, *Materials Letters*, 230, 261–265.

[Mohan, 2021] Mohan, R.G., Santhosh, K., Iyer, R., John, L., Ramu, M. (2021). Comparative analysis of mechanical properties of FDM printed parts based on raster angles, *Materials Today: Proceedings*, 47, 4730–4734.

[Morgan, 2014] Morgan, H. D., Levatti, H. U., Sienz, J., Gil, A. J., Bould, D. C. (2014). GE Jet engine bracket challenge: a case study in sustainable design. *Sustainable design and manufacturing*, 14(2), 3.

[Msc] Msc Marc и Msc Dytran – manual. Simufact forming 15 – Technical references.

[Mulidrán, 2019] Mulidrán, P., Spišák, E., Tomáš, M., Vrabel, M., Greš, M. (2019). The influence of Yield criterion on springback prediction in V-bending process. *The International Journal of Engineering and Science*, 8 (3), 76-79.

[Myung Kyun Sung, 2023] Sung, M.K., Schwerin, M., Badhe, Y., Porter, D. (2023). Influence of topology optimization parameters on the mechanical response of an additively manufactured test structure, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 142, 1-14.

[Nabeel Younas, 2020] Younas, N., Chalala, H., Abed-Meraima, F. (2020). Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming Processes using Non- Quadratic Anisotropic Plasticity Models and Solid Shell Finite Elements, *Procedia Manufacturing*, 47, 1416–1423.

[Nakamura, 2018] Nakamura, N., Mori, K., Abe, F., Abe, Y. (2018). Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer, *Procedia Manufacturing*, 15, 737-742.

[Nakamura, 2020] Nakamura, N., Mori, K., Abe, Y. (2020). Applicability of plastic tools additively manufactured by fused deposition modelling for sheet metal forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 975–985.

- [Naranjo-Lozada, 2019] Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garzaa, H., Orta-Castañón, P., Verbeetenb, W., Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 26, 227–241.
- [Nath, 2020] Nath, P., Olsona, J., Mahadevana, S., Tina Lee, Y.T. (2020). Optimization of fused filament fabrication process parameters under uncertainty to maximize part geometry accuracy, *Additive Manufacturing*, 35, 1-12.
- [nTop] *nTopology learning center* - званични сајт компаније *nTopology*, интернет страница <https://learn.ntop.com/>, датум приступа 5.4.2023.
- [Omnexus] интернет страница <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>, Omnexus - The material selection platform, датум приступа 23.7.2024.
- [Pačák, 2017] Pačák, T. Methodology of the springback compensation in sheet metal stamping processes. In *METAL 2017 Conference Proceedings*, 502-507.
- [Pernica, 2021] Pernica, J., Sustr, M., Dostal, P., Brabec, M., Dobrocky, D. (2021). Tensile Testing of 3D Printed Materials Made by Different Temperature, *Manufacturing technology*, 21, 1-7.
- [Petruse, 2019] Petruse, R. E., Pușcașu, S., Pascu, A., & Bondrea, I. (2019). Key factors towards a high-quality additive manufacturing process with ABS material. *Materials Today: Proceedings*, 12, 358-366.
- [Prathyusha, 2022] Prathyusha, A. L. R., & Babu, G. R. (2022). A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 62, 109-117.
- [Reche, 2012] Reche, D., Besson, J., Sturel, T., Lemoine, X., Gourgues-Lorenzon, A.F. (2012). Analysis of the air-bending test using finite-element simulation: Application to steel sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 57, 43–53.
- [Sachs, 1966] Sachs, G. (1966). Principles and methods of sheet-metal fabricating.
- [Sandeep, 2017] Sandeep, D. C., Chhabra, D. (2017). Comparison and analysis of different 3d printing techniques. *Int. J. Latest Trends Eng. Technol*, 8(10.21172), 1-841.
- [Saraf, 2020] Saraf, B., Garg, A., Saurav, S., Bhattacharya, A. (2020). Joining of ABS parts built by material extrusion: Analysis of strength and fracture behaviour, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 459–466.
- [Schuh, 2020] Schuh, G., Bergweiler, G., Bickendorf, P., Fiedler, F., Colag, C. (2020). Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools, *Procedia CIRP*, 93, 20-25.
- [Sharma, 2022] Sharma, P.K., Gautam, V., Agrawal, A.K. (2022). Investigations on effect of bending radius on springback behaviour of three-ply clad sheet, *Materials Today: Proceedings*, 62, 1651–1657.
- [Sigmund, 2013] Sigmund, O., Maute, K. (2013). Topology optimization approaches: A comparative review. *Structural and multidisciplinary optimization*, 48(6), 1031-1055.
- [Smith, 2017] Smith, W. (2017). Resin Systems. In *Delaware composites design encyclopedia* (pp. 13-86). Routledge.
- [Sood, 2010] Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 224(1), 135-145.

[Stander, 2002] Stander, N., Burger, M., Zhu, X., & Maker, B. (2002). Springback compensation in sheet metal forming using a successive response surface method. In *9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, 5539-5549.

[Stefanovska, 2012] Dezelak, M., Pahole, I., Ficko, M., & Brezocnik, M. (2012). MACHINE LEARNING FOR THE IMPROVEMENT OF SPRINGBACK MODELLING. *Advances in Production Engineering & Management*, 7(1), 17-26.

[Sukindar, 2017] Sukindar, N. A. B., Ariffin, M. K. A. B., Baharudin, B. T. H. T., Jaafar, C. N. A. B., & Ismail, M. I. S. B. (2017). Analysis on the impact process parameters on tensile strength using 3d printer repetier-host software. *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, 12(10), 3341-3346.

[Tamez, 2021] Tamez, M. B. A., Taha, I. (2021). A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration. *Additive Manufacturing*, 37, 101748.

[Tandon, 2021] Tandon, S., Kacker, R., Sudhakar, K.G. (2021). Experimental investigation on tensile properties of the polymer and composite specimens printed in a Triangular pattern, *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 706–715.

[Tondini, 2021a] Tondini, F., Arinbjarnar, U., Basso, A., Nielsen, C.V. (2021). 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production, *Procedia CIRP*, 103, 91–96.

[Tondini, 2021b] Tondini, F., Basso, A., Arinbjarnar, U., Nielsen, C.V. (2021). The Performance of 3D Printed Polymer Tools in Sheet Metal Forming, *Metals*, 11, 1-11.

[Tripathy, 2022] Tripathy, C. R., Sharma, R. K., & Rattan, V. K. (2022). Effect of printing parameters on the mechanical behaviour of the thermoplastic polymer processed by FDM technique: A research review. *Advances in Production Engineering & Management*, 17(3), 279-294.

[Trzepieciniski, 2017] Trzepieciniski, T., Lemu, H. (2017). Effect of Computational Parameters on Springback Prediction by Numerical Simulation, *Metals*, 7, 1-14.

[Vaezi, 2014] Vaezi, M., Safaeian, D., & Chua, C. K. (2011). Gas turbine blade manufacturing by use of epoxy resin tooling and silicone rubber molding techniques. *Rapid Prototyping Journal*, 17(2), 107-115.

[Vicente, 2016] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.

[Wang, 2021] Wang, K., Cai, R., Zhang, Z., Liu, J., Ahzi, S., Peng, Y., Rao, Y. (2021). Compressive behaviors of 3D printed polypropylene-based composites at low and high strain rates. *Polymer Testing*, 103, 107321.

[Weiher, 2004] Weiher, J., Rietman, B., Kose, K., Ohnimus, S., Petzoldt, M. (2004). Controlling springback with compensation strategies. In *AIP conference proceedings* (Vol. 712, No. 1, pp. 1011-1015). American Institute of Physics.

[Wittbrodt, 2015] Wittbrodt, B., Pearce, J. (2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components, *Additive Manufacturing*, 8, 110–116.

[Xometry] интернет страница <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/what-is-infill-in-3d-printing/>, датум приступа 25.7.2024.

- [Xometry] интернет страница <https://xometry.pro/en-eu/articles/3d-printing-file-formats/>, датум приступа 18.8.2024.
- [Xu, 2012] Xu, D., Chen, J., Tang, Y., Cao, J. (2012). Topology optimization of die weight reduction for high - strength sheet metal stamping, *International Journal of Mechanical Sciences*, 59, 73–82.
- [Xu, 2021] Xu, Z., Medoria, E., Sarasinib, F., Razavi, S.M.J. (2021). Quasi-static behavior of 3D printed lattice structures of various scales, *Procedia Structural Integrity*, 33, 578–585.
- [Yago, 2022] Yago, D., Cante, J., Lloberas-Valls, O., Oliver, J. (2022). Topology optimization methods for 3D structural problems: a comparative study. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(3), 1525-1567.
- [Yong Sun, 2018] Sun, Y., Qu, F., Xiong, Z., Ding, S. (2018). Numerical study on springback of aged steel based on quasi-static strain-hardening material model, *Procedia Manufacturing*, 15, 730–736.
- [Yoon, 2021] Yoon, G.H. (2021). Structural topology optimization of layout and raster angle for additive manufacturing technology with the shadow density filter, *Computers and Structures*, 256, 1-17.
- [Yu, 2019] Yu, T., Zhang, Z., Song, S., Bai, Y., & Wu, D. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 111-147.
- [Zaragoza, 2019] Zaragoza, V.G., Strano, M., Iorioc, L., Monno, M. (2019). Sheet metal bending with flexible tools, *Procedia Manufacturing*, 29, 232-239.
- [Zaragoza, 2021] Zaragoza, V.G., Rane, K., Strano, M., Monno, M. (2021). Manufacturing and performance of 3D printed plastic tools for air bending applications, *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 460–469.
- [Zhang, 2016] Zhang, D., Li, Y., Liu, J., Xie, G., Su, E. (2016). A novel 3D optical method for measuring and evaluating springback in sheet metal forming process, *Measurement*, 92, 303–317.
- [Zhao, 2002] Zhao, K.M., Lee, J.K. (2002). Finite element analysis of the three-point bending of sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 122, 6-11.
- [Zhou, 2022] Zhou, M., Lu, Y., Liu, Y., Lin, Z. (2022). Concurrent topology optimization of shells with self-supporting infills for additive manufacturing, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 390, 1-25.
- [Zhu, 2020] Jihong, Z. H. U., Han, Z. H. O. U., Chuang, W. A. N. G., Lu, Z. H. O. U., Shangqin, Y. U. A. N., Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110.

Биографија аутора

Марко Делић је рођен 29. јануара 1990. године у Крагујевцу. Завршио је основну школу Доситеј Обрадовић и Прву крагујевачку гимназију, одељење ученика обдарених за математику. Након завршене гимназије уписао је основне академске студије машинског инжењерства на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Основне академске студије је завршио 2012. године са просеком 9,30. Мастер академске студије уписао је 2012. и дипломирао 2014. године са просеком 9,75. Докторске академске студије уписао је 2018. године. Положио је све испите предвиђене студијским програмом са просечном оценом 10.

После завршених мастер студија четири године је радио као технолог у предузећу Застава оружје АД. Бавио се пројектовањем технологије израде делова, конструисањем стезних алата, контролника и алата за обраду деформисањем. Познаје програмирање *CNC* стругова и обрадних центара. Значајан део рада у привреди посветио је технологији израде пушчаних цеви, нарочито технологији олучења цеви хладним ковањем.

Од марта 2019. године ради као асистент на Факултету инжењерских наука. Изводи вежбе на предметима из области технологије пластичног обликовања, адитивних технологија и сродних области: Производне технологије, Производне технологије 2, Машине и алати у обради деформисањем, Савремени поступци пластичног обликовања, Обрадивост у процесима пластичног обликовања, *CAD/CAM/CAE1*, *CAD/CAM/CAE2*, Машински материјали, Адитивна производња и Виртуелни инжењеринг.

Учествовао је у реализацији неколико међународних пројеката. Научно-истраживачки рад је усмерен на области обраде деформисањем, нумеричке симулације процеса обраде деформисањем, адитивне технологије и реверзно инжењерство. Објавио је више од 30 радова у научним часописима и конференцијама, од чега је седам радова објављено у часописима индексираним на *SCI* листи.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

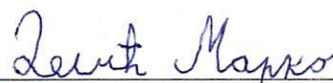
„Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу“

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 20.8.2025. године,

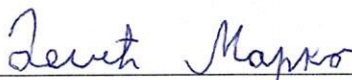


потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:
„Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за
савијање лима праћено еластичном повратношћу“,
истоветне.

У Крагујевцу, 20.8.2025. године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Марко Делић,

☒

дозвољавам

☐

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

„Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу“,

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

☒

дозвољавам

☐

не дозвољавам¹

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Крагујевцу, 20.8.2025. године,


потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>