



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА УНИВЕРЗИТЕТА У
КРАГУЈЕВЦУ

Вукашин Р. Славковић

**РАЗВОЈ И ПРИМЕНА МАТЕРИЈАЛНОГ
МОДЕЛА ПОЛИМЕРНИХ МАТЕРИЈАЛА
СА СВОЈСТВОМ ПАМЋЕЊА ОБЛИКА**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2021.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Vukašin R. Slavković

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF
SHAPE MEMORY POLYMERS MATERIAL
MODEL**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2021

I. Аутор
Име и презиме: Вукашин Славковић
Датум и место рођења: 05.08.1983. године, Крагујевац, Република Србија
Садашње запослење: Асистент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу
II. Докторска дисертација
Наслов: Развој и примена материјалног модела полимерних материјала са својством памћења облика
Број страница: 146
Број слика: 102
Број библиографских података: 171
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК): Примењена механика, Испитивање полимерних материјала, Метода коначних елемената (620.179.2:678.71]:519.6)
Ментор: др Ненад Грујовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу
III. Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 12.12.2016.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: IV-04-379/13 од 12.04.2017
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:
1. Др Ненад Грујовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
2. Др Мирослав Живковић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
3. Др Ненад Филиповић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
4. Др Драган Адамовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
5. Др Мирослав Трајановић, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Нишу
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
1. Др Мирослав Живковић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
2. Др Ненад Филиповић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
3. Др Владимир П. Миловановић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
4. Др Драган Ракић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
5. Др Никола Коруновић, ванредни професор, Машински факултет Универзитета у Нишу
Датум одбране дисертације:

РАЗВОЈ И ПРИМЕНА МАТЕРИЈАЛНОГ МОДЕЛА ПОЛИМЕРНИХ МАТЕРИЈАЛА СА СВОЈСТВОМ ПАМЋЕЊА ОБЛИКА

Сажетак

Полимерни материјали са својством памћења облика (енг. Shape Memory Polymers – SMP) представљају брзо растућу групу, чак и међу напредним материјалима. Ова група материјала одликује се способношћу обнове облика након деформације применом адекватног спољашњег стимуланса. Ефекат памћења облика прати сложенем термо-механичко понашање које се манифестује двојачко: израженом осетљивошћу материјала на температуру испитивања/експлоатације и осетљивост на брзину деформације/испитивања. Такође, материјали са наведеним својством могу бити изложени изузетно великим деформацијама ($> 300\%$) па се услед тога морају користити формулације за решавање великих деформација.

Предочени захтеви су решени у неколико корака

(1) Предложен је модификовани материјални модел сачињен од више микромеханизама, који сваки понаособ даје одговарајући допринос укупном напонском стању.

(2) За симулације термо-механичког понашања полимера са памћењем облика коришћено је спрегнуто моделирање повезивањем програма за структурну анализу и пренос топлоте, чиме се поред ефекта памћења облика моделира и пораст температуре у материјалу услед пластичне дисипације. Код проблема великих деформација коришћена је логаритамска деформација.

(3) Мултипликативна декомпозиција укупног градијента деформације извршена је за сваки од микромеханизама посебно, на еластични и пластични део.

(4) Одлике материјала потврђене су експерименталним испитивањима на узорцима од ПЛА и фотополимера. Израда узорака и експерименти су спроведени на опреми Факултета инжењерских наука. Део резултата који није било могуће добити услед ограничења опреме преузет је из доступне литературе. Добро слагање експерименталних резултата са резултатима модела показало је исправност теоријских претпоставки и оправдало формулисање модела.

Кључне речи: полимери са памћењем облика, 3Д штампа, 4Д штампа, метод коначних елемената, ПЛА, термо-механичко испитивање

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF SHAPE MEMORY POLYMERS MATERIAL MODEL

Abstract

Shape memory polymers (SMP) are a fast-growing group, even among advanced materials. This group of materials is characterized by the ability to recover permanent shape after deformation by applying an adequate external stimulus. The shape memory effect is accompanied by complex thermo-mechanical behaviour, which is manifested in two ways: strong temperature and strain rate dependence. Also, materials with this property can be exposed to extremely large deformations (> 300%), so large deformation theory must be applied. These tasks are solved in several steps:

(1) A modified material model consisting of several micro-mechanisms is proposed, each of which individually makes an appropriate contribution to the overall stress state.

(2) For simulations of thermo-mechanical behavior of SMPs, coupled modeling was used by connecting programs for structural analysis and heat transfer, allowing to model the temperature increase in the material due to plastic dissipation. For large deformation problems, logarithmic deformation was applied.

(3) Multiplicative decomposition of total deformation gradient is applied for each micro-mechanism individually, separating total deformation gradient in plastic and elastic part.

(4) Experimental testing is conducted on PLA and photopolymers specimens. All specimen and experiments are produced at the Faculty of Engineering. Missing results which were not possible to measure with given equipment are taken from literature. Good agreement of experiments with numerical results approve theoretical assumptions i accuracy of the proposed model.

Keywords: shape memory polymers, 3D printing, 4D printing, finite element method, PLA, thermo-mechanical testing

Захвалност

На првом месту и пре свега, желео бих да се искрено захвалим проф. др Ненаду Грујовићу за подршку и савете током наше вишегодишње сарадње. Његова широка знања о нумеричким методама, механици напредних материјала и адитивним технологијама, као и високи стандарди које је у току наше сарадње поставио, била су инспирација и подстрек за постизање свих резултата. Такође, захваљујем се свим члановима комисије за оцену моје докторске дисертације, проф. др Мирославу Живковићу, проф. др Ненаду Филиповићу, проф. др Николи Коруновићу, проф. др Драгану Ракићу и проф. др Владимиру Миловановићу.

Пуно захвалности дугујем и свим сарадњи Лабораторије за инжењерски софтвер са којима сам имао јако пријатну сарадњу. Сарадницима Николи Палићу и Страхини Миленковићу хвала на техничкој подршци у припреми експеримената, адаптацији опреме и техничкој обради рада. На крају, захваљујем се проф. др Мирославу Живковићу, проф. др Ненаду Филиповићу и проф. др Фатими Живић на прилици да будем део пројеката TR32036, ИИИ-41007 и Horizont2020 у оквиру којих сам имао прилику да учим, путујем и размењујем искуства са колегама из света, као и за финансирање током целог трајања докторских студија.

Садржај

Списак слика.....	ix
Списак табела	xiii
1 Увод	14
1.1 Мотивација	14
1.2 Полазне хипотезе	15
1.3 Методе у истраживању	15
1.4 Доприноси тезе	16
1.5 Структура тезе	17
1.6 Објављени радови повезани са темом дисертације.....	17
2 Преглед литературе.....	18
2.1 Историја и класификација полимера	18
2.2 ПЛА.....	19
2.3 Преглед стања у адитивним технологијама	20
2.4 Полимери са памћењем облика.....	27
2.5 Преглед материјалних модела	31
3 Кинематика деформације	34
3.1 Градијент деформације	34
3.2 Брзина деформације	37
3.3 Тензори напона	37
4 Експеримент.....	39
4.1 Опште карактеристике испитивања полимера	39
4.2 Опрема и методологија испитивања	43
4.2.1 Опрема.....	43
4.2.2 Адаптација опреме	47
4.2.3 Методологија	48
4.2.4 Мере деформације и напона.....	49
4.2.5 Мерење промене температуре при великим брзинама.....	52
4.3 Експериментална процедура	53
4.3.1 Израда узорака.....	53
4.3.2 Резултати испитивања. Анализа резултата.....	57
4.4 Израда и експериментално испитивање композита ојачаних влакнима од ПЛА применом 3Д штампе.....	62
4.4.1 Експеримент.....	62
4.4.2 Нумеричка анализа.....	63
4.4.3 Резултати и анализа.....	65

5	Материјални модел полимера са памћењем облика	67
5.1	Карактеристике полимера са својством памћења облика.....	67
5.2	Конститутивни модел.....	69
5.2.1	Слободна енергија.....	73
5.2.2	Конститутивне релације микромеханизма А.....	73
5.2.3	Конститутивне релације микромеханизма В.....	83
5.2.4	Микромеханизам С	87
5.2.5	Термичке релације.....	88
5.3	Верификација модела.....	88
5.3.1	Тестови на једном елементу	88
5.3.2	Нумеричка симулација ефекта памћења облика	90
5.3.3	Нумеричке симулације са константним временским кораком	94
5.4	Процедура нумеричке интеграције.....	95
5.4.1	Израчунавање материјалних Јакобијана	98
5.5	Материјални параметри модела	99
6	Идентификација материјалних параметара	105
6.1	Опште напомене о идентификацији параметара материјалног модела	105
6.2	1Д материјални модел	107
6.3	Идентификациони алат за одређивање параметара модела	111
7	Нумерички примери.....	114
7.1	Пример враћања облика у узорку од ПЛА прогревањем	114
7.2	Ефекат памћења облика у фотополимерима.....	122
7.3	Симулације притиска цилиндричних узорака	123
7.4	Ефекат памћења облика у чланковитој дијамантској структури.....	125
7.5	Симулација убацивања стента у артерију	129
8	Закључна разматрања.....	136
8.1	Закључци	136
8.2	Правац будућег истраживања.....	138
	Литература	139
	Додатак А	150
	А.1 Конститутивне релације	151
	А.2 Процедура нумеричке интеграције напона.....	154

Списак слика

Слика 2.1: Примена ПЛА у реконструкцији вилице.....	20
Слика 2.2: Историја развоја адитивних технологија	21
Слика 2.3: Илустрација концепта 3Д штампе	22
Слика 2.4: 3Д штампач нове генерације Creality CR-10-S5, радних димензија 500x500 mm, Центар за информационе технологије, Факултет инжењерских наука	23
Слика 2.5: Илустрација концепта 4Д штампе	24
Слика 2.6: 3Д штампани носач од ПЛА материјала	25
Слика 2.7: 4Д штампана хватаљка са памћењем облика која се активира температуром	25
Слика 2.8: Термо-активирајући стент израђен 4Д штампом	26
Слика 2.9: 4Д штампана самосклапајућа структура	26
Слика 2.10: Примена 4Д штампаних структура у изради метаматеријала.....	27
Слика 2.11: Примери примене полимера са својством памћења облика у медицини.....	27
Слика 2.12: Термо-механичко испитивање носача од ПЛА	28
Слика 2.13: Процес обнове облика у узорцима ПЛА при загревању на температури 80°C.	28
Слика 2.14. Мерење обнове облика у узорцима ПЛА након загревања на температури 80°C.....	29
Слика 2.15: Топло програмирање полимера са памћењем облика.....	30
Слика 2.16: Хладно програмирање полимера са памћењем облика.....	30
Слика 2.17: Програмирање 3Д штампањем.....	31
Слика 4.1: Карактеристичка крива напон-деформација са назначеним кључним регионима.....	40
Слика 4.2: Карактеристичка крива промене чврстоће материјала са температуром.....	41
Слика 4.3: Припрема притисних плоча наношењем тефлонских трака ради смањења трења контактних површина	42
Слика 4.4: Постизање температурне равнотеже у узорку и притисним плочама пре испитивања на температури од 50 °C.....	43
Слика 4.5: Сервохидрауличка кидалица, Факултет инжењерских наука, Лабораторија за динамичка испитивања и инжењерски софтвер.....	44
Слика 4.6: Управљање грејачима у комори: а) PID регулатор EURO THERM 2408 и б) софтверски пакет iTOOLS.....	45
Слика 4.7: Шематски приказ кидалице SHIMADZU	45
Слика 4.8.: Уграђен екстензометар на комори: а) пре загревања и б) за време загревања са укљученим системом воденог хлађења	46
Слика 4.9: Додатна опрема за испитивање на повишеним температурама: а) Комора за загревање узорака и б) контролер коморе	46
Слика 4.10: Комора за испитивање полимерних материјала на повишеним температурама адаптирана на постојећи мерни систем Brookfield	47
Слика 4.11: Додатни прихватни алати направљени за испитивање у комори високих температура на мерном систему Shimadzu	48
Слика 4.12. Процес обнове облика у узорцима фотополимера при загревању у комори на температури 90 °C. Код узорка је при деформисању дошло до извијања услед неусклађености односа пречника и висине... ..	49

Слика 4.13: Упоредни приказ инжењерске и стварне криве течења.....	50
Слика 4.14: Поређење експерименталних и стварних померања	52
Слика 4.15: Шема термовизијског мерења раста температуре у узорцима.....	52
Слика 4.16: Термовизијско мерење температуре у узорцима.....	53
Слика 4.17: Узорци спремни за испитивање и њихова припрема прогревањем у пећи.	54
Слика 4.18: Мерења транзиционе температуре и модула еластичности	55
Слика 4.19: Третирање узорака фотополимера у УВ комори.....	55
Слика 4.20: Слика узорка у транспарентној комори за испитивање на повишеним температурама	56
Слика 4.21: Слика узорка под микроскопом након испитивања. Уочава се иницијална прслина при деформацији од $\approx 40\%$	56
Слика 4.22: Криве напон-деформација ПЛА при брзинама деформације 0.0001 s-1, 0.001 s-1, 0.01 s-1 и 0.1 s-1	58
Слика 4.23: Криве напон-деформација ПЛА на температурама 25 °C, 37 °C, 50 °C.....	59
Слика 4.24: Криве напон-деформација ПЛА при брзинама деформације 0.001 s-1 и 0.01 s-1 на температурама 70 °C, 80 °C, 90 °C	60
Слика 4.25: Криве напон-деформација фотополимера при брзинама деформације 0.01 s-1 и 0.1 s-1; на температурама и 25 °C, 37 °C, 50 °C.....	61
Слика 4.26: Криве напон-деформација фотополимера при брзинама деформације 0.01 s – 1 и 0.1 s – 1; на температурама и 80 °C 90 °C.....	61
Слика 4.27: Процедура израде узорака - CAD модел са каналима за влакна (слика лево), положена влакна (средња слика), попречни пресек епрувете (слика десно).	62
Слика 4.28: Узорци за испитивање затезањем (лево) и савијањем у три тачке (десно). Узорци израђени у складу са ASTM D638 и ASTM D790 стандардом.....	62
Слика 4.29: Испитивање савијањем у три тачке	63
Слика 4.30: Узорци за нумеричку симулацију затезања: гранични услови (горе) и финија мрежа попречног пресека (доле).....	64
Слика 4.31: Израђени узорци за испитивање затезањем (лево) и савијање у три тачке (десно).....	65
Слика 4.32: Дистрибуција померања (горе) и напона (доле) у хомогенизованом моделу за узорак са оријентацијом $[-45^\circ, +45^\circ]$	65
Слика 4.33: Померања и напони за модел са два материјала, за композит са оријентацијом $[-45^\circ, +45^\circ]$, померања (горе), напони (у средини), напони у попречном пресеку (доле).....	65
Слика 4.34: Померања и деформације за композитни хомогенизовани узорак.....	66
Слика 5.1: Утицај параметра ширине транзиције на функцију мешања	69
Слика 5.2: Реолошки 1Д приказ модела.....	72
Слика 5.3: Промена модула еластичности са температуром	76
Слика 5.4: Промена Поасоновог коефицијента са температуром	77
Слика 5.5: Промена Поасоновог коефицијента са температуром	77
Слика 5.6: Промена активационог параметра А са температуром	80
Слика 5.7: Облик криве напонске променљиве ξ_1	80
Слика 5.8: Утицај напона течења ξ_u и напона омекшавања ξ_s на вредност напонске променљиве стања ξ_1	81
Слика 5.9 : Вредност напонске променљиве стања ξ_2 при оптерећењу и растерећењу	82
Слика 5.10: Промена модула смицања μV са температуром	86
Слика 5.11 Поређење нумеричких резултата са експериментом за брзине деформације 0.001 и 0.0001 s – 1.....	89
Слика 5.12: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру 25, 37, 50 °C.....	89

Слика 5.13: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру 0.01 и 0.1 s – 1	90
Слика 5.14: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру 25, 37, 50 °C.....	91
Слика 5.15 Криве стварни напон-стварна деформација за температуру 70, 80, 90 °C... 92	
Слика 5.16: Поређење нумеричких резултата са експериментом за брзине деформације 0.01 и 0.1 s – 1	92
Слика 5.17: Резултати модела приказани у три равни σ - ϵ , T - σ и T - ϵ	93
5.18: Приказ вредности симулације у координатном систему T - σ - ϵ	93
5.19: Утицај величине временског корака Δt на тачност интеграције напона за различите брзине деформације	94
Слика 5.20: Утицај појединих микромеханизама на укупан Кошијев напон испод Tg 100	
Слика 5.21: Утицај појединих микромеханизама на укупан Кошијев напон изнад Tg. 100	
Слика 5.22 Утицај параметара микромеханизма А на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији	101
Слика 5.23 Утицај параметара микромеханизма В на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији	102
Слика 5.24 Утицај параметара микромеханизма С на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији	102
Слика 6.1: Дијаграм добијања материјалних параметара	106
Слика 6.2: Алгоритам идентификације материјалних параметара помоћу идентификационог алата	112
Слика 6.3: Изглед графичког корисничког интерфејса идентификационог алата	113
Слика 7.1: Промене температуре и померања средишњег чвора горње површине узорка у току времена	115
Слика 7.2: Упоредни приказ поља температуре (колona лево) и померања (колona десно) током деформисања у термо-механичком циклусу	116
Слика 7.3: Упоредни приказ поља температуре (колona лево) и померања (колona десно) током загревања у термо-механичком циклусу	117
Слика 7.4: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 335 K.....	118
Слика 7.5: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 338 K.....	119
Слика 7.6: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 341 K.....	120
Слика 7.7: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 362 K.....	121
Слика 7.8: Изглед цилиндричног узорка пре притискивања (горе) и након загревања (доле).На слици узорка након загревања дат је упоредни приказ почетног и крајњег профила узорка.....	121
Слика 7.9: Шематски приказ термо-механичког циклуса за фотополимер. Део шеме означен са 1 - деформисање при високој температури, 2 - процес обнове облика загревањем	122
Слика 7.10: Сlike експеримента слободне обнове облика узорка од фотополимера: (а) почетак деформисања на 90 °C, (b) крај деформисања °C, (c) ограничено хлађење до 23 °C, (d) уклањање ограничења при 23 °C, (e) слободна обнова облика загревањем до 90 °C	122
Слика 7.11: Промена деформације при загревању у узорцима од фотополимера након деформације од 10%.....	123
Слика 7.12: Шематски приказ мреже и граничних услова.....	123

Слика 7.13: Поље температура на попречном пресеку узорка	124
Слика 7.14: Поређење профила узорака након испитивања (ред горе) и симулације (ред доле).....	124
Слика 7.15: Поређење резултата добијених мерењем термо-визијском камером и резултата модела	125
Слика 7.16: Узорак чланковите дијамантске структуре	126
Слика 7.17: Издвојен део моделиране мреже из целог модела.....	127
Слика 7.18: Мрежа коначних елемената на читавом моделу.....	127
Слика 7.19: Мрежа коначних елемената на осмини модела	127
Слика 7.20: Промена деформације при обнови облика загревањем	128
Слика 7.21: Ефекат памћења облика у чланковитој дијамантској структури	129
Слика 7.22: Шематски приказ моделираног убацивања примера	130
Слика 7.23: Приказ фаза симулације убацивања стента у артерију	131
Слика 7.24: Изометријски приказ задатих померања при радијалној компресији стента	131
Слика 7.25: Моделиране контактне површине. Црвеном бојом означена је спољашња површина стента, а љубичастом бојом означена је унутрашња површина артерије. Стент је заротиран ради ефектнијег приказа	132
Слика 7.26: Мрежа коначних елемената стента и артерије током симулације	133
Слика 7.27: Промена спољашњег пречника стента са температуром.....	133
Слика 7.28: Попречни пресек артерије са уметнутим стентом на различитим температурама у симулацији термо-механичког циклуса обнове облика; ради боље прегледности искључен је приказ мреже елемената и приказан симетрично попречни пресек артерије.	134
Слика 7.29: Поља померања и логаритамске деформације на крају симулације убацивања стента у артерију.	135
Слика 7.30: Поређење резултата модела и експеримента на ПЛЛА	135
Слика А.1 Реолошка репрезентација модела.....	150

Списак табела

Табела 2.1: Модерна историја материјала	18
Табела 2.2: Подела на природне и синтетичке полимере.....	19
Табела 2.3: Подела на аморфне и поликристалне полимере.....	19
Табела 4.1: Преглед параметара штампања при изради ПЛА узорака	54
Табела 4.2: Материјални параметри ПЛА	64
Табела 5.1: Табела материјалних параметара предложеног модела	71
Табела 5.2: Број и меморијски простор за променљиве стања предложеног модела.....	95
Табела 5.3. Табела усвојених материјалних параметара	104
Табела 5.4. Табела усвојених термичких параметара	104
Табела 7.1 Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика цилиндричних узорака.....	118
Табела 7.2: Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика чланковите структуре.....	126
Табела 7.3: Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика стента	132
Табела А.1 Материјални параметри модела	154

Поглавље 1

1 Увод

1.1 Мотивација

Паметни материјали представљају напредну класу нових материјала који битно мењају поглед на научна истраживања и индустријску производњу. Полимере са својством памћења облика одликује способност обнављања почетног облика под утицајем одговарајућег спољашњег стимуланса. Поред ове заједничке особине свих материјала са својством памћења облика, полимери са својством памћења облика одликују се и јасно израженом двофазном структуром. На ниским температурама налазе се у чврстој фази (енг. *glassy state*) налик металима, док при промени температуре и преласка критичне вредности, коју називамо транзициона температура T_g (енг. *glass transition temperature*), прелазе у меку (енг. *rubber state*) фазу. Паметне материјале могуће је поделити у више група: полимери са памћењем облика (енг. *Shape memory polymers - SMP*), легуре са памћењем облика (енг. *Shape memory alloys - SMA*), хидрогелови (енг. *Hydrogels*) и керамике са памћењем облика (енг. *Shape memory ceramics - SMC*). Легуре са памћењем облика дуго су биле доминантне, пре свега у хуманој медицини [1], авиоиндустрији [2] и роботизици [3]. Ипак, данас, полимери и хидрогелови са памћењем облика полако преузимају примат међу паметним материјалима. Предности полимера и хидрогелова над легурама јесу, пре свега, могућност подешавања чврстоће у широком опсегу транзиционих температура T_g (55-100 °C) [4]. Полимере са својством памћења облика одликује и ниска густина ($\approx 1.2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), велике еластичне деформације, биодеградибилност, биокompatibilност и ниска термичка проводљивост [5]. Такође, полимери са овим својством могу да обнове почетни облик и након излагања изузетно великим деформацијама ≈ 500 %, док та вредност код легура износи $\approx 6-7$ %. Поред наведених физичких карактеристика, технолошки фактори попут цене, технологији израде, токсичности и рециклажног потенцијала пресудно утичу на све већу затупљеност полимера са својством памћења облика међу осталим паметним материјалима [6]. Својство обнове почетног облика у полимерима са својством памћења облика могу је активирати применом различитих спољашњих стимуланса попут светлости [7], топлоте [8], магнетике [9], електричне енергије [10], влаге [11] и воде [12]. При анализи полимера са својством памћења облика најчешће говоримо о термо-активирајућим паметним полимерима. Термо-активирајући паметни полимери испитују се у термо-механичким циклусима. Како се на собној температури налазе у трајном (перманентном) облику, врши се њихово загревање преко T_g , задржавање механичких ограничења и хлађење чиме се постиже фиксација, односно постизање привременог облика. Након хлађења испод T_g и уклањања ограничења, излагање материјала поновном загревању преко T_g иницира ефекат обнове почетног облика и повратак материјала у почетну, односно, сталну конфигурацију. Ефекат памћења облика уочен је у аморфним [13], полу-кристалним [14] полимерима и течним кристалним еластомерима [15]. Упоредо са развојем и испитивањем полимера са својством памћења облика тече развој нових адитивних технологија, као што су Депоноване истопљеног материјала (FDM) [16], Стереолитографија (SLA) [17], Селективно ласерско топљење (SLM), синтероване помоћу лива (SLS) [18] и инкјет [19]. Фузијом нових паметних материјала и

адитивних технологија 3Д штампања (енг. *3D printing*), настала је потпуно нова област изучавања и израде материјала - 4Д штампа. 4Д штампање је, први пут представљено 2013. на ТедЕкс (енг. *TedEx*) конференцији и интензивно се развија од тад. Укратко, ова област представља спој адитивних технологија и паметних материјала, односно, представља израду паметних структура које могу да одговоре на спољашњи стимуланс променом облика применом адитивних технологија. Већина теорија развијених како би се моделирао ефекат памћења облика базирају се на термо-механичким теоријама вискоеластичности [20] и теорији фазних транзиција [21]. Неколико студија које се баве карактеризацијом паметних штампаних структура објављено је у последњих неколико година. Истиче се неколико истраживачких група [22–24]. Све наведено отвара потпуно ново поље анализе материјала, како експериментално, тако и применом познатих метода моделирања.

Број научних радова и докторских дисертација који се баве истраживањем полимлечне киселине (енг. *polylactic acid*, ПЛА) као полимера са својством памћења облика порастао је у последњој деценији преко пет пута што јасно сведочи о актуелности предложене теме и изазова који ова тема носи [25–27]. Иницијална идеја за формирање ове теме настала на основу рада руских аутора на челу са проф. Сенатовом [28] у оквиру кога је приказана могућност примене технологије 3Д штампе за израду биомедицински уређаја попут носача (енг. *scaffolds*) од ПЛА и њихова примена у биомедицини и инжењерингу ткива.

1.2 Полазне хипотезе

Формулисање модела који решава проблеме великих деформација, самозагревање и ефекат памћења облика у полимерима са памћењем облика захтева увођење неколико почетних хипотеза:

- полимери са памћењем облика могу бити изложени изразито великим стварним деформацијама ($\approx 50\%$)
- полимери са памћењем облика су двофазни материјали, који се састоје од меке (енг. *rubbery*) и чврсте (енг. *glassy*) фазе, код којих заступљеност сваке од фаза зависи од температуре
- при испитивању полимера са памћењем облика неопходно је применити термо-механички спрегнут материјални модел
- укупни градијент деформације могуће је, користећи мултипликативну декомпозицију, представити преко еластичног и пластичног дела
- правац прираштаја вископластичне деформације је колинеаран са правцем еластичног девијатора напона
- брзина ефективне пластичне деформације зависи од девијатора напона, брзине деформације и температуре

1.3 Методе у истраживању

При анализи понашања и формулацији материјалног модела полимера са својством памћења облика примењен је метод коначних елемената као најзаступљенији нумерички метод за структурну анализу и провођење топлоте, које су неопходне за термо-механичку анализу. При анализи полимера са својством памћења облика као и моделирању и решавању мултифизичких проблема неопходно је узети у обзир спрезање поља физичких величина како би се што тачније одредили напони, деформације,

температуре и материјалне карактеристике. Модел је након теоријске формулације имплементиран у два софтвера - софтвер отвореног кода ПАК Multiphysics [29] и комерцијални софтвер ABAQUS/Standard [30] писањем фортранског потпрограма коришћењем програмских језика FORTRAN 77/95.

Одређивање материјалних карактеристика и калибрација материјалних параметара спроведена су експериментална испитивања на епруветама израђеним од полимера са памћењем облика ПЛА и фотополимера. Епрувете су израђене 3Д штампом на 3Д штампачу марке Ultimaker материјалном добијеним од истог произвођача, као и Clear FormLabs 2 смоле на штампачу истог произвођача. Расположива опрема пружала је могућност за испитивање на различитим брзинама деформације и температурама притискивањем. Експериментална испитивања ПЛА узорак на температурама нижим од транзиционе температуре обављена су на серво-хидрауличкој кидалици Shimadzu EHF-EV101K3-070-0A у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања при Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Услед физичких ограничења додатна испитивања на температурама нижим од транзиционе обављена су на Brookfield CT3 Texture Analyzer кидалици. Опрему је у оба случаја било неопходно прилагодити захтевима мерења. У том циљу модификован је прихватни алат за узорке у комори високе температуре на мерном систему Shimadzu EHF-EV101K3-070-0A и израђена комора са регулацијом температуре испитивања за мерни систем Brookfield CT3 Texture Analyzer.

1.4 Доприноси тезе

У оквиру истраживања обављених током израде тезе, експерименталним испитивањима и нумеричким методама извршено је:

- експериментална карактеризација ПЛА полимера са памћењем облика. Експерименталним испитивањима утврђено понашање материјала у реалтивно широком појасу температура ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) и брзина деформација ($0.0001, 0.001, 0.01, 0.1\text{ s}^{-1}$). Номинална температура транзиције ПЛА је $58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Узорци су добијени применом технологије 3Д штампе, нашошењем слојева и термичким третирањем на високим температурама ради уклањања имперфекција.
- експериментална карактеризација фотополимера са памћењем облика. Експерименталним испитивањима обављена су на температурама од $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и брзинама деформације $0.01, 0.1\text{ s}^{-1}$. Номинална температура транзиције материјала је $58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Узорци су добијени из смоле коришћењем стереолитографије.
- представљена је процедура утврђивања материјалних параметара модела. Коришћењем 1Д модела, развијеног из предложене теорије за 3Д модел, у оквиру развијеног идентификационог алата процес идентификације материјалних параметара је у великој мери аутоматизован
- развијен, имплементиран и верификован општи материјални модел којим је могуће симулирати понашање полимерних материјала са својством памћења облика. Модел је, с обзиром на његове карактеристике, могуће применити за моделирање и симулацију већине полимерних материјала за широк опсег температура и брзине деформације.

1.5 Структура тезе

У Поглављу 2 дат је преглед понашања, примене, метода карактеризације, експерименталне студије и анализу постојећих материјалних модела полимерних материјала са својством памћења облика. У Поглављу 3 наведене су, без детаљног извођења основне кинематске релације, величине напона и деформације које су у тези коришћене. Поред тога дат је преглед до сад развијеног софтвера за анализу термо-механичког понашања материјала PAK Multiphysics. У Поглављу 4 представљена је доступна експериментална мерна и опрема за израду узорка. Такође, приказана су побољшања и адаптација постојеће опреме коришћене за испитивање на узорка притискивањем у термо-механичким циклусима. У Поглављу 5 представљен је имплементирани термо-механички материјални модел за велике деформације којим се симулира понашање полимера са својством памћења на основу експерименталних резултата добијених у Поглављу 4. Применом теорије великих деформација полимер са својством памћења облика је моделиран као термо-еласто-вископластичан материјал код кога температура и брзина деформације утичу на промену материјалних карактеристика. У Поглављу 6 представљена је целокупна процедура идентификације параметара коришћењем доступних експерименталних резултата применом поједностављеним 1Д моделом изведеног на основу 3Д теорије. Приказан је изглед графичког корисничког окружења идентификационог алата развијеног за потребе калибрације и оптимизације параметара материјалног модела. У Поглављу 7 биће представљени резултати нумеричке анализе више моделираних реалних структура од ПЛА полимера са својством памћења облика коришћењем развијеног материјалног модела. За поређење су коришћени резултати добијени у оквиру истраживања, резултати из литературе. Такође, на крају је ефикасност модела показана и на чисто нумеричком примеру без поређења другим резултатима. У Поглављу 8 дата су закључна разматрања и предочени коначни закључци о различитим аспектима представљене дисертације, као и дискусија о правцима будућих истраживања. У Додатку А приказане су основне конститутивне релације полазног материјалног модела за температуре које не прелазе транзициону температуру T_g .

1.6 Објављени радови повезани са темом дисертације

Радови објављени на међународним конференцијама и међународним часописима а повезани са темом дисертације:

- S. Milenkovic, V. Slavkovic, C. Fragassa, N. Grujovic, N. Palic, and F. Zivic, Effect of the raster orientation on strength of the continuous fiber reinforced PVDF/PLA composites, fabricated by hand-layup and fused deposition modeling, *Composite Structures*, vol. 270, p. 114063, 2021.
- V. Dunic, N. Busarac, V. Slavkovic, B. Rosic, R. Niekamp, H. Matthies, R. Slavkovic, and M. Zivkovic, A thermo-mechanically coupled finite strain model considering inelastic heat generation, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, vol. 28, no. 4, pp. 993-1007, 2016.
- V. Slavkovic, N. Grujovic, A. Disic, and A. Radovanovic, Influence of Annealing and Printing Directions on Mechanical Properties of PLA Shape Memory Polymer Produced by Fused Deposition Modeling, *International Congress of Serbian Society of Mechanics*, 2017.

Поглавље 2

2 Преглед литературе

2.1 Историја и класификација полимера

Материјали су одувек били значајни део и имали пресудну улогу у напретку и опстанку цивилизације. О томе колики значај имају материјали за човечанство говори и чињеница да су и временска раздобља добијала називе према материјалима који су коришћени: камено доба ($2.5 \cdot 10^6$ - 3300 п.н.е.), бронзано доба (3300 - 1200 п.н.е.) и гвоздено доба (1200 - 500 п.н.е.) [31]. Током даљег развоја цивилизације човек почиње да открива и користи материјале попут керамике и стакла, затим челика и легура, све до појаве гуме и полимерних материјала. Како је приказано у Табели 2.1 [32] велики замајац развоју материјала даје откриће вулканизације и почетак производње гуме. Након тога следи убрзани развој материјала и појаве првих синтетичких пластика почетком 20. века. Након 2-3 деценије обележених ратом, пре почетка Другог светског рата јавља се, највероватније у циљу унапређења војних средстава, убрзано истраживање нових, лакших материјала попут поли-винил-хлорида и полиетилена. Од тог времена употреба полимера наставља да расте, а број различитих инжењерских полимера наставља да се повећава. Неки од нових материјала су фокусирани на побољшане перформансе. На пример, полиетилениламир, ПЕИ и полиетер етер кетон, ПЕЕК су полимери са високом термичком стабилношћу, чврстоћом и крутошћу.

Време	Проналазак
1839	Чарлс Гудјир проналази вулканизацију природног каучука додавањем сулфата и загревањем на 130°C
1862	Александар Паркс проналази први синтетички полимер Паркензин
1907	Лео Бакелит изумео је бакелит
1927	Почетак масовне производње ПВЦ
1930	Проналазак полистирена (ПС)
1932	Проналазак полимлечне киселине (ПЛА)
1933	Проналазак полиетилена (ПЕ)
1938	Проналазак полиамида и флуорополимера
1971	Проналазак кевлара
1976	Производња полимера премашује производњу челика
1970тих	Проналазак кондуктивних полимера
2000тих	Употреба синтетичких полимера у биомедицини

Табела 2.1: Модерна историја материјала [32]

Када говоримо о полимерима као новијој групи материјала, најчешће је реч о гуми, еластомерима и термопластикама попут ПММА (плексиглас) или поликарбоната које су све заступљеније у домћинствима и индустрији. Како је приказано у Табели 2.2 иако су вештачки материјали заступљенији у људској свакодневици треба напоменути да је већина ствари које нас окружују, а природног су порекла, заправо неки од полимера. Најочигледнији пример су основне градивне јединице попут ДНК и РНК, протеина од којих су сачињене аминокиселине или ткива мишића и коже. По начину настанка разликујемо природне (биополимере) и синтетичке (вештачке) полимере. Вештачки

полимери, познати и као синтетички полимери, налазе данас широку примену у индустрији, попут ПММА (плексиглас), поли-винил-хлорида, поликарбоната (лексан) и других.

Природни	Синтетички
Целулоза	Полипропилен
Ензими	Поливинил
ДНК	Полиестер
Скроб	ПММА

Табела 2.2: Подела на природне и синтетичке полимере [32]

Друга подела која се често користи јесте подела на аморфне и поликристалне полимере као у Табели 2.3. Како сама реч каже, аморфни полимери се одликују случајном, хаотичном структуром молекула без јасне распоређених молекула. У поликристалном полимеру, разликујемо део молекула који су кристални, док су преостали делови аморфни. Практично, чисто аморфни или чисто кристални материјали постоје само у теоријским разматрањима, већ се више говори о уделу једног односно другог дела. Док аморфну део сачињава неравномерно распоређена група молекула, кристални део уобичајено има ламинарну структуру. Аморфни и поликристални полимери одликују се и различитим механичким понашањем. Код поликристалних полимера температура топљења T_m (енг. *melting temperature*) је јасно изражена. У случају аморфних полимера температура топљења није јасно дефинисана а при повећавању температуре изнад вредности транзиционе температуре T_g . долази до значајног пада механичких карактеристика. При даљем загревању у температурној области изнад T_g . долази до кретања великих сегмената полимерних ланаца а материјал почиње да се понаша као ликвид. Оваке промене у материјалу могу, зависно од материјала, да се дешавају већ и на температурама које су блиске или око T_g .

2.2 ПЛА

Од средине 70-тих година када је производња термопластика надмашила нафту, тржиште полимера се унапређује и развија. ПЛА је произведен први пут 1932. године и припада групи полиестера [33].

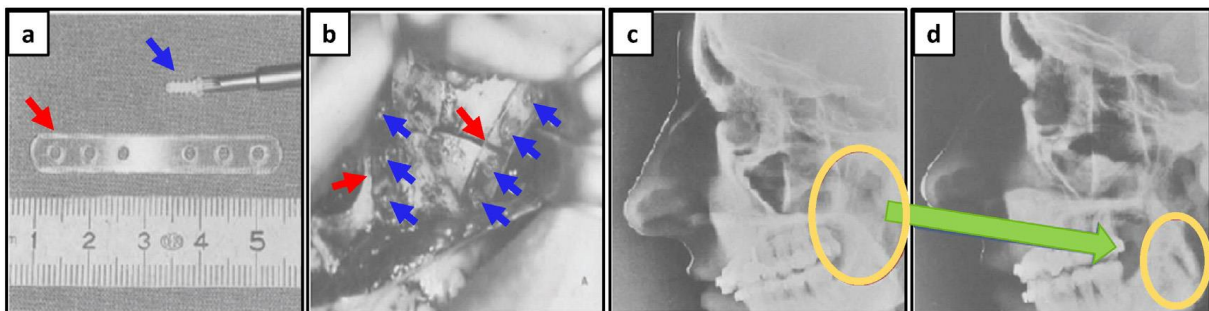
Аморфни	Поликристални
Полиметил метакрилат (ПММА)	Полиетилен терефталат (Тефлон)
Поликарбонат	Полиамид
Гума	Полиетил етеркетон (ПЕЕК)
Поливинил хлорид (ПВЦ)	Полипропилен

Табела 2.3: Подела на аморфне и поликристалне полимере

Најзначајнији произвођач ПЛА је фирма NatureWorks LLC мада све већи број фирми, пре свега из области адитивних технологија, узима удео на тржишту. Може се слободно рећи да је ПЛА један од најзатупљенијих биодеградибилних и биокомпатибилних материјала, што потврђује чињеница да је 2010. био друга најкоришћенија биопластика на свету. На заступљеност ПЛА најзначајније су утицале одлуке америчке агенције за храну и лекове (United States Food and Drug Administration (FDA)) која га класификује као безбедан

(GRAS - generally recognized as safe) за примену у индустрији хране [34,35]. ПЛА је због биокомпатибилности погодан за примену у медицини, док га одређене механичке карактеристике квалификују и за немедицинску примену [36]. Такође, како тржиште биопластика расте по стопи од 30 процената сваке године, ПЛА као први полимер који се добија у условима смањене потрошње енергије, настанак отпада, и емисије гасова представља лидера међу "зеленим полимерима" [37]. ПЛА се добија из природних и обновљивих извора, као што су кукурузни скроб (САД и Канада), кромпира или скроба (Азија) или шећерне репе (остатак света).

Поред наведених еколошких аспеката ПЛА се, као производ људског организма, сматра апсолутно биокомпатибилним. Поред тога, како се добија из природних извора он је и биодеградибилан. Биокомпатибилност је изразито важна јер омогућава примену ПЛА у медицини, на местима где је неопходна апсорпција уређаја након завршетка првобитне функције, најчешће зарастања [38]. Све је већа тенденција, да се у условима где је то могуће, уређаји од метала или легура замењују уређајима од полимера [39]. Ово се чини како би се омогућило постепено зарастање болесних ткива кроз процес механичког слабљења полимерних уређаја. Уз то, како долази до биодеградације током времена, избегавају се додатни захвати уклањања уређаја [40]. Због могућности да се хемијска структура и механичке карактеристике прилагоде биохемијском окружењу, ПЛА налази широку примену у биомедицини укључујући стентове [41–43] ортопедске вијке [44], носача за узгајање различитих ћелија, ткива мишића, костију и регенерацију хрскавице, сађење остеогенских матичних ћелија и имплантација у коштане дефекте [45–48], хируршке конце [49,50], игле [51], нанокомпозите [52] и уређаје за ношење и допремање лекова [53–56]. На Слици 2.1 приказан је процес реконструкције вилице уређајима од ПЛА.



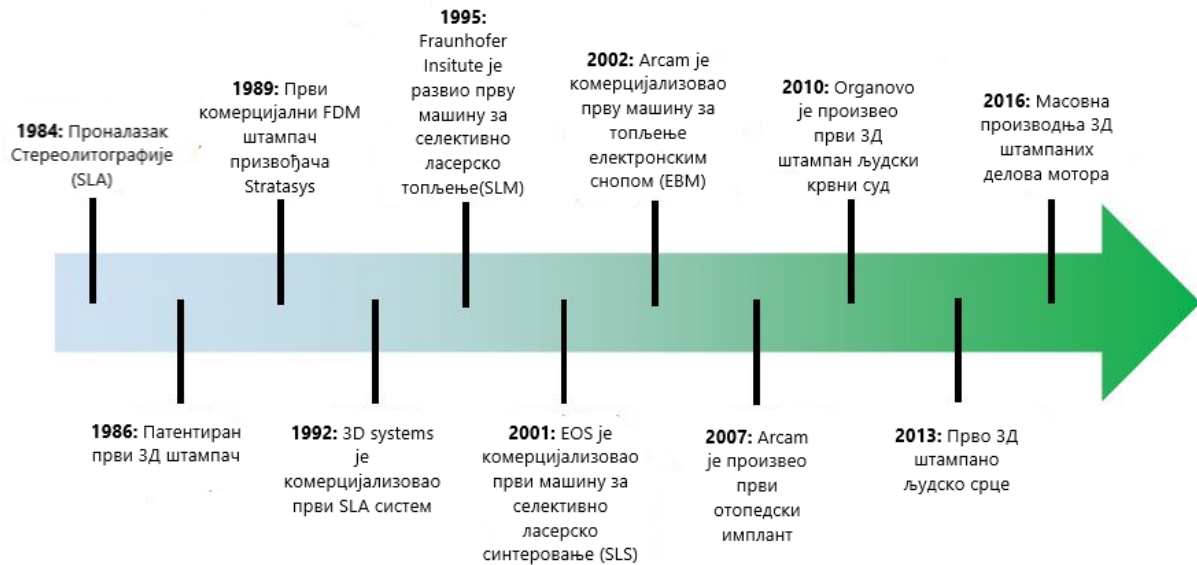
Слика 2.1: Примена ПЛА у реконструкцији вилице [37]

Када је реч о немедицинској примени, ПЛА се највише користи као смола и филмова у производњи паковања [57], у текстилној индустрији код производње влакана специјалне намене на бази полидилактида, као и при замени конвенционалних влакана [37]. Већу примену ПЛА спутава релативно висока цена, али и слабе механичке карактеристике у погледу отпора у киселим и масним срединама [58] што би се могло избећи адекватним превлакама [59].

2.3 Преглед стања у адитивним технологијама

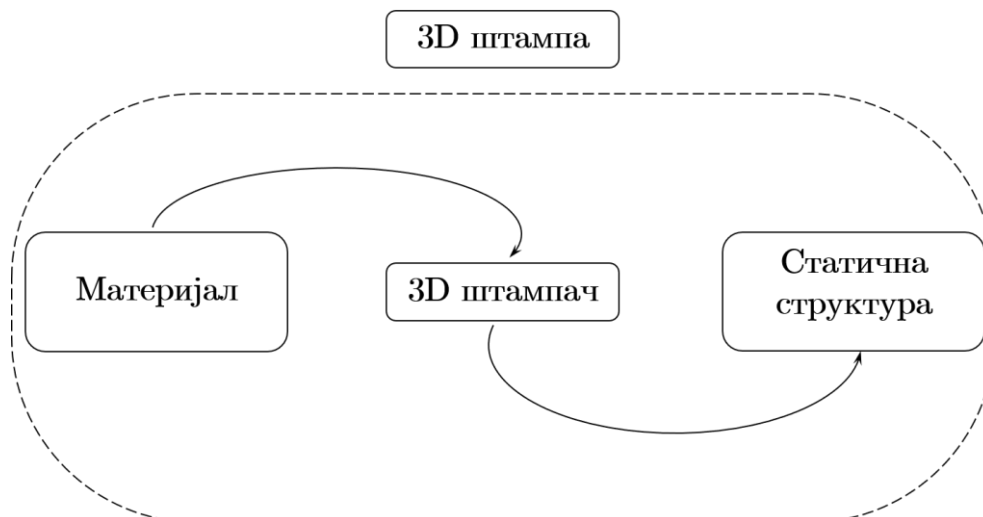
Појава адитивне производње (енг. *Additive manufacturing (AM)*) или 3Д штампе (енг. *three-dimensional (3D) printing*) везује се за средину 80-тих година и прве уређаје за стереолитографију. Без обзира на технологију израде и коришћени материјал, све адитивне технологије представљају поступак спајања основног материјала, слој по слој.

Овакав начин израде је убрзао и појефтинио процес развоја производа, јер омогућава прецизну израду без потребе за посебном завршном обрадом. Адитивне технологије су својом појавом представљале револуцију у оцени и тестирању нових производа. Иако је у почетку препрека за широку употребу била цена, захваљујући развоју уређаја и материјала адитивна производња постаје све јефтинија и доступнија, и често се истиче као главни покретач тренутне индустријске револуције. На Слици 2.2 приказана је кратка историја развоја адитивних технологија.



Слика 2.2: Историја развоја адитивних технологија [60]

3Д штампа се поред израде појединачних делова и прототипова, користи све више и на пољу прецизне механике и посебно у изради делова сложене геометрије на микро нивоу. Иако несумњиво има низ недостатака, адитивна производња, због цене материјала, смањења отпада и употребе енергије, као изостанка завршне обраде, се све више користи у различитим индустријским гранама где замењује конвенционалне методе. На Слици 2.3 шематски је приказан концепт 3Д штампе.



Слика 2.3: Илустрација концепта 3Д штампе

Најзаступљеније технологије адитивне производње су:

- стереолитографија (SLA)
- депоновање истопљеног материјала (FDM)
- селективно ласерско синтеровање (SLS)
- израда објеката ламинацијом (LOM)
- ласерско топљење метала (LMD)

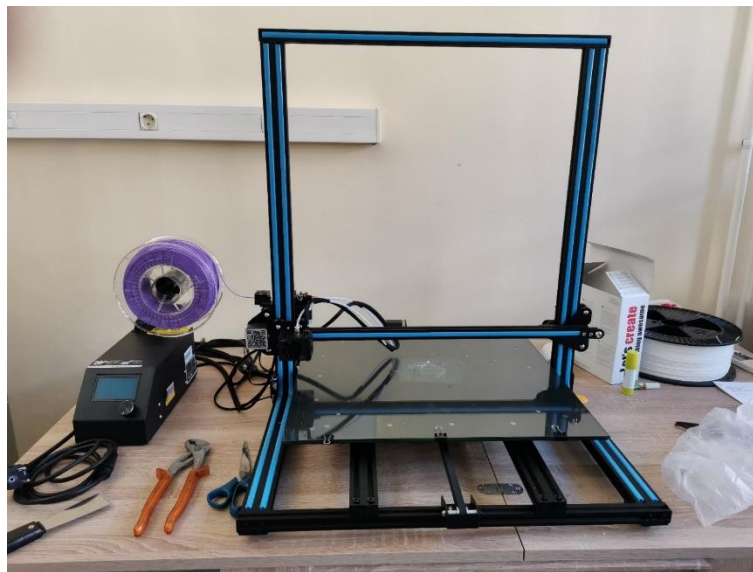
У последњој деценији значајно је увећан број материјала за 3Д штампање. Материјали који се највише користе у адитивним технологијама су:

- акрилонитрил-бутадиен-стирен (АБС) [61]
- ПЕЕК [62]
- ПЛА [63]
- фотосензитивна смола [64]
- поликарбонат [65]
- полиамид [66]

Све наведене технологије и материјали омогућавају производњу физичких прототипова [67,68], функционалну верификацију конструкције производа [69] и биомедицинских уређаја [70–73]. Такође, 3Д штампање се примењује се производњи финалних производа [74], електронике [75], модних детаља и накита [76], сложених структура [77], а све више се развија и штампање великих димензија, најчешће бетона [78]. У биомедицини 3Д штампа омогућава олакшану израду импланата, носача за инжењеринг ткива и система за допремање лекова [79]. Примена ПЛА у адитивној производњи омогућава производњу комплексних биомедицинских уређаја базираних на рачунарски подржаном пројектовању и конструисању (CAD) посебно, уз коришћење анатомских података специфичних за пацијента омогућава се израда јединствених импланата (енг. one of kind) [80]. Нови изазов на пољу адитивних технологија представља примена 3Д штампе у изради композита од ПЛА, са и без ојачања [81].

Треба напоменути нека од ограничења која 3Д штампа има. Због саме технологије израде, у израђеним деловима су често присутне иницијалне имперфекције и заостали напони, најчешће изазвани температуром израде. Поред тога, оријентација наноса

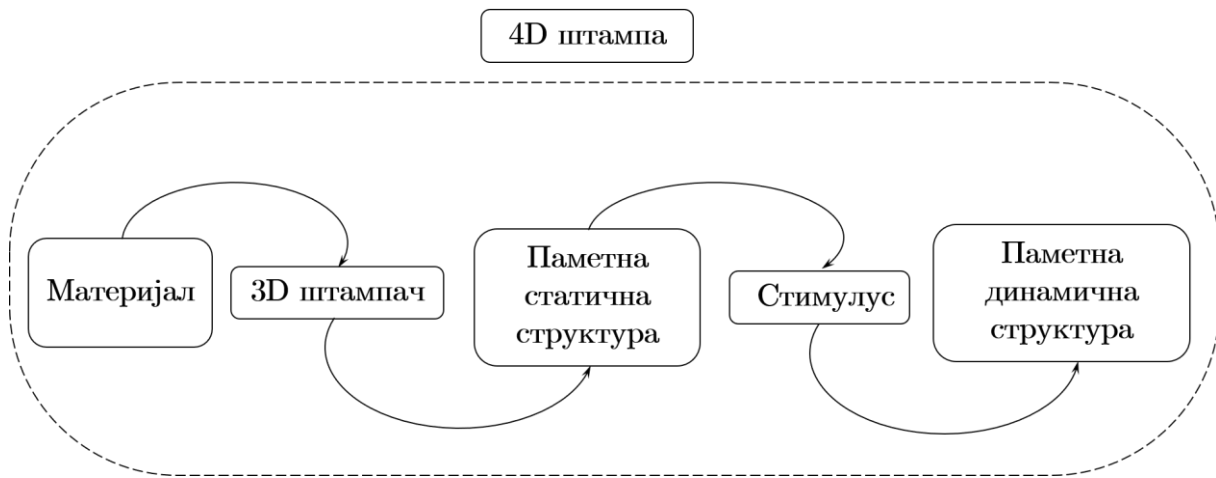
слојева може кључно да утиче на чврстоћу, односно механичке карактеристике израђених делова. Ипак, ако се посматра као технологија припремне производње или део ланца развоја производа, 3Д штампа даје огроман креативни простор инжењерима за даља истраживања и олакшава модификације актуелних производа. Овакве модификације се пре свега односе на визуелни или димензиони аспект, али са напретком технологија израде, све више је заступљена механичка и термичка карактеризација израђених делова. Ипак једна од главних слабости 3Д штампе у ланцу развоја производа јесте ограничени радни простор штампача, односно величина делова које је могуће израдити. Радна површина већине штампача најчешће не прелази 150 mm, ређе 250 mm. У таквим случајевима, делове је могуће израдити из више штампача. Овако израђени делови се накнадно повезују неком од техника спајања, најчешће лепљењем. На слици 2.4 приказан је 3Д штампач последње генерације чија је радна површина 500x500 mm.



Слика 2.4: 3Д штампач нове генерације Creality CR-10-S5, радних димензија 500x500 mm, Центар за информационе технологије, Факултет инжењерских наука

Како је напоменуто, 4Д штампа представља фузију паметних материјала и нових адитивних технологија. Постоји неколико дефиниција паметних материјала који се користе у 4Д штампачу. Варадан у [82] описује паметне материјале као групу материјала која на промене у окружењу одговара променом материјалних својстава или облика. Другу дефиницију Лео износи у [83] где дефинише паметне материјале њиховом способношћу да конвертују енергију, најчешће термичку енергију у механички рад. Уопштено за паметне материјале се може рећи да мењају своја својства или геометрију, тежећи адекватном одговору на спољашњу побуду. Концепт 4Д штампе отвара научни аспект истраживања материјала, побуда и математичког моделирања, као и паметних структура који од њих настају. Од тренутка представљања 4Д штампе 2013. јавља се повећано интересовање за овим технолошким концептом. Технологију 4Д штампе је прва развила и представила истраживачка група проф. Тибитса са Технолошког института Масачусетс. Као и већина брзо растућих технологија, 4Д штампа се ослања на убрзани развој паметних материјала, 3Д штампача, математичко моделирање и дизајн. 4Д штампаче је првобитно дефинисано као комбинација 3Д штампе и времена (4Д штампаче = 3Д штампаче+време), јер до промене облика, особина или функционалности 3Д штампаче структуре долази са протоком времена и уз примену одговарајуће побуде [67,84,85]. Како је на Слици 2.5 шематски приказано, за разлику од

3Д штампе, излазни производ 4Д штампе је активна или динамична структура, која се уз одговарајућу побуду или унос енергије може активирати.

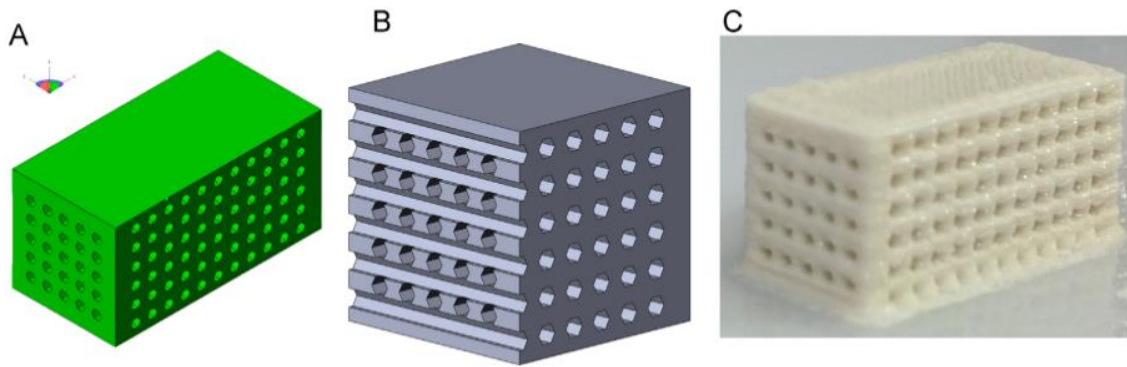


Слика 2.5: Илустрација концепта 4Д штампе

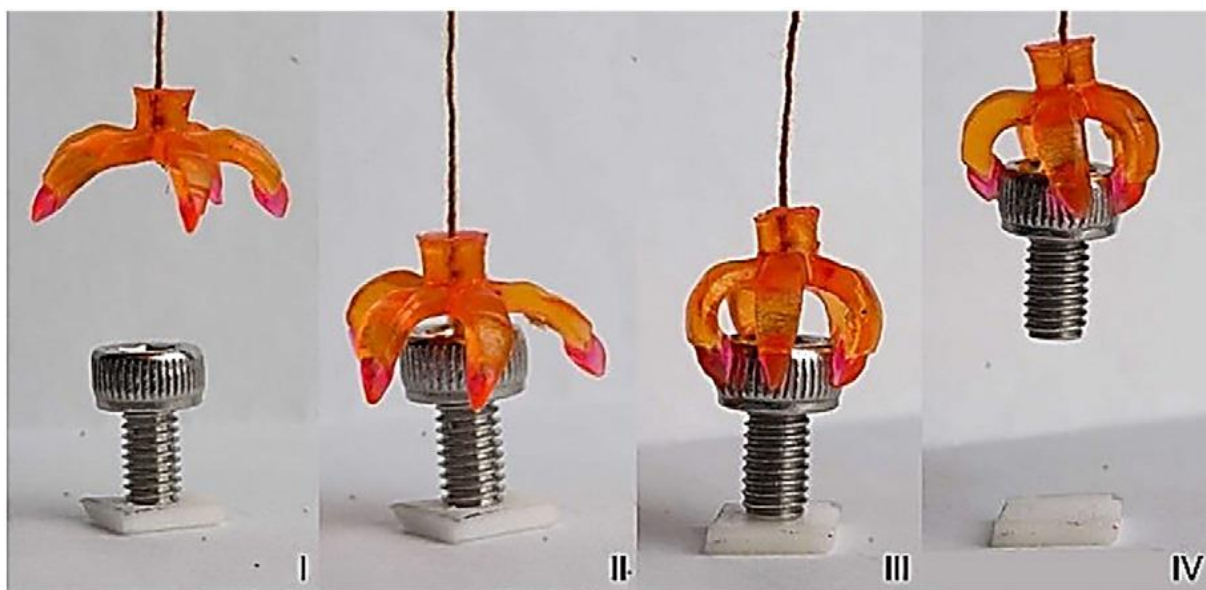
Како су конвенционални начини израде дуготрајни, адитивне технологије се све више користе за израду мањих делова сложене геометрије, нарочито када се очекује висока резолуција израде. Због природе технологија и материјала од посебне важности је примена 4Д штампе у изради биомедицинских уређаја и компонената. Технологијом 4Д штампе и применом потпуно биокompatibilних материјала, могуће је у кратком временском периоду израдити делове на микро нивоу, веома сложене геометрије. Развој напредних штампача омогућава израду термо-активирајућих кардиоваскуларних стентова [86–89], носача за узгајање ткива [28], уређаја за допремање лекова [90], уређаја за диференцијацију матичних ћелија [91,92], еластомерних метаматеријала [93]. Веи је у [94] представио унапређење основног ПЛА материјала мешањем са гвожђем и израдом жице за штампање, којом је касније израђен носач високе носивости, употребљен за прорастање коштаног ткива. Поред биомедицинских уређаја и компонената 4Д штампа се користи и за израду побољшаних нано композита [95], легура са памћењем облика [96,97], актуатора прецизне роботике [98], самоактивирајућих структура [99], оригами секвентне структуре [85,100,101] и нано електронске компоненте [102].

Закључује се да, иако делује као далека будућност, 4Д штампа је све више присутна и представља основу за унапређење у различитим областима, пре свега, прецизне израде и малих габарита. И запажања су да ова област тренутно највише почива на развоју материјала и њиховом даљем унапређивању кроз истраживања.

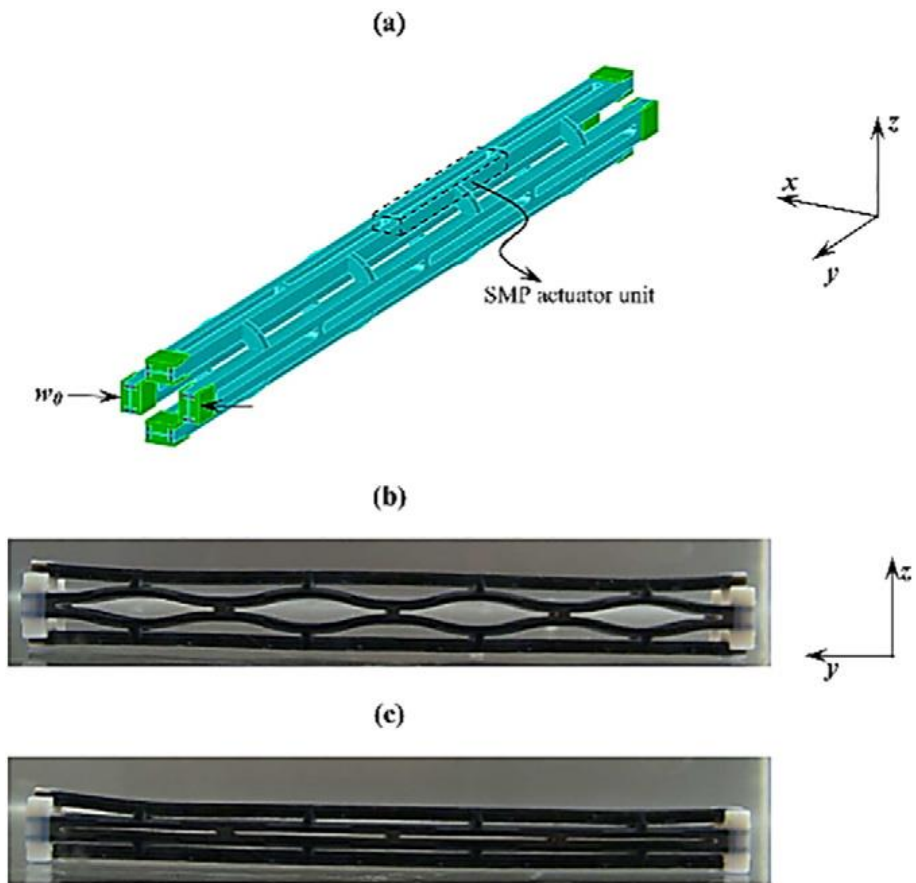
На Сликама 2.7, 2.8, 2.9 и 2.10 приказани су примери 4Д штампаних структура.



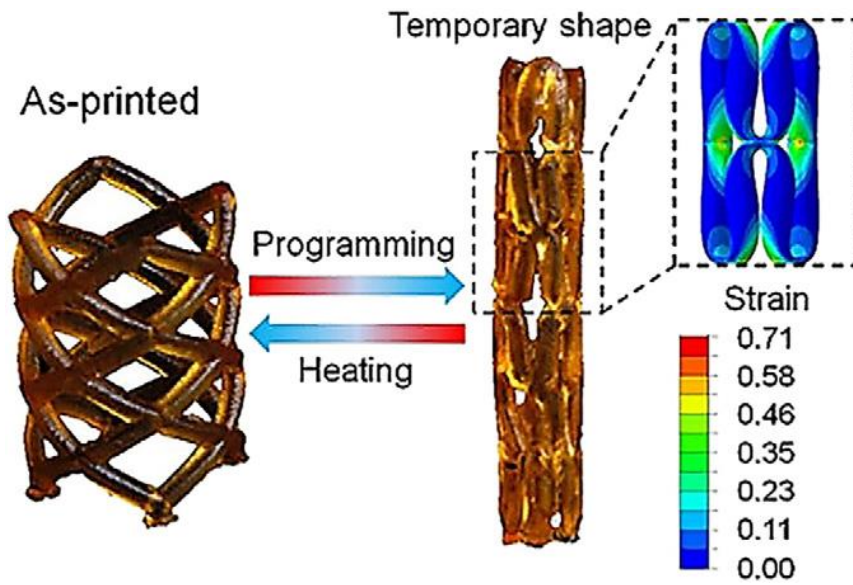
Слика 2.6: 3Д штампани носач од ПЛА материјала [28]



Слика 2.7: 4Д штампана хватаљка са памћењем облика која се активира температуром [90]



Слика 2.8: Термо-активирујући стент израђен 4Д штампом [88]



Слика 2.9: 4Д штампана самосклапајућа структура [90]



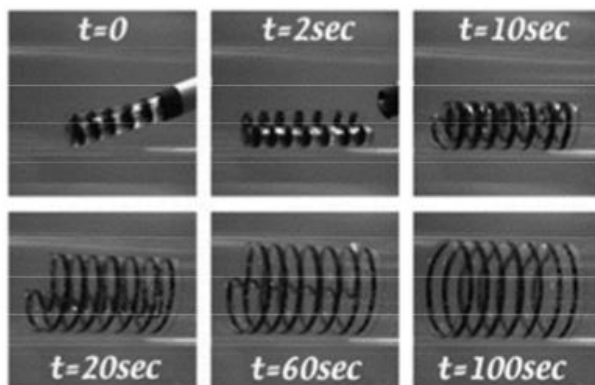
Слика 2.10: Примена 4Д штампаних структура у изради метаматеријала [103]

2.4 Полимери са памћењем облика

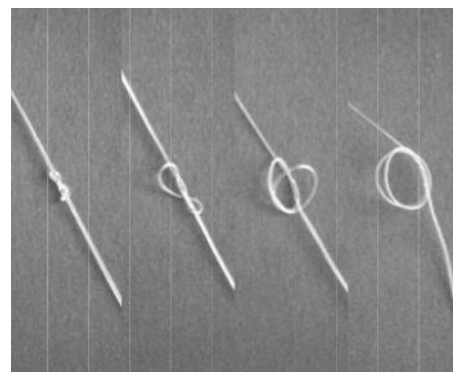
Полимери са памћењем облика спадају у групу термопластичних материјала који могу обновити деформацију већу од 100% након што су деформисани од трајног на привремено облику у процедури термо-механичког програмирања:

- загревање+деформисање
- хлађење+спречено померање
- загревање до повратка облика, са или без ограничења

Ефекат памћења облика може се активирати неким од спољних стимуланса: грејањем, радијацијом, електричним или магнетним пољем. У примени су највише полимери са својством памћења облика са термичком активацијом памћења облика - термо активирајући паметни полимери. Термопластике са памћењем облика немају хемијских међувеза и могу бити топљене и реконфигурисане више пута. Велики број истраживача и тимова кроз специјализоване истраживачке пројекте се бави експерименталним истраживањима која имају за циљ истраживање понашања полимера у различитим условима примене. Посебно се анализира утицај промене температуре, напона и брзине деформација на понашање полимера. Медицински конач и стент од полимера са памћењем облика приказани су на Слици 2.11.



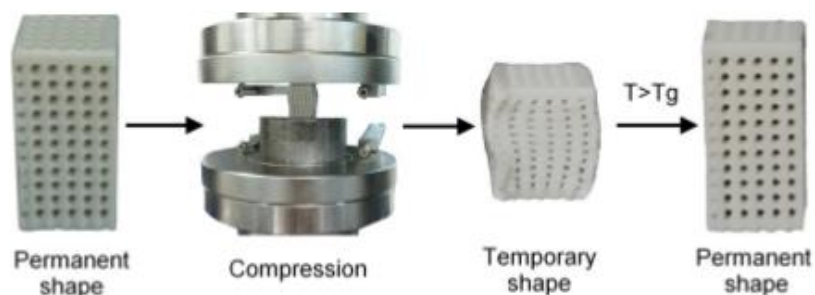
(а) Кардиоваскуларни стент [50]



(б) Медицински конач [104]

Слика 2.11: Примери примене полимера са својством памћења облика у медицини

У примени је већи број полимера са својством памћења облика који се добијају одговарајућим технологијама производње. У овом раду ће због својих особина, ниске цене и погодности за производњу 3Д штампом, а ипак недовољно истраженим својствима, предмет изучавања бити група полимера ПЛА (енг. *polylactic acid*) полимер. Постоје различити ко-полимери ПЛА (ПЛЛА, ПДЛА, ПДЛЛА).



Слика 2.12: Термо-механичко испитивање носача од ПЛА [28]

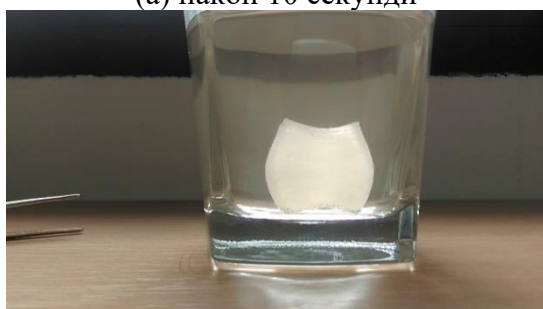
Током експерименталних испитивања посебна пажња усмерена је на утврђивање ефеката памћења облика у ПЛА узорцима. На слици 2.13 приказани су ПЛА узорци израђени у оквиру почетних испитивања. Почетна висина узорка је 10 mm. Након притискивања до 0.5 номиналне висине узорка, узорак је загрејан до температуре $T_g=80\text{ }^\circ\text{C}$ изнад номиналне транзиционе температуре $T_g=60\text{ }^\circ\text{C}$ чиме се активира ефекат обнове облика у узорцима. Како се види на Слици 2.13 узорцима потопљеним у воду која је на температури изнад T_g је потребно ≈ 3 минута до потпуне обнове облика. Иако су слике настале на самом почетку испитивања и биле су део примитивног утврђивања ефекта памћења облика, данас се у низу студија потпуно исте методе користе код утврђивања основних својстава паметних полимера [105]. Потпуна карактеризација обнове облика биће предмет опсежних истраживања у оквиру дисертације.



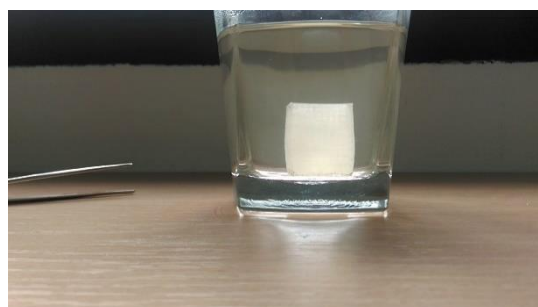
(а) након 10 секунди



(б) након 1 минута



(в) након 2 минута



(г) након 3 минута

Слика 2.13: Процес обнове облика у узорцима ПЛА при загревању на температури $80\text{ }^\circ\text{C}$. Узорци су израђени у Центру за информационе технологије и испитани у Лабораторији за динамичка испитивања и инжењерски софтвер, Факултет инжењерских наука.

Након третирања узорка у води температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$ извршено је мерење. На Слици 2.14 приказани су резултати мерења. Пре испитивања измерена висина узорка је била 30.1

mm. Након притискивања до деформације од 40 процената почетне висине и загревања висина узорка је 29.93 mm. Мерење показује да је мера обнове облика 99.5%.



а) Мерење пре експеримента



б) Мерење након експеримента

Слика 2.14. Мерење обнове облика у узорцима ПЛА након загревања на температури 80°C. Узорци су израђени у Центру за информационе технологије и испитани у Лабораторији за динамичка испитивања и инжењерски софтвер, Факултет инжењерских наука.

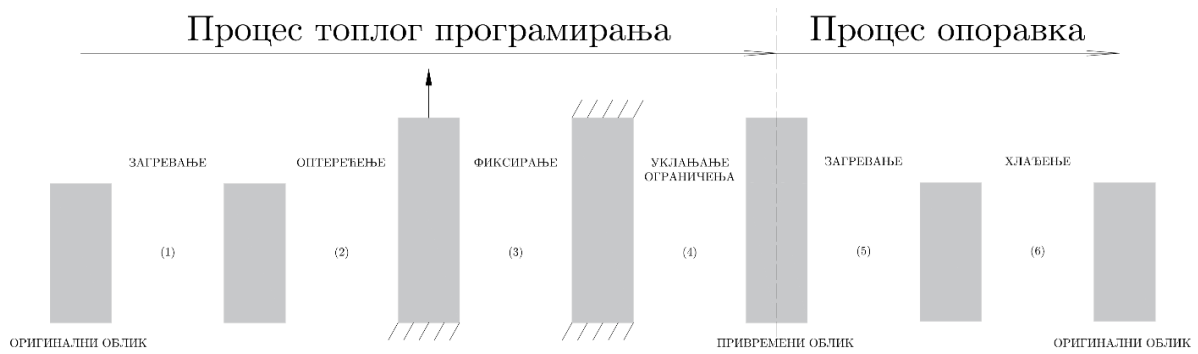
Поред адитивних технологија треба се осврнути и на природу полимерних материјала који се користе у 4Д штампи. По својствима памћења облика разликујемо:

- материјале који могу да обнове само један облик, тзв. двоструки ефекат памћења облика (енг. *two-way shape memory effect*)
- материјале који могу да обнове више облика - троструки ефекат памћења облика (енг. *three-way shape memory effect*)

Према [22] ефекат памћења облика могуће је поделити на два дела:

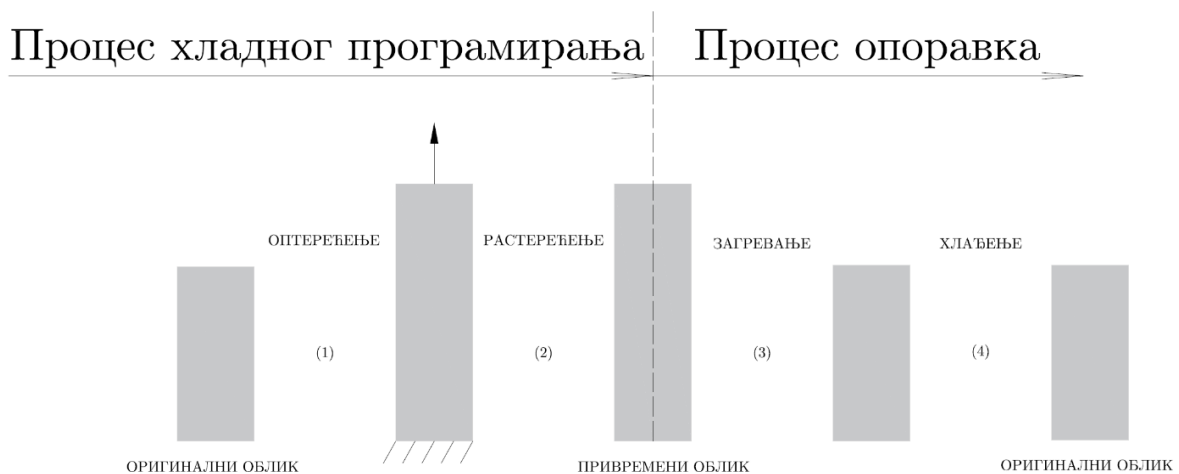
- поступак програмирања, најчешће деформисања, хладног или топлог
- поступак обнове облика излагањем некој спољашњој побуди, најчешће загревањем

Слике 2.15, 2.16 и 2.17 нацртане су према [22]. Класификација на топло и хладно програмирање односи се на температуру при којој се врши деформисање од привременог облика. На Слици 2.15 је приказан термо-механички циклус. Материјал је првобитно загрејан и деформисан, охлађен уз спречена померања и затим је активиран процес обнове облика загревањем.



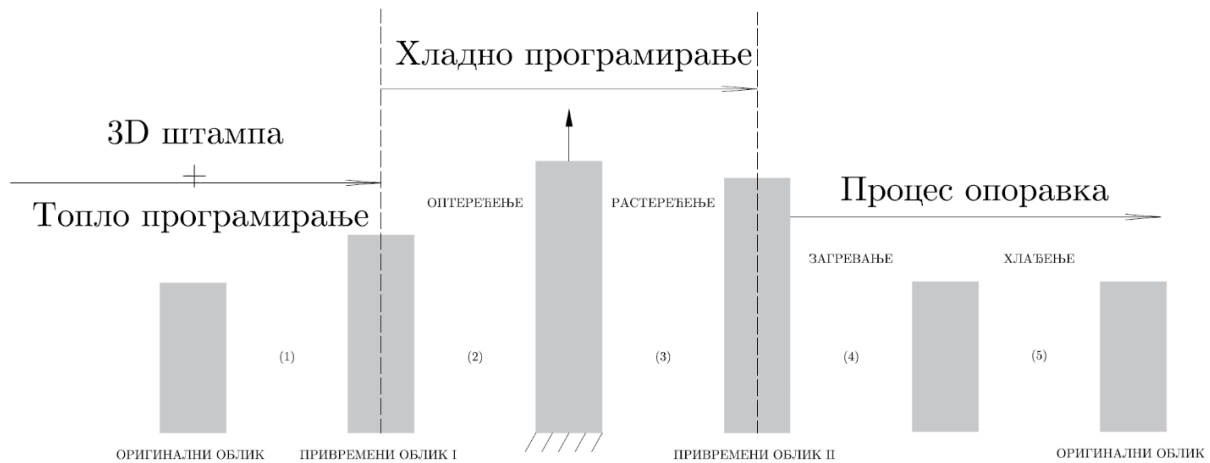
Слика 2.15: Топло програмирање полимера са памћењем облика

На Слици 2.16 приказан је процес хладног програмирања у ком се материјал при ниској температури деформише, растерети и затим се загревањем постиже обнова облика. Овај начин испитивања је повољан са технолошког аспекта, због краћег времена припреме (нема дуготрајног загревања). Са друге стране, топло програмирање подразумева мале силе приликом испитивања на притисак.



Слика 2.16: Хладно програмирање полимера са памћењем облика

Слика 2.17 показује програмирање штампањем, где се сматра да се материјал након топљења и наношења налази у свом првом деформисаном облику. Затим се програмирањем деформисањем доводи у други привремени деформисани облик а након тога се загревањем активира ефекат памћења облика, у току ког материјал успева да транзицијом кроз 2 температурна региона поврати првобитни облик. Овакве материјале, заступљене у 4Д штампи одликује изузетно широк опсег транзиционе температуре.



Слика 2.17: Програмирање 3Д штампањем

2.5 Преглед материјалних модела

Приступу у техници моделирања, које су развијене током последње деценије, могу се поделити на реолошке и феноменолошке приступе. Уз то, при моделирању полимера са својством памћења облика постоје два основна принципа, модели који користе транзицију свих променљивих стања и модели који материјал третирају као мешавину две фазе у материјалу. Без обзира на принцип који се користи неопходно је да модел одговори симулацијама на различитим брзинама деформације и температурама како би и током транзиције симулација била тачна и ефикасна. Развој материјалних модела зависио је значајно од развоја хардвера. Примена и развој модела који укључују вископластичност, као и спрегнуте релације више физичких поља поклапа се са почетком новог миленијума и појавом бољих хардверских конфигурација. До тог периода модели су били намењени углавном класичним теоријама еластичности и пластичности, са и без ојачања. Као један од првих радова у области напредних материјалних модела за изучавање аморфних полимера настали су радови [106–108]. У њима аутори користећи декомпозицију градијената деформације, два микромеханизма и теорију великих деформација излажу једну од првих теорија које дефинишу понашање полимерних материјала у области великих деформација.

Модел који је примарно представљен [109], и даље развијен кроз [110,111] намењен је за моделирање полиуретана са својством памћења облика. У сваком од вискоеластични модел је унапређен укључивањем граничне вредности нееластичне иреверзибилне деформације, термичке експанзије и термичке деформације. У раду [112] представљен је модел који се састоји од два паралелна микромеханизма са Максвеловим елементима. Иако је модел даје добре резултате при самом процесу фиксације облика, али услед вискозности Максвелових елемената не укључују део иреверзибилне деформације.

Унапређени модел који укључује иреверзибилне деформације уз одлично слагање између модела и експеримената изложен је у [113]. Одступања модела настају услед изостављања термичке експанзије која игра једну од кључних улога у својству памћења облика полимерних материјала. Користећи теорију малих деформација модел са две унутрашње напонске променљиве стања представљен је у [114]. Свака од променљивих стања користи се за моделирање једног од механизма својства памћења облика, фиксацију облика и реверзибилну деформацију. Резултати модела су поређени са једноосним експериментима за различите степене деформације и режиме оптерећења.

Користећи теорију великих деформација, у [115] је представљен 3Д термо-вискоеластични материјални модел. Користећи принцип декомпозиције градијента деформације и Хенкијеву деформацију, модел је конципиран из два дела, еластични и вискоеластични. Један од најзначајних радова на пољу унапређења модела полимера са својством памћења облика дат је у [116]. Модел се састоји од две одвојене фазе представљене микромеханизмима меке фазе и чврсте фазе кроз хипереластични односно, еласто-вископластични модел. Поред тога, кроз коефицијент запреминског удела укупни напон дефинишу као мешавину напона меке и чврсте фазе. Модел је верификован изотермичким једноосним експериментима притиска за различите брзине деформације и температуре, као и експерименту слободне обнове облика цилиндричног узорка изложеног термо-механичком испитивању.

Модел који користи фиктивну температуру, нелинеарну Гибсову релаксацију и модификовану Ајрингову функцију течења представљен је у [117]. Верификација модела извршена је на једноосним експериментима и слободној обнови облика узорака од полимера са својством памћења облика. Пратећи приступ [114], [118] развили су 3Д конститутивни модел који описује нелинеарно понашање материјала при великим деформацијама. Модел заснован на термоеластичности, укључује концепт сачуване деформације и удела замрзнуте запремине. Конститутивне релације овог модела, у општем облику, могу се представити као правила мешања удела од деформације у замрзнутој и активној фази као и удела деформације која је замрзнута током хлађења. Линеаризована верзија овог модела за мале деформације верификован је поређењем са подацима из литературе презентованим у [114] док модел за велике деформације није верификован услед недовољно доступних података у литератури. [119,120] развили су моделе користећи термодинамички приступ развијен од [121] за полимере са памћењем облика који подлежу промени облика кроз делимичну кристализацију коришћењем критеријума максималне брзине деформације. [115] предлажу модел комбинујући генералисани Максвелов модел са WLF једначином, са специфичним параметрима. Како си и Максвелов генералисани модел и WLF једначина доступни у ABAQUS/Standard, модел је имплементиран директно у софтвер, и испитан за различите случајеве укључујући торзионо враћање облика танких призматичних штангли за различите брзине загревања. Аутори у [122] приказују моделирање стента од полимера са својством памћења облика моделом базираном на теорији великих деформација. Кроз нову функцију мешања, енергетске релације чврсте и меке фазе преузимају улогу микро, односно, макромеханичког удела. У [123] представљен је модел развијен применом декомпозиције градијента деформације, кроз три одвојена микромеханизма, који комбинују еластични, вископластични и Гентов хипереластични модел. Модел је верификован поређењем резултата симулације са добијеним експерименталним резултатима. [124] модификовали су модел предложен од [114] и представили еволутивно правило за унутрашње променљиве хлађења и загревања. Конститутивни модел је имплементиран у UMAT уз симулацију торзије призматичних штангли и поређење добијених резултата са експерименталним подацима. Кроз три рада [125–127] група аутора унапређује моделирање аморфних полимера и полимерних раствора са својством памћења облика, увођењем једначина фиктивне температуре и вискозне релаксације, користећи хипереластични Аруда Бојс материјални модел. Поред сложених модела са више микромеханизма могуће је заменити и 1Д моделима представљеним у [128–130]. Користећи раније поменуте модел мешања у раду [131] је представљен модел којим успешно верификују експерименти затезања полимера са памћењем облика. У оквиру теорије развијена је нова функција течења која омогућава тачније резултате посебно у области тачке течења. Модификован материјални модел са унутрашњим променљивим стања и модификованом Ајринговом функцијом течења, структурном

релаксацијом и вискоеластичношћу приказан је у [132]. Поред укључивања унутрашњих напонских променљивих модел приказује теорију вискоеластичности насупрот феноменолошком приступу који користи фиктивне температуре. Унапређујући раније представљени еласто-вископластични материјални модел [133] верификују експерименте спроведене на танким ПЛА филмовима израђеним притискивањем на високим температурама. Развој материјала попут ПММА [134], ПЕЕК [135] и поликарбоната намеће развој и имплементацију све већег броја напредних материјалних модела којима би се моделирало иначе сложено понашање нових материјала. Готово све наведене материјале одликује понашање изразито зависно од температуре испитивања и брзине деформације. Поред наведених карактеристика, услед слабе проводљивости ових материјала долази до унутрашњег загревања и ефектима памаћења облика функционалних паметних материјала попут ПЛА и тБА. Материјални модели који дефинишу 3Д и 4Д штампане материјале слабо су заступљени. Углавном се примењују раније развијени модели, иницијално коришћени за анизотропне материјале, а који зависе од прве и друге инваријанте тензора деформације. Једноставан приступ за моделирање анизотропије у 3Д штампаним ПЛА узорцима дат је у [136]. У раду [137] представљен је материјални модел за фотополимере израђене стереолитографијом. Развијени материјални модел користећи два микромеханизма укључује зависност од температуре, брзине деформације и оријентације израде. Користећи две варијанте материјалних модела који укључују и функцију течења са анизотропијом, еласто-вископластични и хипереластични-вископластични, у раду [138] је представљено моделирање полимерних ћелијских метаматеријала израђених депоновањем слојева. Модел је имплементиран у комерцијални софтвер и верификован поређењем са експериментом. У скорије време, интензивирањем је развој материјалних модела који укључују ефекте 3Д штампања кроз материјалне моделе [139,140].

Поглавље 3

3 Кинематика деформације

У овом поглављу представљене су основне претпоставке кинематике деформације и релација које ће бити коришћене у формулацији конститутивних релација. Једначине које су представљене у поглављу познате су опште формулације механике континуума и детаљнија извођења могуће је наћи у књигама различитих аутора [32,141–143].

3.1 Градијент деформације

Проучавањем деформације континуума између два положаја описаних као референтна и текућа конфигурација, дефинисана је неопходност увођења градијента деформације као тензора који повезује две тачке. Градијент деформације је дат као:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \chi(\mathbf{X}, t)}{\partial \mathbf{X}} \quad (3.1)$$

или у индексној нотацији:

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (3.2)$$

Такође, однос текуће запремине (v) и почетне запремине (V) је описан детерминантом градијента деформације \mathbf{F} [141]:

$$J = \det \mathbf{F} = \frac{dv}{dV} > 0 \quad (3.3)$$

Како је сваки симетрични тензор могуће представити преко сопствених вредности и сопствених вектора добијамо спектралну репрезентацију:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \hat{\mathbf{n}}_i \otimes \hat{\mathbf{N}}_i \quad (3.4)$$

где су λ_i главна издужења, $\hat{\mathbf{n}}_i$ и $\hat{\mathbf{N}}_i$ вектори базе градијента деформације. Коришћењем поларне декомпозиције [141] могуће је градијент деформације јединствено декомпоновати на део ротације и део издужења:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U} = \mathbf{v}\mathbf{R} \quad (3.5)$$

Симетрични десни тензор издужења можемо представити спектралном декомпозицијом:

$$\mathbf{U} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \hat{\mathbf{N}}_i \otimes \hat{\mathbf{N}}_i \quad (3.6)$$

где су λ_i главна издужења а $\hat{\mathbf{N}}_i$ сопствени вектори тензора \mathbf{U} . Аналогно леви тензор истезања је:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \hat{\mathbf{n}}_i \otimes \hat{\mathbf{n}}_i \quad (3.7)$$

Везу између \mathbf{v} и \mathbf{U} добијамо решавањем:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \mathbf{U} \mathbf{R}^T = \sum_{i=1}^3 \lambda_i (\mathbf{R} \hat{\mathbf{N}}_i) \otimes (\mathbf{R} \hat{\mathbf{N}}_i) \quad (3.8)$$

Десни Коши-Гринов тензор деформације дат је изразом:

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \quad (3.9)$$

дат преко главних вредности:

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \hat{\mathbf{N}}_i \otimes \hat{\mathbf{N}}_i \quad (3.10)$$

Леви Коши-Гринов тензор деформације:

$$\mathbf{b} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T \quad (3.11)$$

или:

$$\mathbf{b} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T = \mathbf{v} \mathbf{R} \mathbf{R}^T \mathbf{v}^T = \mathbf{v}^2 \quad (3.12)$$

Преко главних вредности:

$$\mathbf{b} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \hat{\mathbf{n}}_i \otimes \hat{\mathbf{n}}_i \quad (3.13)$$

При поларној декомпозицији полазимо од:

$$\mathbf{U}^2 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \hat{\mathbf{N}}_i \otimes \hat{\mathbf{N}}_i \quad (3.14)$$

па је тензор \mathbf{U} могуће израчунати:

$$\mathbf{U} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \hat{\mathbf{N}}_i \otimes \hat{\mathbf{N}}_i \quad (3.15)$$

Тензор \mathbf{R} могуће је израчунати за познато \mathbf{U} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{F} \mathbf{U}^{-1} \quad (3.16)$$

као и \mathbf{v} :

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{R}^T \quad (3.17)$$

У референтној конфигурацији могуће је тензор деформације представити у функцији од \mathbf{U} :

$$\mathbf{E} = \widehat{\mathbf{E}}(\mathbf{U}) \quad (3.18)$$

Тензорска зависност приказана у спектралном облику:

$$\mathbf{E} = \widehat{\mathbf{E}}(\mathbf{U}) = \sum_{i=1}^3 f(\lambda_i) \widehat{\mathbf{N}}_i \otimes \widehat{\mathbf{N}}_i \quad (3.19)$$

Неколико мера деформације дато је за референтну конфигурацију. Грин-Лагранжеова деформација:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} [\mathbf{U}^2 - \mathbf{I}] \quad (3.20)$$

Стварна или логаритамска (Хенкијева) деформација:

$$\mathbf{E} = \ln \mathbf{U} \quad (3.21)$$

Биотова деформација:

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} - \mathbf{I} \quad (3.22)$$

Алманасијева деформација:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} [\mathbf{I} - \mathbf{U}^{-2}] \quad (3.23)$$

Мере деформације за деформисану конфигурацију:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}(\mathbf{v}) \quad (3.24)$$

а у спектралној формулацији:

$$\mathbf{e} = \sum_{i=1}^3 f(\lambda_i) \widehat{\mathbf{n}}_i \otimes \widehat{\mathbf{n}}_i \quad (3.25)$$

Номинална деформација:

$$\mathbf{e} = \mathbf{v} - \mathbf{I} \quad (3.26)$$

Стварна или логаритамска (Хенкијева) деформација:

$$\mathbf{e} = \ln \mathbf{v} \quad (3.27)$$

Ојлер-Алманаси деформација:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} [\mathbf{I} - \mathbf{b}^{-1}] \quad (3.28)$$

3.2 Брзина деформације

За извођење конститутивних релација вископластичности материјала неопходно је знати извод градијента деформације по времену:

$$\dot{\mathbf{F}} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{X}} = \text{Grad} \mathbf{v} \quad (3.29)$$

где је \mathbf{I} градијент брзине у деформисаној конфигурацији:

$$\mathbf{I} \equiv \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{X}} = \text{grad} \mathbf{v} \quad (3.30)$$

Декомпозиција брзинског градијента на симетрични ($\mathbf{d} = \mathbf{d}^T$) и косо-симетрични део ($\mathbf{w} = -\mathbf{w}^T$):

$$\mathbf{I} = \mathbf{d} + \mathbf{w} \quad (3.31)$$

које називамо и тензор брзине деформације:

$$\mathbf{d} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{I}^T) \quad (3.32)$$

и спин тензор:

$$\mathbf{w} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} - \mathbf{I}^T) \quad (3.33)$$

Од последњих релација \mathbf{d} је од посебне важности за формулисање конститутивних релација и процедуру интеграције напона.

3.3 Тензори напона

Према Кошијевој теореме, за тело оптерећено спољашњим силама, постоји јединствено тензорско поље напона $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x})$ независно од пресека одређено нормалом \mathbf{n} :

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{n}) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) \mathbf{n} \quad (3.34)$$

Кошијев тензор напона:

$$\boldsymbol{\sigma} = \sum_{i=1}^3 \sigma_i \hat{\mathbf{n}}_i \otimes \hat{\mathbf{n}}_i \quad (3.35)$$

Једначина у референтној конфигурацији има облик:

$$\mathbf{T}(\mathbf{X}, \mathbf{N}) = \mathbf{P}(\mathbf{X}) \mathbf{N} \quad (3.36)$$

где $\mathbf{P}(\mathbf{X})$ називамо номинални тензор напона или Пиола-Кирхофов тензор напона. Веза Пиола-Кирхофовог и Кошијевог напона дата је преко:

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{J}\boldsymbol{\sigma}\mathbf{F}^{-\mathbf{T}} \quad (3.37)$$

а Кошијев напон:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{F}^{\mathbf{T}} \quad (3.38)$$

Поред осталих, често се користи Кирхофов напон:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}\boldsymbol{\sigma} \quad (3.39)$$

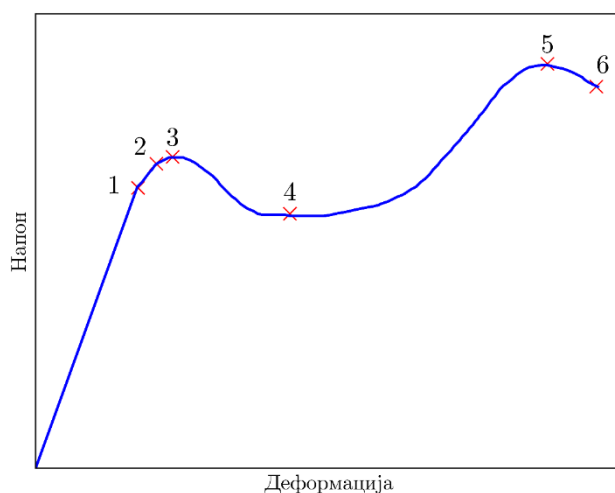
Поглавље 4

4 Експеримент

4.1 Опште карактеристике испитивања полимера

Поред убрзаног развоја материјала на пољу полимера свих врста, али и развоја нових легура и све присутнијих композита, јавља се потреба за њиховом карактеризацијом, механичком или термичком. Иако су изразито осетљиви на температуру, полимери нису једини материјали са том одликом. Заправо сви материјали су осетљиви на промену температуре али са битно различитом температуром експлоатације материјала. Чак и легуре челика показују знатан пад механичких карактеристика али на изузетно високим температура, до којих у експлоатацији ретко и долази, осим у неким моторним системима [144]. Полимери са друге стране, имају знатно ниже експлоатационе температуре уз максималне температуре које не прелазе 200 °C. Како су показали [145] и други истраживачи, поликарбонат, плексиглас и други аморфни стакласти полимери показују снажну зависност од температуре и термо-механичких услова у којима се налазе, пре свега брзине деформисања. Испитивања полимера подлежу обимним стандардима ASTM D638/ISO527 (испитивање на затезање) и ASTM D695/ISO604 (испитивање на притисак). Стандарди подразумевају испитивање у широком опсегу температура и брзина деформације. Оваква испитивања су изузетно временски захтевна, и подразумевају велики број јединствених испитивања која треба, због одговарајуће тачности, поновити бар 3 пута. За потребе ове дисертације, само у оквиру испитивања фотополимера (2 брзине и 5 температура) изведено је преко 40 тестова. Овај број сведочи о обимности и захтевима приликом извођења експеримената и верификације термо-механичких карактеристика материјала.

Пре почетка било каквих испитивања неопходно је упознати се са природом понашања сродних материјала. За разлику од конвенционалних материјала, попут метала и легура, чије је понашање описано класичним теоријама, попут пластичности, понашање полимерних материјала може знатно варирати са одабиром материјала. Метали, а пре свега челици, махом имају тенденцију ојачавања у зонама након почетка течења, што се наставља све до тачке затезне чврстоће. Са друге стране, полимере углавном карактерише другачије механичко понашање. Карактеристична крива испитивања поликарбоната притискивањем приказана је на Слици 4.1.



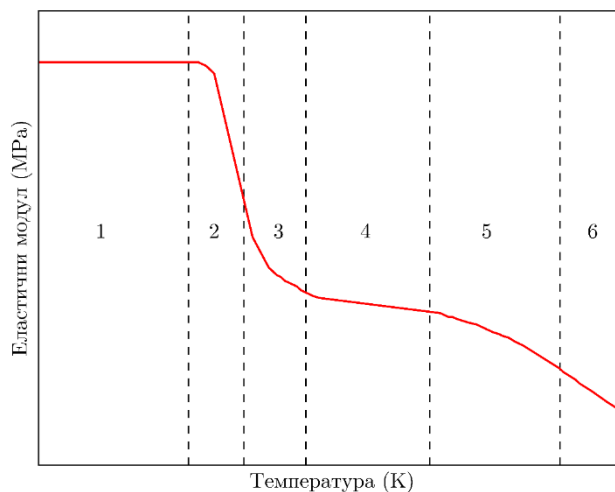
Слика 4.1: Карактеристичка крива напон-деформација са назначеним кључним регионима

На слици су назначене кључне тачке или региони приликом испитивања:

1. еластични, реверзибилни регион при малим деформацијама
2. почетак течења материјала непосредно пре максималне вредности напона
3. напон течења
4. између 3 и 4 - област слабљења материјала услед кидања полимерних ланаца при средњим деформацијама
5. између 4 и 5 - деформационо ојачање материјала при великим деформацијама
6. дезинтеграција/кидање материјала

Иако су дате као одвојене тачке у току испитивања, најчешће се сматра да су тачке 2 и 3 бесконачно блиске или да се поклапају. Поред тога, на потезу између тачке 4 и тачке 5 долази од изразито нелинеарног понашања материјала. Ово се објашњава ентропијским ојачањем проузоркованим формирањем нових веза полимерних ланаца у правцу деформације. Слично томе, на делу криве након течења, услед пуцања полимерних веза материјал нагло слаби све до тачке 4 максималне тачке омекшавања. Иако није нужно тачно, готово све полимере одликује врло узак линеарни појас, па се више може говорити јако израженом нелинеарном понашању материјала током целог тока испитивања. Такође, готово све полимере, изузев појединих еластомера и гума, одликује деформационо омекшавање након тачке течења.

На Слици 4.2 приказана је крива промене модула еластичности са променом температуре од собне или изузетно ниске, до температуре непосредно пре тачке топлјења.

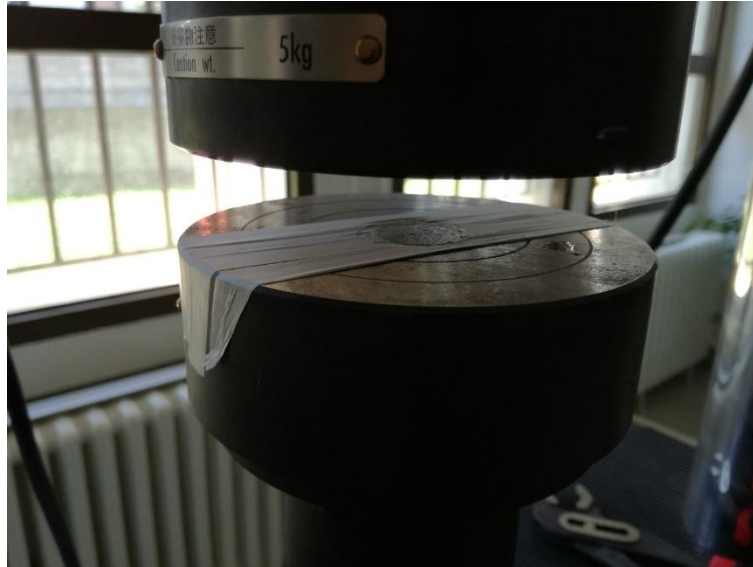


Слика 4.2: Карактеристичка крива промене чврстоће материјала са температуром

Полимери се најчешће испитују једноосно притискивањем. Овакав начин испитивања узима се као примарни због обрадних процеса којима је материјал најчешће изоложен у току експлоатације - режими истискивања, индентације и сл. Како су термопластични материјали углавном крти, проценат њихове деформације лома приликом затезања је јако мали за разлику од метала чији је то пожељан режим испитивања. Једноосно испитивање притискивањем носи неколико техничких изазова које треба превазићи:

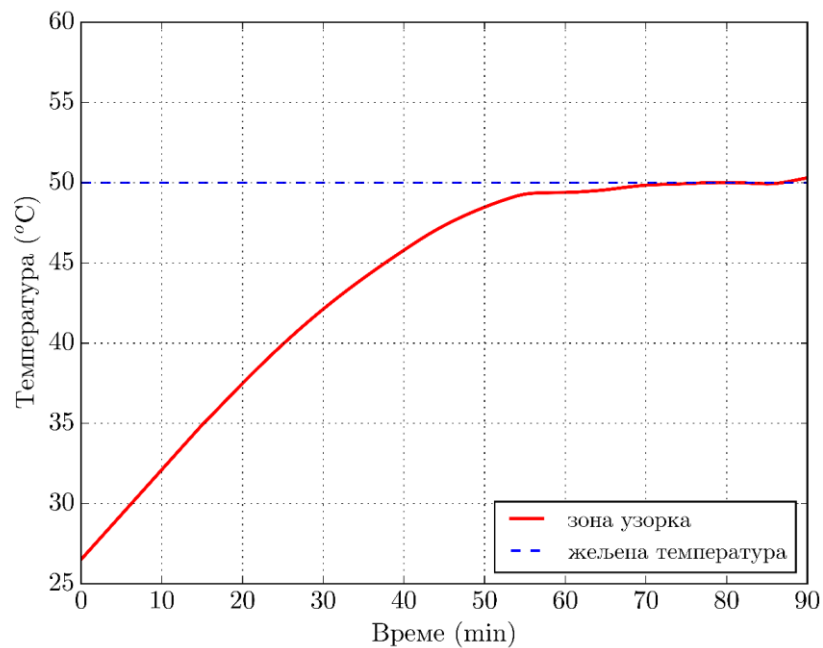
- појава трења на контактним површинама
- постизање температурне равнотеже током испитивања
- постизање равномерне брзине испитивања

Највећи изазов у испитивању притискивањем представља трење које се јавља на контактним површинама. Како у режиму притискивања контактна површина током испитивања расте, повећава се и утицај трења на стање деформације узорка. Последице великог коефицијента трења најчешће су, гомилање материјала у контактним слојевима, нагужвавање али и појава буричастог облика самог узорка (енг. *barrelling*). Како би се утицај трења умањио могуће је применити више метода. Као логично решење намеће се неки вид подмазивања контактних површина, али се то због природе самих узорака избегава. Друго решење је прављење овалних чаура за испитивање. Иако се у [31] показало као ефикасно решење, овакав начин испитивања мора да прати и одговарајућа технологија израде узорка по мери чауре. Решење које је примењено у експериментима спроведеним у оквиру ове дисертације, јесте наношење тефлонских трака. Траке су лако доступне, јефтине, имају задовољавајуће карактеристике у погледу дебљине (<0.1 mm). Тефлон се наноси директно на притисне плоче, уколико је испитивање у условима собне температуре када се не активира термичка комора. Из практичних разлога при испитивању у условима повишених температура могуће је тефлон нанети на сам узорак, у његовом контактном делу, непосредно пре постављања у комору. Искуство изведених испитивања показало је да површина тефлонске траке треба да буде значајно већа од површине узорка (преко 2 пута). На Слици 4.3 је приказана тефлонска трака нанета на притисну плочу у условима испитивања на собној температури.



Слика 4.3: Припрема притисних плоча наношењем тефлонских трака ради смањења трења контактних површина

Друго питање које се намеће приликом испитивања полимерних материјала јесте њихово загревање. Како су материјали изузетно термички осетљиви неопходно је успоставити термичку равнотежу у окружењу испитивања у току целог трајања процеса. Одржавање константне температуре коморе и узорка није једноставно и временски је захтеван и дуг процес. Коморе су углавном масивне и сачињене од делова преко којих се лако одводи топлота. Са друге стране, полимерни материјали су лоши проводници топлоте. Нека од решења за овај проблем предложена су у радовима [31,146,147]. Један од предлога је да се, ради успостављања целе методологије испитивања на повишеним температурама, уради цела пробна серија тестова са узорцима који су забушени микробургијама ради уметања термопарова. На овај начин добија се потпуно реалан динамички профил температуре. Ипак, довољно је у одређеном временском периоду успоставити константну температуру термо-коморе. Исту процедуру у истраживањима у оквиру дисертације. Профили добијених кривих напон-деформација показују да је узорцима ПЛА потребно најмање 90 минута за равномерно прогревање. На ово свакако утиче и већ поменут масивни мерни систем, и делови преко којих се лако одводи топлота. У случају узорака од фотополимера ово време је нешто краће, око 30 минута. Ово је последица, како различите природе материјала али и мањег мерног система са бољом изолацијом. Профил температуре снимљен приликом загревања ПЛА узорка приказан је на Слици 4.4.



Слика 4.4: Постизање температурне равнотеже у узорку и притисним плочама пре испитивања на температури од 50 °C

Последњи корак, јесте омогућавање испитивања при константној брзини деформације. Модерни опитни системи су углавном хидраулички или електромеханички. Код електромеханичких управљање брзином притискивања управља се путем редуктора и навојног вретена. Хидрауличне кидалице засноване хидроцилиндар, који у систему серво управљања са повратном спрегом постаје актуатор са веома прецизним управљањем знатно већих оптерећења него што је то могуће код електромеханичке кидалице.

4.2 Опрема и методологија испитивања

4.2.1 Опрема

Сва испитивања у оквиру дисертације спроведена су на Факултету инжењерских наука. Највећи део истраживања спроведен је у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, применом сервохидрауличне кидалице. SHIMADZU кидалица је приказана на Слици 4.5. Представљени мерни систем омогућава испитивања у различитим режимима који су неопходни - брзине деформације и температуре.

EHF - E V 1 0 1 K 3 - 0 7 0 - 0 A

① ② ③ ④ ⑤ ⑥



① E-тип рама - Стандардни рам са погоном доњег клипа

② V модел контролера



Контролер 4830

③ Вредност максималне силе 100kN (ознака 101)

④ Максимални ход клипа $\pm 100\text{mm}$ (ознака 3)

⑤ Тип хидрауличног напајања QF-70B (ознака 070)

⑥ Додатна ознака за специјални тип машине

Слика 4.5: Сервохидрауличка кидалица, Факултет инжењерских наука, Лабораторија за динамичка испитивања и инжењерски софтвер.

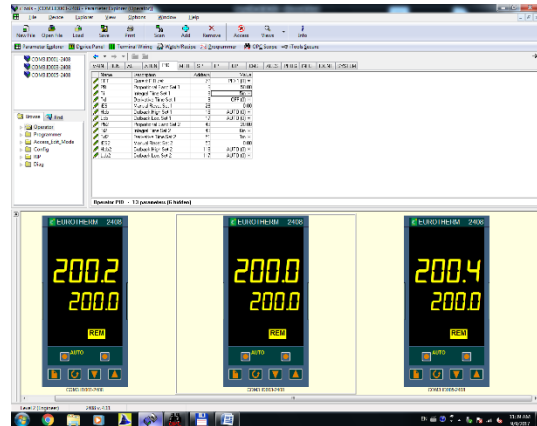
Додатна опрема састоји се од:

- дводелне коморе
- контролер температуре

За испитивање узорака од ПЛА на повишеним температурама користи се фабричка дводелна комора. Грејање коморе се остварује преко 3 грејача постављена равномерно у 3 нивоа. Предност овакве конструкције коморе је мерење температуре директним читавањем у три кључне области - доње притисне плоче, узорка, горње притисне плоче. Грејачима се управљан преко независног контролера повезаног са рачунаром. Приликом испитивања мери се сила притиска и померање. На основу претходно задатих димензија узорка могуће је путем контролног софтвера снимати и друге прерачунате величине, попут напона и деформације. За независно управљање грејачима коришћен је регулатор EUROTHERM2408 приказан на Слици 4.6а. Повезивање регулатора је реализовано преко RS485 модула. Задавање параметара PID регулатора, жељених температура и комплетан мониторинг параметара је омогућен повезивањем контролера са РС рачунаром коришћењем софтверског пакета iTOOLS 4.6б. Комуникација контролера са рачунаром је остварена помоћу USB-RS485 конвертора. Софтверским пакетом вршено је снимање промене температуре током времена.



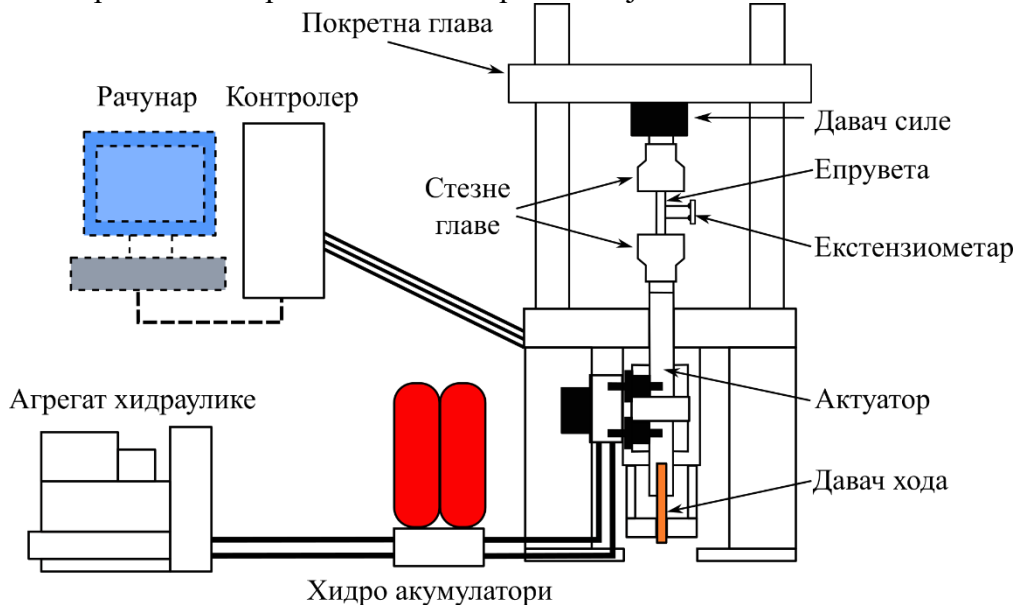
(a) PID регулатор



(б) Софтвер

Слика 4.6: Управљање грејачима у комори: а) PID регулатор EURO THERM 2408 и б) софтверски пакет iTOOLS

Експериментално одређивање криве течења узорка од материјала који се испитује, реализовано је на сервохидрауличком уређају за статичка и динамичка испитивања SHIMADZU шематски приказан на Слици 4.7. Исти уређај је коришћен и при реализацији осталих испитивања, уз коришћење додатне опреме за загревање епрувете. Комора интегрисана са мерним системом приказана је на Сликама 4.8 и 4.9.



Слика 4.7: Шематски приказ кидалице SHIMADZU



Слика 4.8.: Уграђен екстензометар на комори: а) пре загревања и б) за време загревања са укљученим системом воденог хлађења



Слика 4.9: Додатна опрема за испитивање на повишеним температурама: а) Комора за загревање узорака и б) контролер коморе

Силе које се постижу, услед очекиваног слабљења материјала, су мање од сила добијених на собној температури. За испитивања на повишеним температурама, била је неопходна употреба система воденог хлађења носача. На тај начин је омогућено додатно хлађење притисних плоча чиме се обезбеђује безбедан и поуздан рад.

Остваривање жељене температуре испитивања је реализовано помоћу температурне коморе за загревање, која је саставни део сервохидрауличног уређаја за стандардно

статичко и динамичко испитивање материјала. Комора поседује три грејача, који омогућавају грејање у три вертикалне зоне. Контрола грејања је аутоматизована употребом три идентична регулатора, по један за сваки грејач. Термопарови су коришћени за директно читавање температуре епрувете и притисних плоча унутар коморе, директно је мерена сила притиска, ход и деформација. Методологија, поступак и остали услови експерименталних испитивања су изведени у складу са стандардом ASTM695.

4.2.2 Адаптација опреме

На мерни систем Brookfield у Центру за трибологију, ради испитивања полимерних материјала на температурама вишим од собне, додата је термо комора. Комора је израђена од челика, са пропратном изолацијом. Систем грејача је додат у зидове коморе док је преко контролера омогућено управљање и задавање температуре. Мерни систем са термо комором приказан је на Слици 4.11.



Слика 4.10: Комора за испитивање полимерних материјала на повишеним температурама адаптирана на постојећи мерни систем Brookfield - Центар за трибологију, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу

Сервопулзер Shimadzu са додатном термо-комором, у стандардној верзији омогућава само испитивање затезањем на повишеним температурама. Ради адаптације за испитивање на притисак, израђен је прихватни алат у виду притисних плоча које се преко навоја монтирају на постојећу опрему. Слика адаптације приказана је на Слици .



Слика 4.11: Додатни прихватни алати направљени за испитивање у комори високих температура на мерном систему Shimadzu, Центар за динамичка испитивања и инжењерски софтвер, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу

4.2.3 Методологија

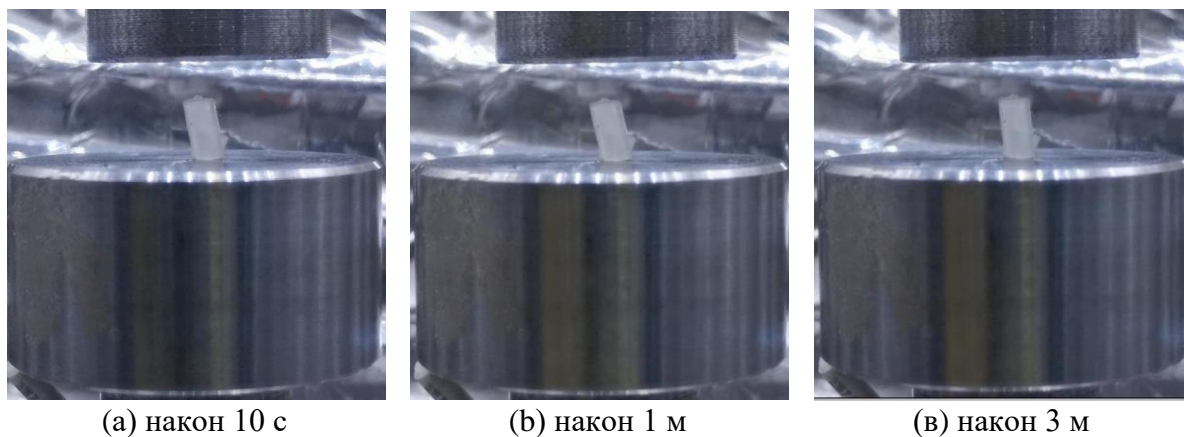
За одређивање механичких карактеристика полимера примењују се методе затезања, притискивања, савијања или увијања [32]. У оквиру испитивања примењене су препоруке стандарда ASTM D695. Применом наведених препорука изведена су:

1. испитивања притискањем на температурама нижим од транзиционе температуре T_g
2. испитивања притискањем на температурама вишим од транзиционе температуре T_g
3. испитивања при различитим брзинама деформације
4. испитивања у одговарајућим термо-механичким циклусима

Како је већ у уводу напоменуто, испитивање притиском представља једну од основних експерименталних метода испитивања термопластика. Спроводи се са циљем одређивања основних механичких карактеристика изабраног материјала. Према поменутиим стандардима испитивање се спроводи притискивањем узорка, најчешће до деформације веће од 50% почетне висине узорка. На овај начин се одређивање једна или више механичких карактеристика при температурама у опсегу од собне до температуре експлоатације. Током испитивања, снима се инжењерска крива течења мерњем силе и хода кидалице. Главне карактеристике које се односе на добијену криву течења притискивањем [32] су:

1. модул еластичности E
2. напон течења
3. степен омекшавања
4. степен ојачавања материјала при великим деформацијама

Узорци се израђују од основног материјала, а према препорукама за термопластике, треба да су квадратног или кружног попречног пресека. За полимерне материјале углавном се користе цилиндричне епрувете код којих однос висине и пречника може варирати од 1:2, 1:1 или 2:1, како би се избегло извијање узорка. Проблем извијања узорка услед неусклађености димензија приказан је на Слици 4.12. Као што се може видети током деформисања узорак се неправилно деформише али и враћа почетни облик након загревања.



Слика 4.12. Процес обнове облика у узорцима фотополимера при загревању у комори на температури 90 °С. Код узорка је при деформисању дошло до извијања услед неусклађености односа пречника и висине. Узорци су израђени у Центру за информационе технологије и испитани у Лабораторији за динамичка испитивања и инжењерски софтвер, Факултет инжењерских наука..

Уобичајено је да се као резултат мерења притискивањем термопластика приказује крива зависности напона од деформације, крива течења, чиме се избегава утицај геометрије узорка. Методологија испитивања пластичних материјала на повишеним температурама је дефинисана стандардима. На основу методологије коју је Дишић развио у докторској дисертацији [144], представљамо методологију испитивања термопластика притискивањем:

- узорак - израда цилиндричних узорака у складу са препорукама стандарда ASTM695
- припрема термо-коморе: припрема термопарова, постепено загревање, предоптерећење узорка минималном силом ради избегавања последица непаралелности плоча, постизање константне температуре,
- креирање завршног извештаја испитивања који садржи све измерене вредности

4.2.4 Мере деформације и напона

Инжењерски напон σ_n представља однос оптерећења и почетног попречног пресека:

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

Стварни напон σ је однос оптерећења и тренутног попречног пресека:

$$\sigma_{st} = \frac{F}{A} = \frac{F l}{A l_0} = \frac{F}{A_0} \exp(\epsilon) \quad (4.2)$$

Инжењерска деформација одређује се као:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.3)$$

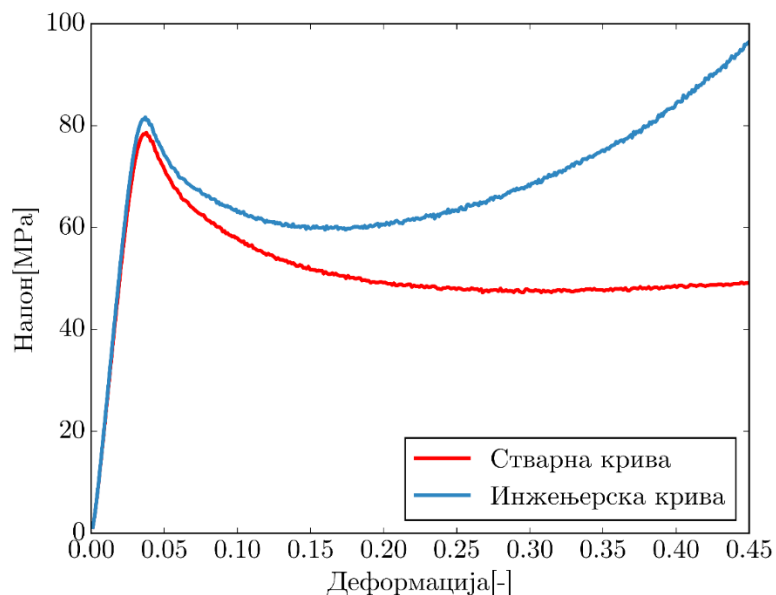
где је l_0 почетна висина епрувете, а Δl њена деформација која се одређује према $\Delta l = l - l_0$. Коришћењем услова да је запремина епрувете константна, веза између стварног и инжењерског напона дата је релацијом:

$$\sigma_{st} = \frac{F}{A_0} (\epsilon + 1) = \sigma (\epsilon + 1) \quad (4.4)$$

Уз наведене претпоставке за напон, које важе и за деформацију, везе између стварне и инжењерске деформације може се приказати једначином:

$$\epsilon_{st} = \ln(\epsilon + 1) = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4.5)$$

Напон се израчунава према почетном попречном пресеку. Како се попречни пресек током притискивања увећава инжењерска крива течења приказује реални однос напона и деформације. На Слици 4.13 је приказан однос инжењерске и стварне криве течења. Види се да су стварна деформација и стварни напон мањи од инжењерског напона при испитивању притискивањем.



Слика 4.13: Упоредни приказ инжењерске и стварне криве течења

Брзина деформације може се дефинисати као извод по времену:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4.6)$$

Мера брзина деформације је s^{-1} . За испитивање притискивањем брзина деформације дата је преко брзине покретне главе кидалице:

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (4.7)$$

а како је инжењерска брзина деформације пропорционална брзини главе кидалице, брзина деформације дата је релацијом:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d(l-l_0)/l_0}{dt} = \frac{1}{l_0} \frac{v}{l_0} \quad (4.8)$$

Једначина стварне брзине деформације је:

$$\dot{\epsilon}_{st} = \frac{\epsilon_{st}}{dt} = \frac{d[\ln(l-l_0)]}{dt} = \frac{1}{l} \quad (4.9)$$

Веза између стварне и инжењерске брзине деформације се може написати у облику:

$$\dot{\epsilon}_{st} = \frac{v}{l} = \frac{l_0}{l} \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{1+\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\dot{\epsilon}}{1+\epsilon} \dot{\epsilon}_{st} = \frac{\epsilon_{st}}{dt} = \frac{d[\ln(l-l_0)]}{dt} = \frac{1}{l} \quad (4.10)$$

Једначина (4.9) показује да при константној брзини кидалице опада стварна брзина деформације са повећавањем деформације. Закључује се да је неопходно испитивање обавити у контроли брзине деформације. Како кидалица омогућава линеарно померање притисне плоче у току времена неопходно је успоставити релације између линеарног и стварног померања. Узимањем временског извода:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\lambda} = \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \text{const} \quad (4.11)$$

где је λ издужење, у функцији померања $u(t)$ дато релацијом:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} = \frac{l_0 + u(t)}{l_0} \quad (4.12)$$

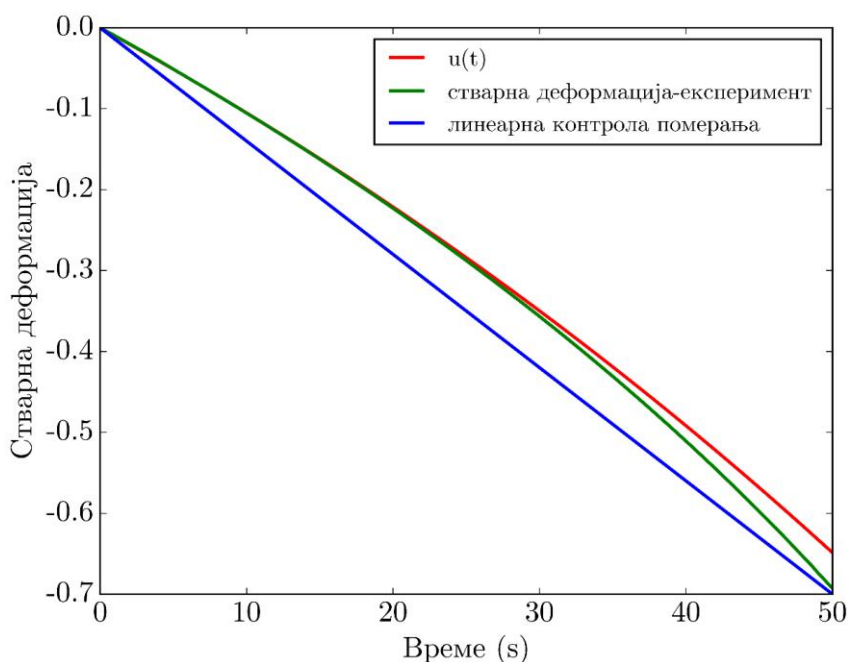
На основу (4.11):

$$\dot{\lambda} = \lambda \dot{\epsilon} \quad (4.13)$$

што даје релацију:

$$u(t) = l_0(\exp(\dot{\epsilon}t) - 1) \quad (4.14)$$

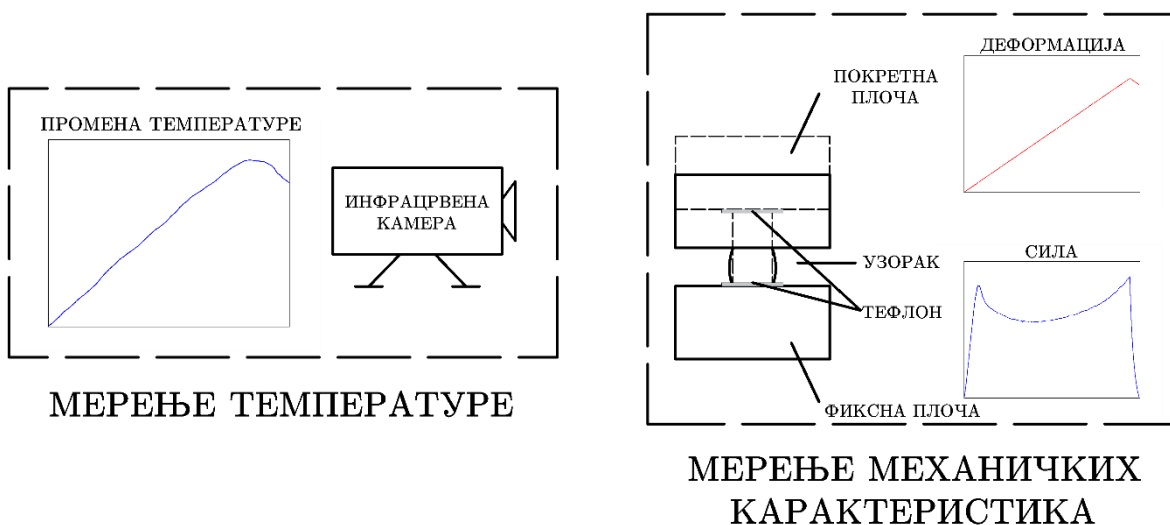
где је $\epsilon = \dot{\epsilon}t$. На основу дијаграма приказаном на Слици 4.14 и једначине (4.14) показује се да за деформације примењене у експериментима на мерном систему SHIMADZU, вредност деформације можемо узети са довољном тачношћу.



Слика 4.14: Поређење експерименталних и стварних померања

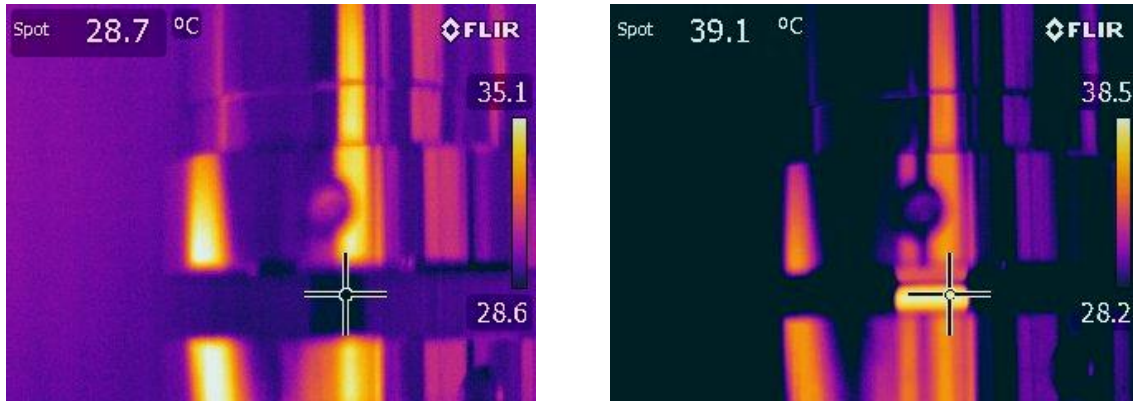
4.2.5 Мерење промене температуре при великим брзинама

Предмет испитивања су материјали, које поред ефекта памћења облика, карактерише и пораст температуре приликом испитивања на великим брзинама деформације. Приликом почетне групе испитивања ПЛА, увидом у криве течења примећено је значајно одступање и пада механичких карактеристика при брзинама деформације од 0.1 s^{-1} и 0.01 s^{-1} на собној температури. Са друге стране, при брзинама 0.001 s^{-1} и 0.0001 s^{-1} постижу се изотермички услови испитивања у материјалу што се закључује увидом у криве течења добијене мерењем. Ова запажањима су у складу са [145] који показују мали пораст температуре при испитивању плексигласа. У доступној литератури описан је значајан пораст температуре при брзинама деформације од 0.1 s^{-1} и 0.01 s^{-1} на собној температури при испитивању притискивањем. Ова појава указује на појаву адијабатског загревања током деформисања, јер услед брзине процеса генерисана топлота не може бити одата окружењу.



Слика 4.15: Шема термовизијског мерења раста температуре у узорцима

Након уочених промена извршено је поновно мерење при истим брзинама деформације уз снимање термовизијском камером Flir. Овакви тестови имају за циљ изловања ефеката адијабатског загревања. Шематски приказ мерења температуре у узорцима термовизијском камером приказан је на Слици 4.15. Профил температуре у узорку при брзини деформације 0.01 s^{-1} приказан је на Слици 4.16.



(а) 10 % деформације

(б) 50 % деформације

Слика 4.16: Термовизијско мерење температуре у узорцима

Промена температуре у узорку, при великим брзинама деформације, посебно је важна температуре испитивања које су близу транзиционе температуре T_g . Тада и за услове малог унутрашњег загревања може доћи до преласка транзиционе границе ($T > T_g$) и драстичног пада механичких карактеристика као на Слици 4.2.

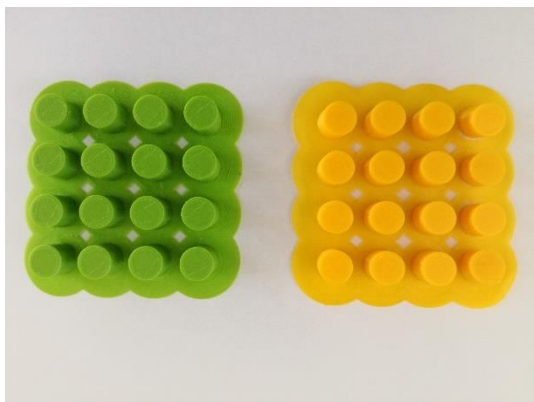
4.3 Експериментална процедура

4.3.1 Израда узорака

ПЛА узорци добијени су 3Д штампањем из ПЛА жице пречника 1.75 mm произвођача Ultimaker. Израђени су цилиндрични узорци пречника 10 mm и висине 10 mm приказани на Слици 4.17. ПЛА материјал има густину 1.24 g/cm^3 , брзину топљења при штампању (MFR) 6.09 g/10 min , и температуру топљења $T_m = 145\text{-}160 \text{ }^\circ\text{C}$. Како се види на Слици 4.18 транзициона температура ПЛА материјала је $T_g \approx 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Сви коришћени узорци израђени су на 3Д штампачу UM2+, бризгаљком 0.4 mm, испуњеношћу 100%, температуром бризгаљке $210 \text{ }^\circ\text{C}$, температуром радне плоче $60 \text{ }^\circ\text{C}$, висином наноса слоја од 0.1 mm и брзином штампања 10 mm/s . Узорци спремни за испитивање приказани су на Слици 4.18. Након израде узорци су термички третирани загревањем у пећи на температури која је за $\approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ виша од T_g и држањем на тој температури у периоду од два часа. Након тога узорци су споро хлађени у пећи, до собне температуре, у периоду од неколико часова. Процедура и утицај термичког третирања узорака након израде, приказана у [148], даје низ побољшања:

- ишчезавају имперфекције у узорцима
- умањује се евентуална порозност
- остварује боље пријањање слојева материјала
- побољшава се квалитет површинских слојева

Поступак загревања узорка приказано је на Слици 4.17. Цео поступак израде узорка и њиховог третирања спроведен је у факултетском Центру за информационе технологије.



(a) узорци након израде



(b) Прогревање израђених узорка у пећи

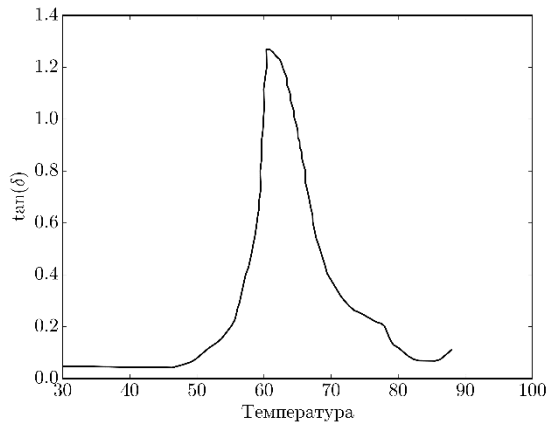
Слика 4.17: Узорци спремни за испитивање и њихова припрема прогревањем у пећи. Узорци израђени и грејани у Центру за информационе технологије, Факултет инжењерских наука

Напомена: Овде треба скренути пажњу на још једну чињеницу. Иако адитивне технологије као једну од главних предности наводе брзину израде, при научном разматрању паметних материјала у адитивним технологијама брзина штампања се мора значајно редуковати. Наиме, како се показује у [22] израда узорка од паметних материјала при великим брзинама штампе проузрокује изразито велику анизотропију услед заосталих термичких деформација. Параметери коришћени при изради ПЛА узорка приказани су у Табели 4.1.

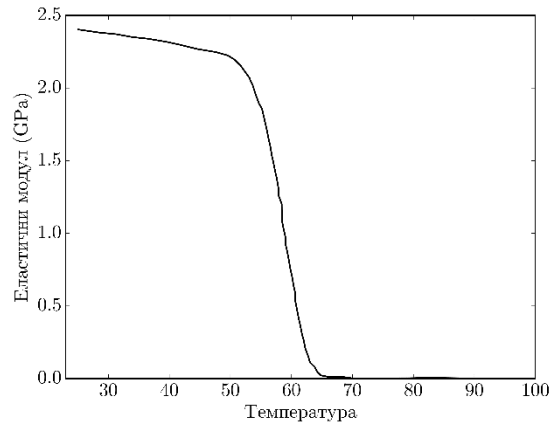
Подешавање штампача	Вредност
Висина слоја	0.1 mm
Попуњеност	100 %
Брзина штампања	10 mm/s
Температура радне плоче	60 °C
Време израде	35 min

Табела 4.1: Преглед параметара штампања при изради ПЛА узорка

На слици 4.18 приказани су резултати мерења транзиционе температуре T_g и промене модула еластичности са температуром. Резултати преузети из [88] су добијени DSC (енг. *Differential Scanning Calorimetry*) и DMA (енг. *Dynamic Mechanical Analysis*) испитивањем. Слика показује да је транзициона температура ПЛА приближно $T_g \approx 60$ °C, при којој долази и до значајног пада модула еластичности.



(а) Мерење T_g ПЛА материјала



(б) Резултати ДМА анализе

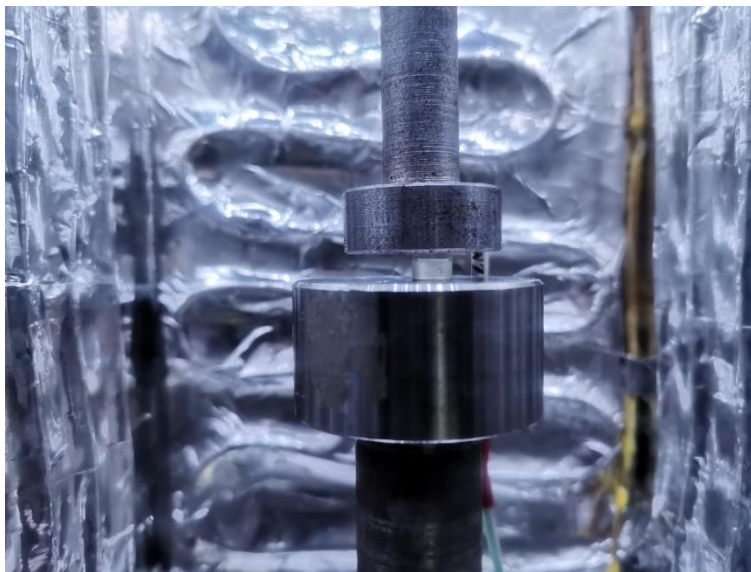
Слика 4.18: Мерења транзиционе температуре и модула еластичности

Узорци од фотополимера израђени су на 3Д штампачу Formlabs Form 2, технологијом стереолитографије. Formlabs Form 2 штампач има радну запремину од 145x145x175 mm и 405 nm UV ласер снаге 250 mW. Коришћен је материјал Formlabs FLGPCL02 фотополимерне смоле, комерцијалног назива Clear. Технологија израде подразумева коришћење једног материјала, од ког су израђени и узорци и потпорне структуре. Приликом израде узорака, штампач наноси фоторезин у слојевима од 25 μm уз ласерски сноп 140 μm . За моделирање и оријентацију модела и потпора коришћен је софтвер Cura. При изради модела водило се рачуна о избору оријентације која укључује што мање потпора. Као оптимална изабрана је оријентација наношења слојева управно на z-осу узорка. Ова чињеница је битна из два разлога:

- постизање јединствених механичких карактеристика током испитивња
- избегавање концентрације микропрлина на деловима узорака са којих се уклањају потпоре након израде

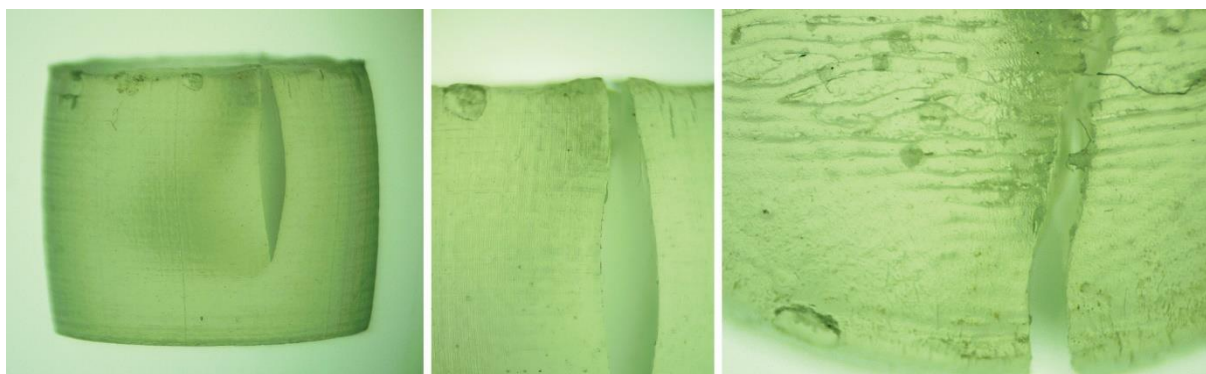


Слика 4.19: Трегирање узорака фотополимера у UV комори



Слика 4.20: Слика узорка у транспарентној комори за испитивање на повишеним температурама

Након израде, сваки од узорака је испран у пропил алкохолу у периоду од 1 сата. Потом се потпори настали при штампању физички укљањају. Узорци се затим постављају под УВ лампу како би очврснули и креирали међувезе. Поступак очвршћавања узорака приказан је на Слици 4.20. Следећи корак је термичко третирање у пећи на начин објашњен при изради ПЛА узорака. Сваки од узорака је након израде остављен у лабораторијским условима најмање 7 дана како би се елиминисали спољашњи утицаји и старење материјала. Поред тога, услед временски захтевних испитивања, а у циљу елиминисања промена у материјалу, при сваком испитивању коришћени су узорци из последње израђене серије. Узорци се након протока овог временског периода испитују у термо-механичким експериментима - изотермичко притискање и експериментима са хлађењем и загревањем. Узорак у комори спреман за испитивање приказан је на Слици 4.20. Испитивања на фотополимерима извршена су у Лабораторији за инжењерски софтвер и динамичка испитивања и Центру за трибологију, оба при Факултету инжењерских наука.



Слика 4.21: Слика узорка под микроскопом након испитивања. Уочава се иницијална прслина при деформацији од $\approx 4\%$. Испитивање извршено у Лабораторији за инжењерски софтвер и динамичка испитивања и Центру за трибологију, Факултет инжењерских наука

4.3.2 Резултати испитивања. Анализа резултата

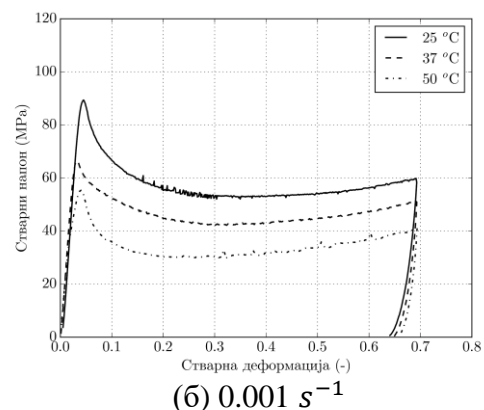
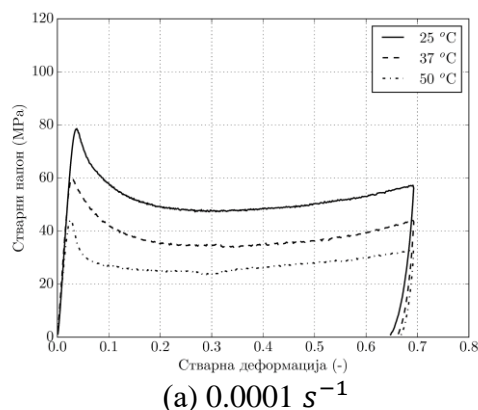
Како је већ објашњено, испитивани материјали, ПЛА и фотополимери показују зависност од температуре испитивања и брзине деформације. При анализи резултата неопходно је узети у обзир појединачно оба фактора. Понашање ПЛА и фотополимера при испитивању на притисак је типично за све термопластике, и састоји се из три карактеристичне фазе:

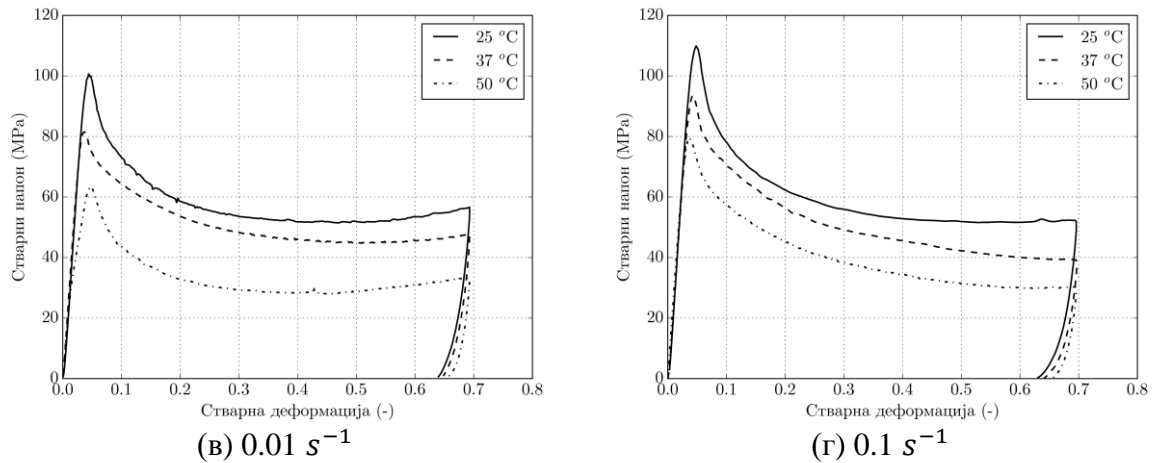
- линеарна еластична
- омекшавање након течења
- ојачавање при великим деформацијама

Код оба материјала при повећању брзине деформације долази до пораста вредности напона течења, док са порастом температуре долази до пада вредности напона течења. Стога, може се закључити да ПЛА и фотополимерни 3Д штампани узорци показују јасну зависност од брзине деформације при квази-статичким брзинама деформације. Закључак које се може донети је да температурно-брзинска зависност добијених вредности напона потиче од природе основних материјала.

На Слици 4.22 приказане су криве течења за ПЛА при брзинама деформације 0.0001 s^{-1} , 0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} и температурама $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $37 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$. На слици се јасно виде одлика чврсте фазе:

- криве течења имају јасно дефинисану тачку течења, праћену деформационим омекшавањем, и коначним деформационим ојачањем материјала при великим деформацијама услед ограничене истељивости полимерних ланаца
- након растерећења приближно 4% је реверзибилно
- повећавање температуре при истој брзини деформације доводи до пада вредности напона течења, као и напона у области деформационог ојачања
- уочава се извесна правилност у распореду напона, сем мањих мерних одступања за температуре $37 \text{ }^\circ\text{C}$
- нема пресецања кривих течења

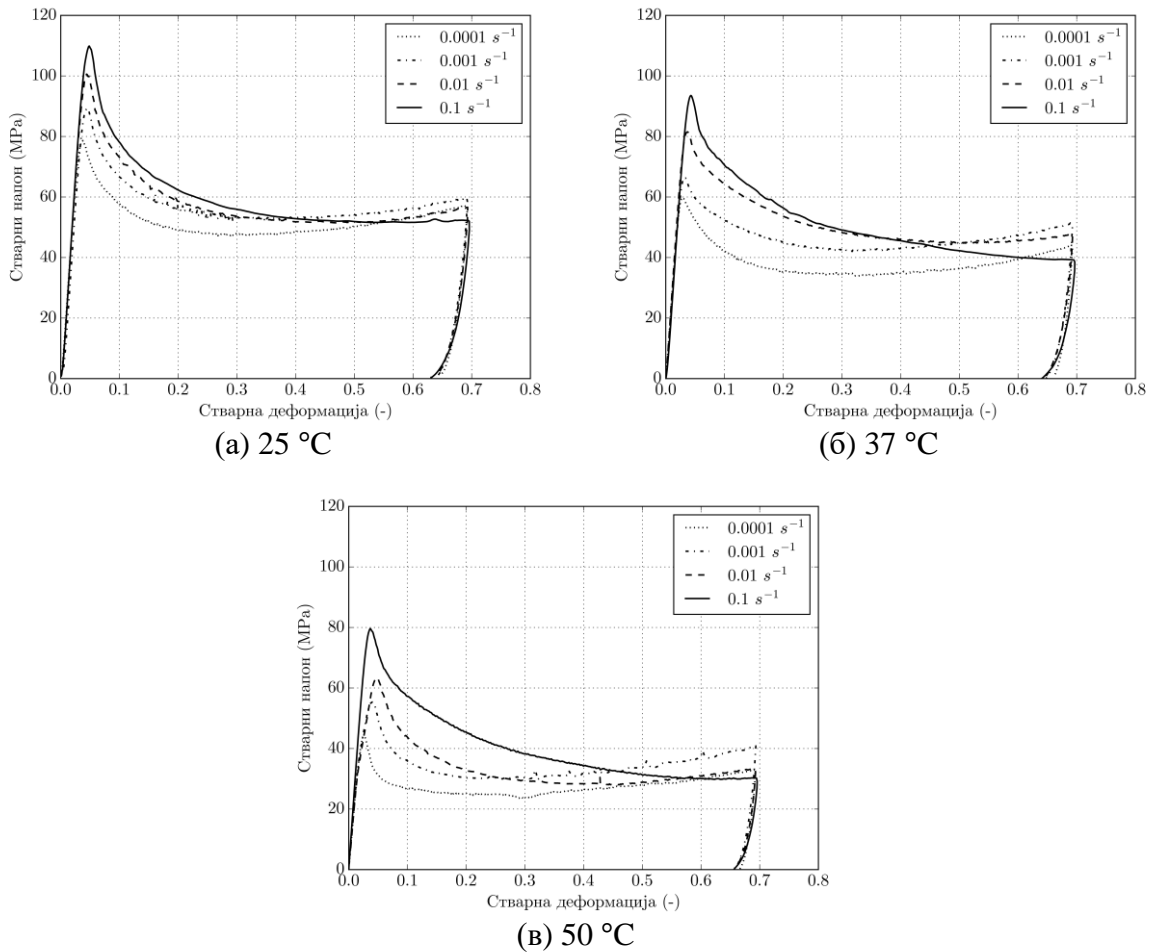




Слика 4.22: Криве напон-деформација ПЛА при брзинама деформације 0.0001 s^{-1} , 0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1}

Анализа истих кривих течења груписаних према температури испитивања даје нешто другачију слику феномена који се у материјалу одиграва. На Слици 4.23 приказане су криве течења за 25 °C , 37 °C , 50 °C и брзине деформације 0.0001 s^{-1} , 0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} . Карактеристике које су на кривим течења уочавају су:

- криве течења имају јасно изражену тачку течења попут кривих груписаних према брзинама деформације
- након растерећења приближно 4% је реверзибилно
- долази до пресецања кривих течења, услед пада напона при брзинама деформације 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} , при деформацији ≈ 0.4 . Пад напона је последица унутрашњег загревања изразито термо-осетљивог материјала

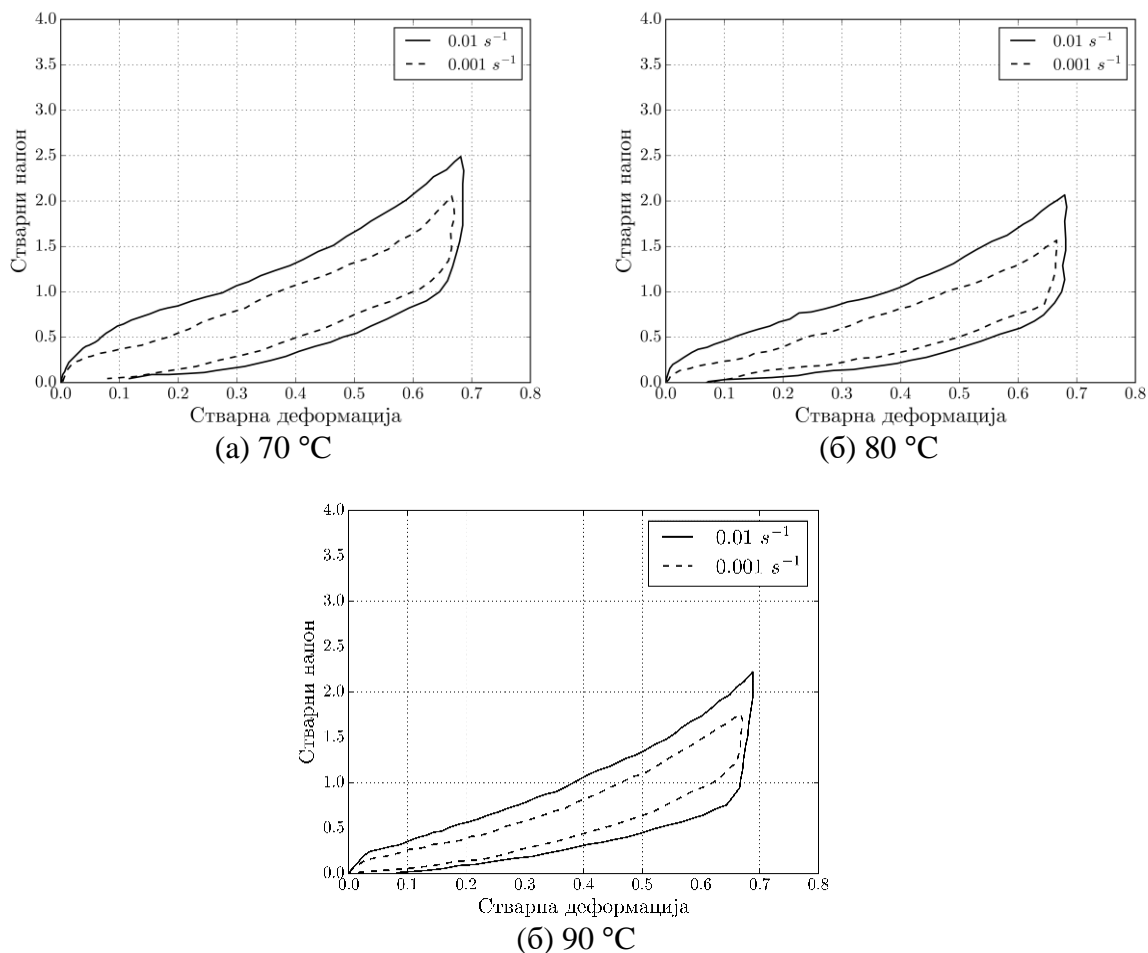


Слика 4.23: Криве напон-деформација ПЛА на температурама 25 °C, 37 °C, 50 °C

Како ПЛА поседује веома изражено својство памћења облика, неопходно је било извршити карактеризацију и у областима температура далеко изнад T_g . Због стабилности процеса коришћене су три температуре 70 °C, 80 °C и 90 °C и две брзине деформације $0.001 s^{-1}$ и $0.01 s^{-1}$. Резултати испитивања приказани су на Слици 4.24. За разлику од испитивања при температурама нижим од T_g уочавамо следеће:

- материјал поприма понашање еластомера или гуме
- у зони након почетне јачине материјала нема јасно изражене тачке течења
- чврстоћа материјала пада више десетина пута
- након растерећења у материјалу готово да нема заосталих нееластичних деформација

Од посебне је важности ова последња карактеристика материјала. Како се види са Слике 4.24в при температури далеко вишој од T_g приликом растерећења готово да нема трајних деформација. Ово је од кључне важности за даљу анализу и показује јасну одлику материјала са својством памћења облика. Осим тога, материјали показују благу зависност од температуре али и зависност од брзине. Обе величине су значајно ниже и мање изражене у односу на понашање полимера у чврстој фази.



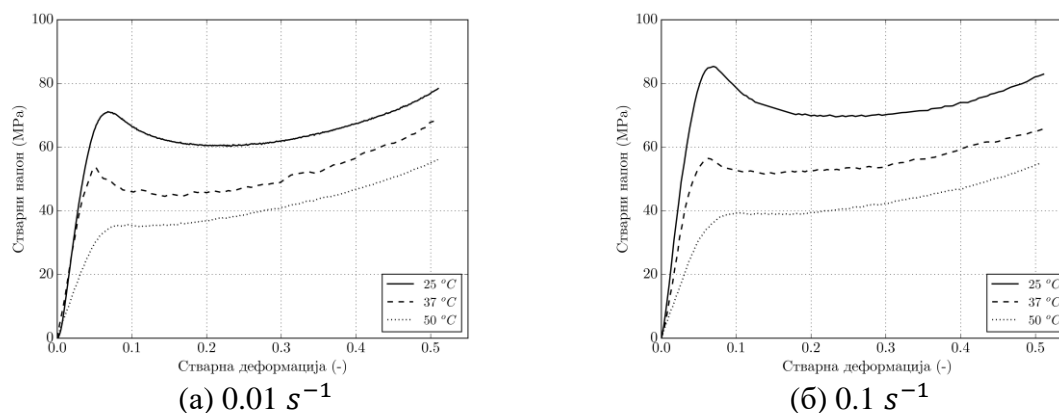
Слика 4.24: Криве напон-деформација ПЛА при брзинама деформације 0.001 s^{-1} и 0.01 s^{-1} на температурама $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$, $90 \text{ }^\circ\text{C}$

Напомена: Иако је то првобитно било планирано, није остварена потпуна термо-механичка карактеризација ПЛА материјала. При мерењима на вишим температурама при брзинама деформације 0.0001 s^{-1} и 0.1 s^{-1} уочене су значајне неправилности. При брзини 0.0001 s^{-1} вредности резултата су били готово нечитљиви због мерног опсега давача у мерном систему. Са друге стране, при брзини 0.1 s^{-1} резултати су значајно дивергирали. У оба случаја резултати нису узети у обзир приликом даље анализе.

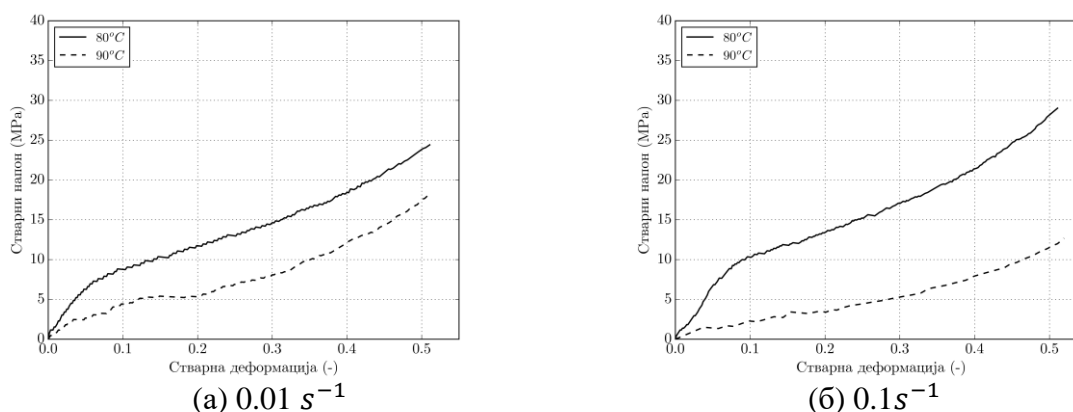
Код резултата фотополимера приказаних на Слици 4.24, за температуре ниже од транзиционе, материјал има природу еласто-пластичног материјала са јасно израженим зонама течења, омекшавања и ојачавања при великим деформацијама. На Сликама 4.25 и 4.26се уочавају одлике фотополимера по фазама:

- криве напон-деформација показују јасно дефинисану тачку течења, значајно изражену при собној температури, праћену омекшавањем, и коначним ојачањем материјала при великим деформацијама услед ограничене истегљивости полимерних ланаца
- већ на температурама од $37 \text{ }^\circ\text{C}$ и $50 \text{ }^\circ\text{C}$ механичке карактеристике се значајно мењају, вредност напона течења практично нестаје, и напон течења пада готово двоструко са приближавањем T_g

- при растерећењу након притиска до деформацијама које достижу 50% око 4% деформације се враћа и та вредност је константна при испитивању за узорке у чврстој фази испитивања
- материјал у мекој фази показује одсуство трајних деформација



Слика 4.25: Криве напон-деформација фотополимера при брзинама деформације 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} ; на температурама и $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $37 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$



Слика 4.26: Криве напон-деформација фотополимера при брзинама деформације 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} ; на температурама и $80 \text{ }^\circ\text{C}$ $90 \text{ }^\circ\text{C}$

Напомена: очитани резултати представљају граничну вредност за посматрани материјал. При преласку границе од 40% деформације долази, зависно од узорка, до пуцања или ламинације 4.21. Криве приказане на Сликама 4.25 и 4.26 дате су груписане према брзини деформације и без дела криве са растерећењем, које није било могуће снимити. Ипак каснија експериментална верификација показала је да материјал поседује ефекат памћења облика.

4.4 Израда и експериментално испитивање композита ојачаних влакнима од ПЛА применом 3Д штампе

У овом поглављу дат је кратак преглед експерименталних и нумеричких резултата за композите ојачане флуорокарбонским влакнима израђене од ПЛА материјала применом 3Д штампе. Резултати су публиковани у [81].

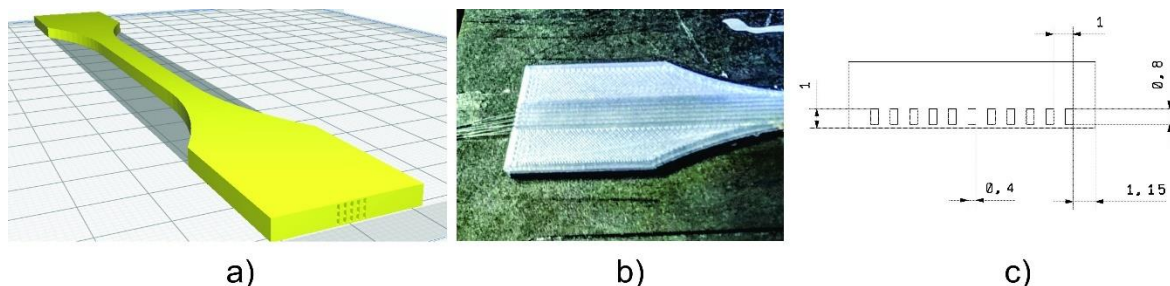
4.4.1 Експеримент

Као основни материјал композитне матрице коришћен је ПЛА док су као ојачање коришћена влакна флуорокарбона пречника 0.145 mm. Узорци су израђени применом технологије депоновања слојева. За израду је коришћен штампач Wanhao Designer i3 Plus. Сви узорци су израђени у Центру за информационе технологије. Експериментална испитивања су обављена у Центру за трибологију.

При изради 3Д штампаних композита треба водити рачуна од два фактора:

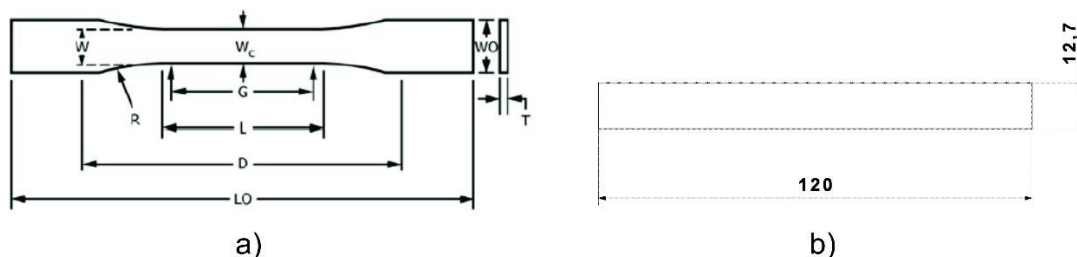
- оријентацији основног материјала
- изради канала за полагање влакана

Модел узорка приказани су на Слици 4.27. Коришћени су стандардни параметри 3Д штампе за ПЛА материјал. Примењене су две оријентације основног материјала матрице - $[0^\circ, 90^\circ]$ и $[-45^\circ, +45^\circ]$. Транзиционе температуре два материјала се значајно разликују (58°C и -35°C) па не долази до утицаја ПЛА материјала на механичке карактеристике влакана приликом затпања. Израђени су узорци за испитивање затезањем и савијањем у три тачке.



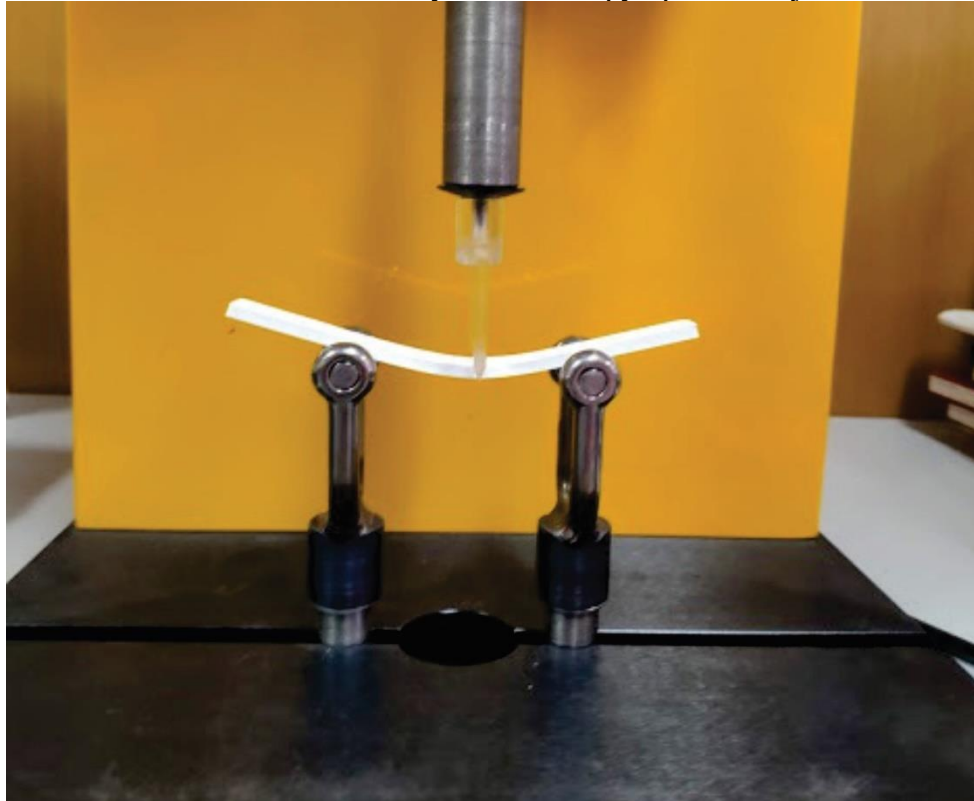
Слика 4.27: Процедура израде узорка - CAD модел са каналима за влакна (слика лево), положена влакна (средња слика), попречни пресек епрувете (слика десно).}

Модел за штампу чине 34 слоја. Током израде, путем кода је заустављана израда на слојевима 11, 21, 31 ради додавања влакана. Влакна су претходно премазана танким слојем лепка ради бољег пријањања. Узорци за испитивање приказани на слици 4.28.



Слика 4.28: Узорци за испитивање затезањем (лево) и савијањем у три тачке (десно). Узорци израђени у складу са ASTM D638 и ASTM D790 стандардом.

Једноосно испитивање затезањем изведено је на Shimadzu сервопулзеру брзином испитивања 1 mm/min. Према стандарду треба обезбедити лом узорка између 30 s и 5 min од почетка испитивања. Испитивани су штампани композитни узорци и штампани узорци од чистог ПЛА. Сва испитивања су поновљена 2 пута. Испитивање савијањем у три тачке изведено на СТ3 Texture Analyzer индентеру приказано је на Слици 4.29.



Слика 4.29: Испитивање савијањем у три тачке

4.4.2 Нумеричка анализа

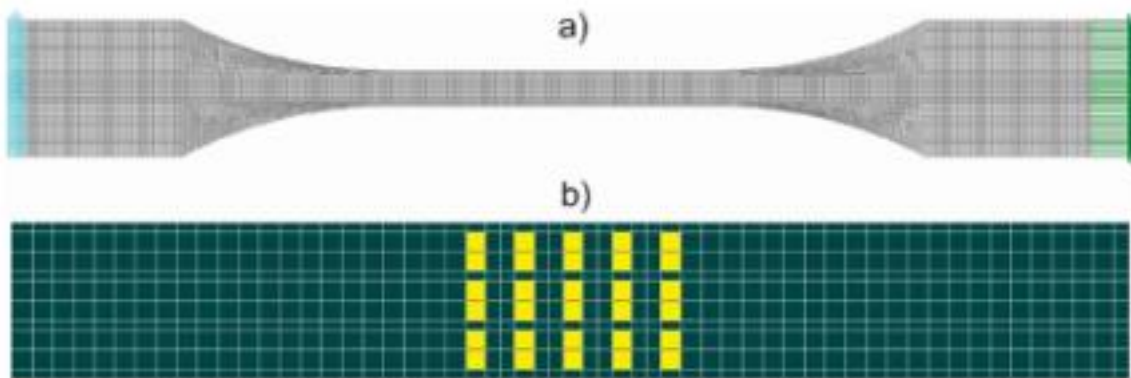
За нумеричку анализу испитивања затезањем коришћене су две методе:

- Мори-Танака метода хомогенизације
- метод коначних елемената

Мори-Танака метода се примењује код хомогенизације композита и одређивање ефективних модула еластичности, Поасоновог коефицијента и запреминског удела влакана. Модул ојачања дат је изразом:

$$H = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (4.15)$$

У нумеричкој симулацији је коришћен материјални модел представљен у Поглављу 5. Нумеричке симулације су примењене за композитни узорак са оријентацијом израде [-45°, +45°]. У симулацији су померања задата према експерименталним мерењима. Модели узорака коришћени у нумеричкој симулацији приказани су на Слици 4.30.



Слика 4.30: Узорци за нумеричку симулацију затезања: гранични услови (горе) и финија мрежа попречног пресека (доле)

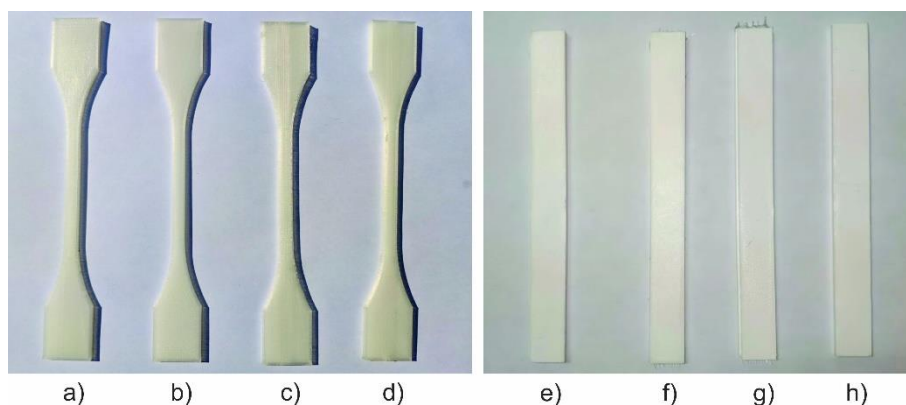
Узорак	Модул еластичности (GPa)	Затезна чврстоћа (MPa)	Напон течења (MPa)	Деформација лома (%)
$[-45^\circ, +45^\circ]$ неојачана	1.2	38	25	5.07
$[-45^\circ, +45^\circ]$ ојачана	1.26	38.5	29	6.43
$[0^\circ, 90^\circ]$ неојачана	0.97	39.6	15	4.35
$[0^\circ, 90^\circ]$ ојачана	1.19	37	24	4.1

Табела 4.2: Материјални параметри ПЛА

У нумеричкој симулацији су коришћена два приступа:

- хомогенизовани композит
- композит са два материјала

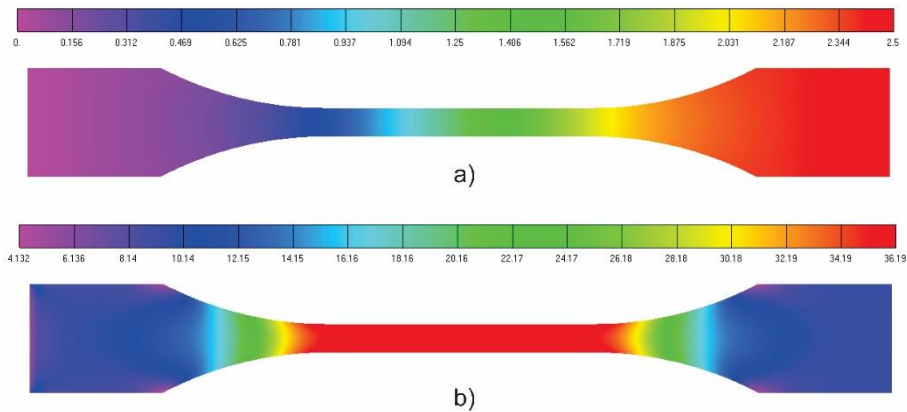
Модел хомогенизованог композита се састоји од 3080 осмочворних елемената. Код модела са два материјала због геометрије влакана неопходна је ситнија мрежа што је значајно увећало број елемената. Модел се састоји из 171800 елемената. Померања добијена експериментом задата су чворовима на једној страни модела. Примењена су иста ограничења као моделу хомогенизованог композита. У симулацијама савијања у три тачке код хомогенизованог модела коришћено је 43680 елемената, док је модел са два материјала моделиран са 57480 елемената. Узорци израђени 3Д штампом приказани су на Слици 4.31.



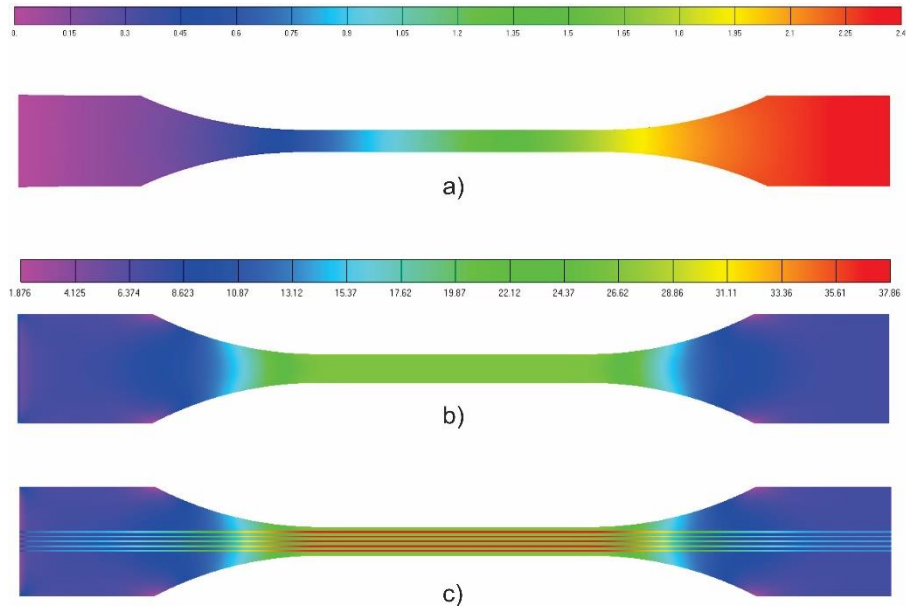
Слика 4.31: Израђени узорци за испитивање затезањем (лево) и савијање у три тачке (десно).

4.4.3 Резултати и анализа

Порозност настала као последица 3Д штампе утиче на механичке карактеристике композита, јер доводе до концентрације напона и појаве лома. Код узорака за испитивање постоји зазор између влакана и зидова канала, чиме је смањена површина попречног пресека. Резултати анализе приказани су на Слици 4.32 за хомогенизовани узорак, и на Слици 4.34 за узорак са два материјала.

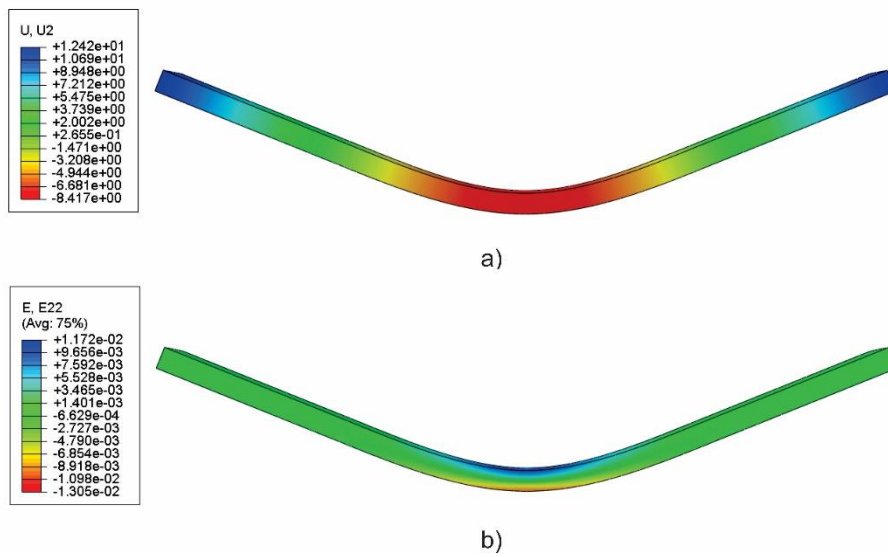


Слика 4.32: Дистрибуција померања (горе) и напона (доле) у хомогенизованом моделу за узорак са оријентацијом $[-45^\circ, +45^\circ]$



Слика 4.33: Померања и напони за модел са два материјала, за композит са оријентацијом $[-45^\circ, +45^\circ]$, померања (горе), напони (у средини), напони у попречном пресеку (доле)

На Слици 4.34 приказани су резултати симулације савијања хомогенизованог узорка оријентације $[0^\circ, 90^\circ]$ у три тачке.



Слика 4.34: Померања и деформације за композитни хомогенизовани узорак

Поглавље 5

5 Материјални модел полимера са памћењем облика

5.1 Карактеристике полимера са својством памћења облика

Полимери са памћењем облика су нова класа напредних материјала која се увелико истражује и то поље се развија убрзано на два колосека, кроз развој нових материјала и развој адитивних технологија. Како је већ споменуто у уводним разматрањима, полимерни материјали са памћењем облика присутни су већ 40 година. Иако се мисли да је реч о скупим и тешко доступним материјалима, сама чињеница да је најобичнија навлака за ускршња јаја, заправо термо-активирајући полимер са памћењем облика, оповргава такво размишљање. Једна од првих примена ових материјала биле су термо-скупљајуће тубе [149], или бужири какви се данас користе у електро радовима. Заинтересованост за полимере са памћењем облика нагло порасла са развојем 3Д штампе, када до тад непознати материјали постају доступнији широком аудиторијуму. Праву револуцију представља новонастали термин, 4Д штампање, који описује комбинацију једноставност и приступачност адитивних технологија и својства материјала да обнављају облик. 4Д штампање се често дефинише и као временски зависно 3Д штампање. Треба напоменути да овде, када није другачије напоменуто, говоримо о термо-активирајућим полимерима са памћењем облика. Ова група је најдоступнија и најјефтинија, што потврђује чињеница да је ПЛА потпуно природан материјал који се добија из скроба и житарица. Треба напоменути да поред јефтиних и лако доступних, постоје и изузетно напредни системи и материјали 4Д штампе, који могу да коштају и више стотина хиљада долара и махом су предмет истраживања у институтима [23].

У оквиру истраживања анализирана су два материјала, ПЛА и фотополимери, чије су карактеристике експериментално испитане и приказане у Поглављу 4. Иако су битно различитих механичких својстава заједничко им је да се могу користити у адитивним технологијама и својство памћења облика. Поред тога, увидом у експерименталн резултате уочавамо неколико битних карактеристика полимера са својством памћења облика:

- имају јасно изражену границу транзиције између меке и чврсте фазе, транзициону температуру T_g
- иако се теоретски при температурама далеким од транзиционе границе могу сматрати изразито чврстим или изразито меким, ближе истини је да су они попут полу-кристалних материјала, мешавина удела две фазе
- на нижим температурама од T_g , имају изражено термо-еласто-вископластично понашање - јасно изражен еластични реверзибилни део, тачку течења праћену деформационим омекшањем, и коначно деформационо ојачање због

преоријентације ланаца у правцу деформисања. Након растерећења у материјалу остају трајне деформације.

- на вишим температурама од T_g , материјал се понаша најближе еластомеру или гуми, нестаје јасан еластични регион, тачка течења нестаје, а материјал са порастом температуре показује све израженији хистерезис, готово без трајних деформација

У погледу добијених експерименталних резултата две су битне напомене:

- криве растерећења код фотополимера није било могуће снимити због природе мерног система. Ипак, материјал има експериментално потврђено својство памћења облика
- иако је првобитно било планирано, криве за брзине деформације 0.1 s^{-1} и 0.0001 s^{-1} нису снимљене такође због ограничења која су током мерења примећена. При брзини деформације 0.0001 s^{-1} вредности које су се добијале биле су готово нечитљиве и одбачене су као непоуздане, а код 0.1 s^{-1} брзина процеса и велика температура изазвале су велику дисперзију очитаних вредности па су и ови резултати одбачени као непоуздани

Полимери са памћењем облика осим стандардних, већ спроведених тестова, испитују се и у термо-механичким циклусима:

- загревањем преко T_g и деформисањем до одређене границе деформације
- задржавањем ограничења у току хлађења материјала врши се тзв. фиксација облика, материјал након хлађења поприма деформисани - привремени облик
- загревањем долази док активације ефекта памћења облика, и материјал показује тенденцију да се врати у првобитни - почетни облик. Овај део тестирања могле је обавити на два начина: слободном и спреченом обновом облика

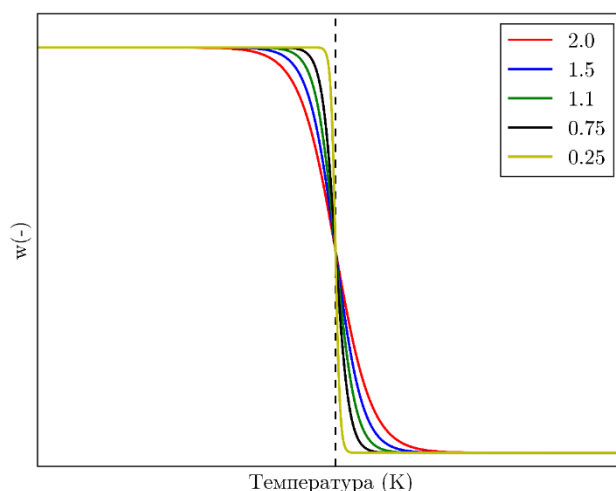
Код дефинисања модела треба нагласити да постоје три групе променљивих:

- константе $V, \lambda_{LB}, \mu_C, \lambda_{LC}$
- променљиве које имају константне вредности за сваку од фаза материјала - A, v, α_g, τ_B
- променљиве чија се вредност мења и у оквиру фазе - $E, \mu_A, \mu_B, h_0, h_1, h_2, \xi_y, \xi_s$

Вредности променљивих које имају константну вредност у оквиру фазе одређујемо правилом мешања. Користимо модификовану функцију мешања дату у [116,132]:

$$f_r = \frac{1}{1 + \exp(-(T - T_g)/w)} \quad (5.1)$$

којом се дефинише удео меке фазе у вредности параметра. У горњој једначини T и T_g су текућа, односно транзициона температура материјала, док је w параметар ширине транзиције између фаза. Утицај параметра ширине транзиционе зоне w у једначини (5.1) приказана је на Слици 5.1.



Слика 5.1: Утицај параметра ширине транзиције на функцију мешања

Користећи горњу релацију долазимо до опште релације за правило мешања:

$$x = x_g(1 - f_r) + x_r f_r \quad (5.2)$$

која даје вредност посматраног параметра у зависности од фазног удела. x_g и x_r су вредности посматраног параметра у чврстој, односно мекој фази.

5.2 Конститутивни модел

У овом одељку приказан је термо-еласто-вископластични материјални модел којим се описује термо-механичко понашање у експериментима на паметним полимерним материјалима. Према особинама материјала уочених током испитивања, конципиран је модел који има за циљ моделирање понашања материјала за све температуре и брзине деформације коришћене у оквиру експерименталних испитивања. Модел је имплементиран у имплицитном облику у програме засноване на методи коначних елемената PAK-Multiphysics [29] и ABAQUS [30].

Конститутивни модел је базиран на кинематици великих деформација на основу раније представљених модела [150–155]. Намена модела је одређивање понашања полимерних материјала у зависности од температуре и брзине деформације. Модел се састоји од три микромеханизма. Гране А и В микромеханизма, чине нелинеарне еластичне опруге и вископластичне пригушнице дефинисане одвојеним групама параметара. Грану микромеханизма С чини нелинеарна опруга са параметрима који одређују зависност од температуре. Шематски приказ реолошког 1D модела дат је на Слици 5.2 Са слике се може видети да се модел састоји од три паралелно везана микромеханизма које имају заједнички градијент деформације \mathbf{F} .

Пре детаљног излагања теоријских релација и извођења формула конститутивног модела треба у неколико црта дати образложење предложеног модела:

- модели са више паралелних микромеханизма постали су стандард у моделирању полимерних материјала. У зависности од природе материјала коришћењем различитих параметара, као и еластичних и хипереластичних модела, могуће је

направити хибридни модел који може да да изврсне резултате у моделирању сложених процеса течења и ојачања у полимерима. У оквиру модела је на основу ранијих истраживања приказаних у прегледу литературе, предложен модел са три микромеханизма. Основни циљ је био наћи компромис између ефикасности, тачности и побољшања у односу на до сад предложена решења. Коришћењем концепта унутрашњих напонских променљивих којима се описује течење и растерећење материјала постиже се изврсна тачност у моделирању ове две појаве у полимерима. Број унутрашњих променљивих стања је смањен у односу радове дате у прегледу литературе, уз задржавање општег концепта и тачности. У оквиру модела предложене су модификоване функције промене модула еластичности услов течења са температуром које дају одличне резултате.

- до сада нико није користио модификовани Аруда-Бојс хипереластични модел у моделима са више грана. У односу на основни модел који има пет материјалних параметара модификовани модел има само два материјална параметра (три уколико се укључи запремински део). При томе, табеларни приказ у [32] показује да Аруда-Бојс представља хипереластични модел за који је потребно најмање експерименталних мерења за верификацију уз највећу тачност међу хипереластичним моделима. Поред редукованог броја параметара ово је још једна предност овог модела у односу на раније коришћене Нео-Хук, Гент, Јио и немодификовани Аруда-Бојс модел.
- по угледу на неке раније моделе [123], овај модел представља општи концепт који се може користити за било који, пре свега полимерни материјал. Како ће бити објашњено, у случајевима када тачност модела у зони течења није од кључне важности, или сам процес течења није превише сложен могуће је додатно поједноставити модел искључивањем променљивих стања течења, заменити функцију течења једноставнијом релацијом или чак занемарити напоне из неког од хипереластичних микромеханизма и тиме додатно поједноставити модел уз задржавање одговарајуће тачности.
- сви материјали поседују коефицијент ширења, у већој или мањој мери, али како се наводи у [132], само термичка експанзија није довољна да опише велике промене структуре материјала са променом температуре код паметних полимера. Зато је свака од коришћених променљивих посебно дефинисана у зависности од температуре и/или брзине деформације.

Параметри модела коришћени у моделу уз објашњења дати су у Табели 5.1.

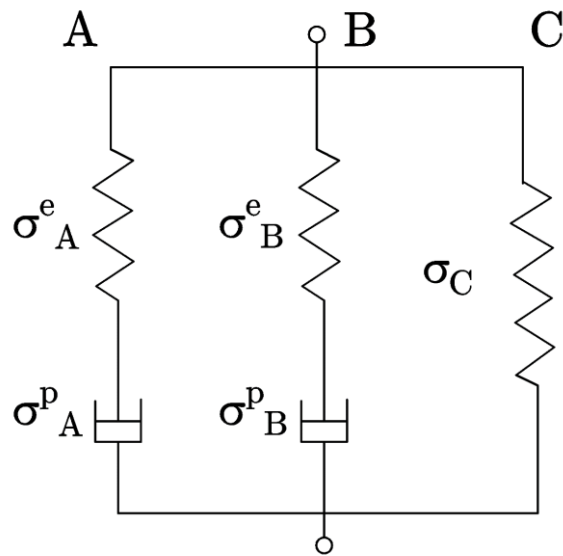
Параметар	Вредност
E_1 (МПа)	модул еластичности на почетку температурног опсега
E_2 (МПа)	модул еластичности на температури непосредно пре T_g
E_3 (МПа)	модул еластичности на температури непосредно иза T_g
E_4 (МПа)	модул еластичности на крају температурног опсега
T_1 (МПа)	почетна температура
T_g (К)	транзициона температура
T_h (К)	крајња температура
k_1 (-)	статистички коефицијент кидања ланаца
k_2 (-)	статистички коефицијент кидања ланаца
k_3 (-)	статистички коефицијент кидања ланаца
v_g (-)	Поасонов коефицијент у чврстој фази
v_r (-)	Поасонов коефицијента у мекој фази

A_g (kJ/mol)	активациони параметар у чврстој фази
A_r (kJ/mol)	активациони параметар у мекој фази
ζ (-)	коэффицијент гомилања дефеката
b (K)	нагиб промене коэффицијента ζ мекој фази
γ_0 (s ⁻¹)	брзинска константа
w (-)	ширина транзиционе зоне
α_p	осетљивост на притисак
V	активациона запремина
m_A (-)	брзинска осетљивост микромеханизма А
h_{0g} (МПа)	ојачање напона течења у чврстој фази
h_{0r} (МПа)	ојачање напона течења у мекој фази
h_{1g} (МПа)	слабљење напона течења у чврстој фази
h_{1r} (МПа)	слабљење напона течења у мекој фази
h_{2g} (МПа)	фактор ојачања унутрашње променљиве ξ_2 у чврстој фази
h_{2r} (МПа)	фактор ојачања унутрашње променљиве ξ_2 у мекој фази
l_g (МПаК ⁻¹)	нагиб промене ојачања унутрашње променљиве ξ_2 у чврстој фази
l_r (МПаК ⁻¹)	нагиб промене ојачања унутрашње променљиве ξ_2 у мекој фази
c (-)	коэффицијент промене унутрашње променљиве ξ_2
ξ_{sg} (МПа)	граница омекшавања унутрашње променљиве ξ_1 у чврстој фази
ξ_{sr} (МПа)	граница омекшавања унутрашње променљиве ξ_1 у мекој фази
n_g (МПаК ⁻¹)	нагиб промене границе омекшавања у чврстој фази
n_r (МПаК ⁻¹)	нагиб промене границе омекшавања у мекој фази
ξ_{yg} (МПа)	вредност напона течења за унутрашњу променљиву ξ_1 у чврстој фази
ξ_{yr} (МПа)	вредност напона течења за унутрашњу променљиву ξ_1 у мекој фази
s_g (МПаК ⁻¹)	нагиб промене ξ_{yg} у чврстој фази
s_r (МПаК ⁻¹)	нагиб промене ξ_{yr} у мекој фази
μ_{B0} (МПа)	модул смицања микромеханизма В
λ_{LB} (-)	гранично истезање ланаца микромеханизма В
\hat{t}_{Bg} (МПа)	гранични напон микромеханизма В у чврстој фази
\hat{t}_{Br} (МПа)	гранични напон микромеханизма В у мекој фази
a_B (МПаК ⁻¹)	температурна осетљивост модула смицања μ_B
m_B (-)	брзинска осетљивост микромеханизма В
μ_C (МПа)	модул смицања микромеханизма С
λ_{LC} (-)	гранично истезање ланаца микромеханизма С

Табела 5.1: Табела материјалних параметара предложеног модела

Применом мултипликативне декомпозиције тензора градијента деформације \mathbf{F} , раздвајамо еластичну и пластичну деформацију [156]. Примена пластичног градијента деформације \mathbf{F}^p на недеформисани елемент материјала мапира се из референтне конфигурације у еластичну растерећену међуконфигурацију. Коначно, компатибилност се постиже мапирањем материјала елемента из у тренутну конфигурацију помоћу еластичног градијента деформације. Мултипликативна декомпозиција дата је изразом:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \mathbf{F}^p \quad (5.3)$$



Слика 5.2: Реолошки 1Д приказ модела

На основу унутрашњих променљивих и дефинисаних релација за брзину прираштаја пластичне деформације, израчунава се појединачно напон за сваку од грана. Укупни напон представља збир напона свих микромеханизма. Према Слици 5.2 важи:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p = \mathbf{F}_B^e \mathbf{F}_B^p = \mathbf{F}_C \quad (5.4)$$

Овде треба објаснити улогу сваког од микромеханизма у понашању материјала:

- микромеханизам А - састоји се од нелинеарне опруге и пригушнице. Нелинеарном опругом моделира се макроскопско еластично понашање материјала у почетној фази деформације која потиче од снажних међумолекуларних веза. Пригушница чији параметри зависе од температуре и брзине деформације, описује термо-зависно пластично течење услед смицања ланчаних сегмената међувеза у материјалу
- микромеханизам В - састоји се од нелинеарне хипереластичне опруге и пригушнице. Опругом се моделира понашање издужења ланаца између међувеза полимера. Услови пластичности дефинисани су у зависности од температуре и брзине деформације једноставном степеном релацијом. Ипак, постављањем границе течења довољно великом у области ниских температура, и наглим обарањем ове вредности при преласку транзиционе температуре, симулира се губљење и нестанак механичких међувеза у полимеру на високим температурама. На неки начин, улога ове гране је чисто теоријска, и у коначном она има готово безначајан утицај на свеукупно понашање материјала
- микромеханизам С - слично као и претходни, састоји се од нелинеарне опруге али без пластичности. Ова грана даје напон који је последица ентропијског ојачања материјала, при великим деформацијама, када материјал додатно ојачава због преоријентације ланчаних сегмената. Како је понашање полимера при великим деформацијама изразито нелинеарно овај микромеханизам има велику улогу у тачности симулације.

Треба разјаснити неколико раније поменутих термина:

- пластичност - иако у свим формулама кроз индекс p , фигурише израз пластичност, у случају полимера са својством памћења облика, не може се говорити о класичној пластичној деформацији која је по теорији иреверзибилна. Правилнији термин био би нееластичност или нееластична деформација, јер се показује да при термо-активацији ова деформација нестаје и да није трајна појава у материјалу. Ипак ради лакше нотације и без детаљних теоријских разјашњења задржавамо ознаку p уз напомену да се у овом случају односи на нееластичну деформацију.
- полимери са својством памћења облика - израз који одговара нешто једноставнијој конструкцији у енглеском језику Shape Memory Polymers, у оквиру рада се због дужине израза користе и термини паметни полимери и полимери са памћењем уз напомену да се увек односе на исти материјал дефинисан насловом теме.

5.2.1 Слободна енергија

Према реолошком моделу датом на Слици 5.2 могуће је укупну слободну енергију ψ записати у облику:

$$\psi = \psi_A + \psi_B + \psi_C \quad (5.5)$$

где су ψ_A , ψ_B и ψ_C слободне енергије микромеханизма А, В и С.

5.2.2 Конститутивне релације микромеханизма А

Према општим релацијама изложеним у Поглављу 3 могуће је дати функцију градијента деформације која пресликава материјалну тачку из почетног положаја \mathbf{X} у тренутни положај \mathbf{x} :

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} \quad (5.6)$$

На почетку анализе термопластичног материјала сматрамо конфигурацију недеформисаном, уз случајно оријентисане молекуларне ланце полимера. На основу Слике 5.2 сматра се да сваки од микромеханизма дели исти градијент деформације па се може писати:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F} \quad (5.7)$$

Даље је коришћењем мултипликативне декомпозиције [156] могуће градијент деформације представити еластичним и пластичним делом:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p \quad (5.8)$$

Израз за градијент пластичне деформације \mathbf{F}_A^p у једначини (5.8) представља функцију пресликавања материјалне тачке из референте у растерећену конфигурацију. Применом поларне декомпозиције могуће је градијент деформације представити тензором издужења и ротације:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{R}_A \mathbf{U}_A = \mathbf{v}_A \mathbf{R}_A \quad (5.9)$$

где је \mathbf{R}_A тензор ротације, а \mathbf{U}_A и \mathbf{v}_A а десни и леви тензори издужења. Брзина деформације дата градијентом брзине \mathbf{L} :

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_A = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.10)$$

Даље, веза градијента деформације и градијента брзине дата је у облику:

$$\mathbf{L}_A = \dot{\mathbf{F}}_A (\mathbf{F}_A)^{-1} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{L}_A = \mathbf{L}_A^e + \mathbf{F}_A^e \mathbf{L}_A^p (\mathbf{F}_A^e)^{-1} \quad (5.12)$$

где је:

$$\mathbf{L}_A^p = \dot{\mathbf{F}}_A^p (\mathbf{F}_A^p)^{-1} = \mathbf{D}_A^p + \mathbf{W}_A^p \quad (5.13)$$

Величине \mathbf{D}_A^p и \mathbf{W}_A^p су симетрични тензор брзине пластичне деформације и косо симетрични тензор спина. Претпоставка је да пластични део нема ротацију па важи $\mathbf{W}_A^p = 0$. Одатле је једначина промене пластичног градијента деформације:

$$\mathbf{D}_A^p = \dot{\mathbf{F}}_A^p (\mathbf{F}_A^p)^{-1} \quad (5.14)$$

$$\dot{\mathbf{F}}_A^p = \mathbf{D}_A^p \mathbf{F}_A^p \quad (5.15)$$

Интеграцијом једначине (5.15) израчунава се \mathbf{F}_A^p , док је еластични део градијента:

$$\mathbf{F}_A^e = \mathbf{F}_A (\mathbf{F}_A^p)^{-1} \quad (5.16)$$

Коришћењем пластичног градијента еластични градијент добијамо у облику:

$$\mathbf{F}_A^e = \mathbf{F} (\mathbf{F}_A^p)^{-1} \quad (5.17)$$

Поларна декомпозиција еластичног и пластичног дела градијента деформације микромеханизма А даје:

$$\mathbf{F}_A^p = \mathbf{v}_A^p \mathbf{R}_A^p = \mathbf{R}_A^p \mathbf{U}_A^p \quad (5.18)$$

и:

$$\mathbf{F}_A^e = \mathbf{v}_A^e \mathbf{R}_A^e = \mathbf{R}_A^e \mathbf{U}_A^e \quad (5.19)$$

где \mathbf{R} представља тензор ротације, а \mathbf{U} и \mathbf{v} , десни, односно леви тензор издужења, док индекси е и р означавају еластични и пластични део одговарајућих тензора деформације. Полазећи од левог Коши-Гриновог тензора деформације:

$$\mathbf{b}_A^e = \mathbf{F}_A^e (\mathbf{F}_A^e)^T \quad (5.20)$$

Тензор \mathbf{b}_A^e у спектралном облику дат је једначином:

$$\mathbf{b}_A^e = \sum_{i=1}^3 (\lambda_i^e)^2 \mathbf{e}_i^e \otimes \mathbf{e}_i^e \quad (5.21)$$

где су \mathbf{e}_i^e сопствени вектори тензора \mathbf{b}_A^e и \mathbf{v}_A^e , а λ_i^e су позитивне сопствене вредности \mathbf{v}_A^e . Слободна енергија ψ_A дата је у функцији издужења левог Коши-Грин тензора и температуре:

$$\psi_A = \psi_A(\mathbf{b}_A^e, T) \quad (5.22)$$

Слободна енергија ψ_A дата је у функцији издужења у главним правцима и температуре:

$$\psi_A = \psi_A(\lambda_1^e, \lambda_2^e, \lambda_3^e, T) \quad (5.23)$$

Еластична логаритамска деформација дата је у облику:

$$\mathbf{E}_A^e = \ln \mathbf{v}_A^e = \sum_{i=1}^3 E_i^e \mathbf{e}_i^e \otimes \mathbf{e}_i^e \quad (5.24)$$

где је:

$$E_i^e = \ln \lambda_i^e \quad (5.25)$$

мера еластичне логаритамске деформације. При дефинисању понашања материјала за функцију слободне енергије микромеханизма А користимо функцију слободне енергије за велике еластичне деформације [157,158]. Ова функција представља уопштени облик класичне функције деформационе енергије инфинитезималне изотропне еластичности уз коришћење великих деформација:

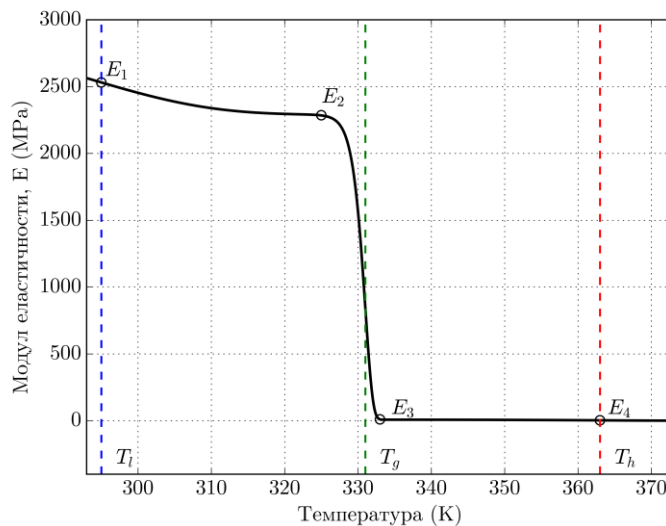
$$\psi_A = \mu_A |\mathbf{E}_A^e|^2 + \frac{1}{2} \left(K - \frac{2}{3} \right) (\text{tr} \mathbf{E}_A^e)^2 - (3K\alpha_t) (\text{tr} \mathbf{E}_A^e) (T - T_0) \mathbf{I} \quad (5.26)$$

где је μ_A модул смицања, K запремински модул и α_t коефицијент термичког ширења, T и T_0 представљају тренутну, односно референтну температуру.

Експериментална испитивања показала су да долази до значајног пада вредности модула еластичности код полимера са памћењем облика при промени температуре. Главна промена одиграва се при преласку транзиционе температуре T_g када вредност еластичног модула нагло пада у уском температурном опсегу. У принципу може се рећи да се овај процес одиграва кроз три главне транзиционе фазе, између три кључне температуре (почетна температура мерења, транзициона температура и крајња температура мерења). Постоји више једначина које описују промену модула еластичности са променом температуре у широком опсегу температура, од собне до температуре далеко веће од транзиционе [147,159]. Користећи модификовану једначину за израчунавање модула еластичности у предложеном моделу добијамо:

$$\begin{aligned}
E(T) = & (E_1 - E_2) \exp\left(-\left(\frac{T}{T_1}\right)^{k_1}\right) \\
& + (E_2 - E_3) \exp\left(-\left(\frac{T}{T_g}\right)^{k_2}\right) \\
& + (E_3 - E_4) \exp\left(-\left(\frac{T}{T_h}\right)^{k_3}\right)
\end{aligned} \tag{5.27}$$

где су T_1 , T_g , T_h почетна, транзициона и највиша температура. Температуре T_1 и T_h су дефинисане мерним опсегом температура у експерименту, док је транзициона температура T_g својство испитиваног материјала. Вредност E_1 , E_2 , E_3 , и E_4 представљају вредност модула еластичности у карактеристичним транзиционим тачкама. Коefицијенти k_1 , k_2 и k_3 представљају Веибулове статистичке коefицијенте кидања сегментних ланаца. Карактеристичне тачке представљене су на Слици 5.3.



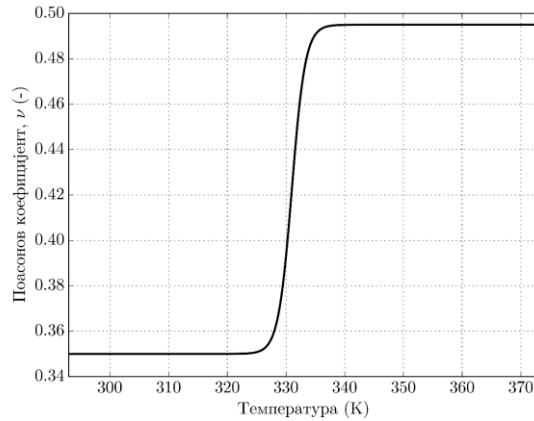
Слика 5.3: Промена модула еластичности са температуром

У односу на наведене једначине, увођење ових параметара омогућава тачније израчунавање модула еластичности при променама температуре у широком опсегу, али фазама изнад и испод T_g у којим такође долази до промене вредности модула еластичности E . Природа добијених резултата функције у сагласности је и са резултатима модула еластичности у [22,24] па се може закључити да је предложена функција општег карактера.

Зависност Поасоновог коefицијента од температуре добијамо једначином мешања (5.1):

$$v = v_g(1 - f_r) + v_r f_r \tag{5.28}$$

где v_g и v_r представљају вредности Поасоновог коefицијента v у чврстој, односно мекој фази. Промена вредности v приказана је на Слици 5.4



Слика 5.4: Промена Поасоновог коефицијента са температуром

Коришћењем вредности израчунатих у (5.27) и (5.28) могуће је израчунати смичући и запремински модул μ_A и K преко општих релација:

$$\mu_A(T) = \frac{E(T)}{2(1+\nu(T))} \quad (5.29)$$

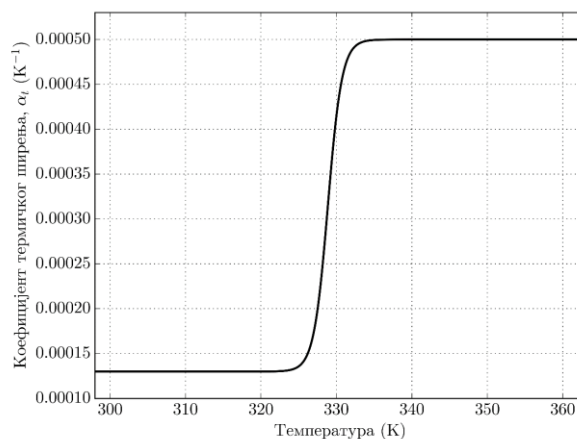
и:

$$K(T) = \mu_A(T) \frac{2(1+\nu(T))}{3(1-2\nu(T))} \quad (5.30)$$

Коефицијент термичког ширења у једначини (5.26) добијамо већ коришћеном једначином мешања (5.1):

$$\alpha_t = \alpha_g(1 - f_r) + \alpha_r f_r \quad (5.31)$$

Вредности коефицијента α_t дате су на Слици 5.5.



Слика 5.5: Промена Поасоновог коефицијента са температуром

Кошијев напон израчунава се на основу једначине (5.26):

$$\boldsymbol{\sigma}_A = \frac{\partial \psi_A^e(\mathbf{E}_A^e, T)}{\partial \mathbf{E}_A^e} \quad (5.32)$$

одакле се коначно добија:

$$\boldsymbol{\sigma}_A = J^{-1} [2\mu_A \mathbf{E}_A^e + K(\text{tr}(\mathbf{E}_A^e) - 3\alpha_t(T - T_0))\mathbf{I}] \quad (5.33)$$

Једначина која повезује Кошијев и Кирхофов напон за микромеханизам А је:

$$\boldsymbol{\sigma}_A = J^{-1} \boldsymbol{\tau}_A \quad (5.34)$$

док је девијаторски део напона микромеханизма А:

$$\boldsymbol{\sigma}'_A = \boldsymbol{\sigma}_A - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}_A) \mathbf{I} \quad (5.35)$$

Вредност девијаторског напона датог једначином (5.35) користимо за дефинисање ефективног смичућег напона:

$$\bar{\tau}_A = \sqrt{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}'_A : \boldsymbol{\sigma}'_A} \quad (5.36)$$

и хидростатичког притиска;

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\sigma}_A \quad (5.37)$$

Промена $\dot{\mathbf{F}}_A^p$ и закон течења дати су у облику:

$$\dot{\mathbf{F}}_A^p = \mathbf{D}_A^p \mathbf{F}_A^p \quad (5.38)$$

где је \mathbf{D}_A^p тензор брзине пластичне деформације:

$$\mathbf{D}_A^p = \dot{\gamma}_A^p \mathbf{N}_A^p \quad (5.39)$$

где су $\dot{\gamma}_A^p$ ефективна брзине пластичне деформације и \mathbf{N}_A^p правац пластичног течења датог у облику:

$$\mathbf{N}_A^p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\boldsymbol{\sigma}'_A}{\bar{\tau}_A} \quad (5.40)$$

Једначина термо-активирајуће еквивалентне брзине пластичне деформације раније дефинисану у [123,160,161] модификована је тако да се уз редуковани број параметара задржава тачност. Облик једначине је:

$$\dot{\gamma}_A^p = \dot{\gamma}_A^0 \exp\left(-\frac{1}{\zeta}\right) \exp\left(-\frac{A}{RT}\right) \sinh^{m_A} \left(\frac{\tau_A^y V}{2k_B T}\right) \quad (5.41)$$

$\dot{\gamma}_A^0$ представља преекспоненцијални фактор брзине смицања s^{-1} , A је активациона параметар, R гасна константа, k_B Болцманова константа, τ_A^y напон течења у функцији од температуре и брзине деформације, V активациона запремина, T тренутна температура. Ради лакше имплементације:

$$\dot{\gamma}_* = \dot{\gamma}_A^0 \exp\left(-\frac{1}{\zeta}\right) \exp\left(-\frac{A}{RT}\right) \quad (5.42)$$

Сложени услови моделирања у великом распону температура намећу дефинисање комплексног правила течења материјала. Користимо функцију течења предложену у и унапређену у [160]. Овако дефинисана функција правило вискозног течења омогућава изражунавање виско-пластичног множиоца за све температуре испитивања. Брзину смичуће пластичне деформације израчунавамо комбиновањем поменуте функције са изменама датим у [123]. Измене се односе на замену сложеног израза за коефицијент транзиције између фаза једноставним експоненцијалним изразом са једном променљивом, чиме би се симулирало тзв. гомилање дефеката:

$$\exp\left(-\frac{1}{\zeta}\right) = \exp\left(\frac{\ln(10) C_1^g (T - T_g)}{C_2^g + T - T_g}\right) \quad (5.43)$$

где променљива ζ према [123] има две различите вредности зависно од температуре:

$$\exp\left(-\frac{1}{\zeta}\right) = \begin{cases} \zeta_g, & T < T_g \\ \zeta_g + b(T - T_g), & T \geq T_g \end{cases} \quad (5.44)$$

Инверзија једначине (5.41) даје јако важну релацију између напона течења и температуре:

$$\frac{\tau_A^y}{T} = \frac{2k_B}{V} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\gamma}_A^p}{\dot{\gamma}_*} \right)^{\frac{1}{m_A}} \right] \quad (5.45)$$

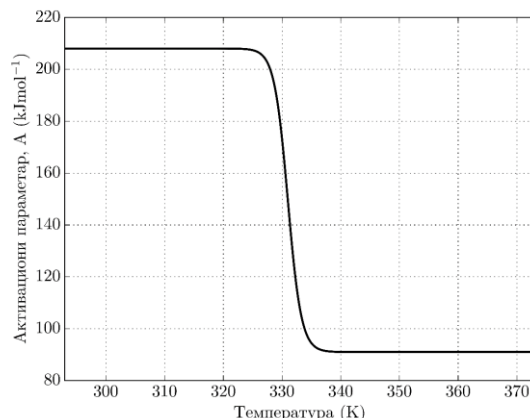
Напон течења дефинисан је преко одговарајућих напонских променљивих стања изразом:

$$\tau_A^y = \bar{\tau}_A - \xi_1 - \xi_2 \quad (5.46)$$

где је $\bar{\tau}_A$ ефективни смичући напон гране A , ξ_1 напонска променљива стања којом се моделира ојачање материјала пре тачке течења и слабљење након почетка течења, ξ_2 напонска променљива стања која даје ојачање-слабљење материјала при оптерећењу-растерећењу у режиму великих деформација. Температурна зависност активационог параметра дата је функцијом мешања:

$$A(T) = A_g(1 - f_r) + A_r f_r \quad (5.47)$$

На Слици 5.6 приказана је промена активационог параметра са температуром.

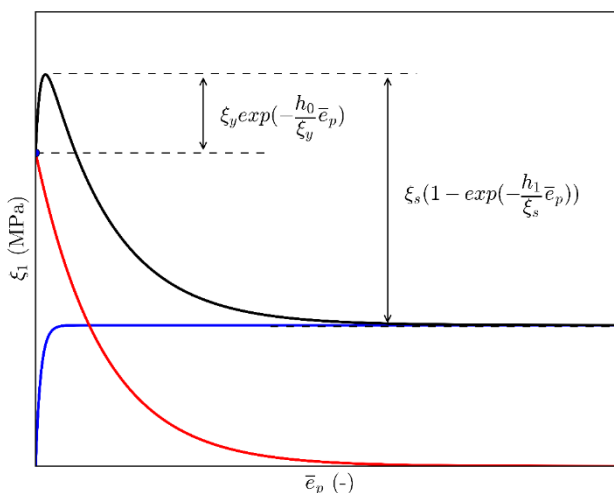


Слика 5.6: Промена активационог параметра A са температуром

Једначина напонске променљиве стања ξ_1 усвојена је на основу рада [131] како би се узео у обзир облике криве течења непосредно пре и непосредно након тачке течења. Примарни облик ове функције у раду показује да се вредност променљиве мења експоненцијално са вископластичном деформацијом. Адаптацијом материјалних параметара у моделу се предлаже измењени облик функције тако да зависи само од ефективне пластичне деформације:

$$\xi_1 = \xi_y \exp\left(\left(-\frac{h_0}{\xi_y} \bar{\epsilon}_p\right)\right) + \xi_s \left(1 - \exp\left(-\frac{h_1}{\xi_s} \bar{\epsilon}_p\right)\right) \quad (5.48)$$

где су ξ_y и ξ_s вредности напона течења и напон омекшавања, док су h_0 и h_1 фактор ојачања и слабљења напона течења и омекшавања.



Слика 5.7: Облик криве напонске променљиве ξ_1

Зависност напона течења од температуре дата је у облику:

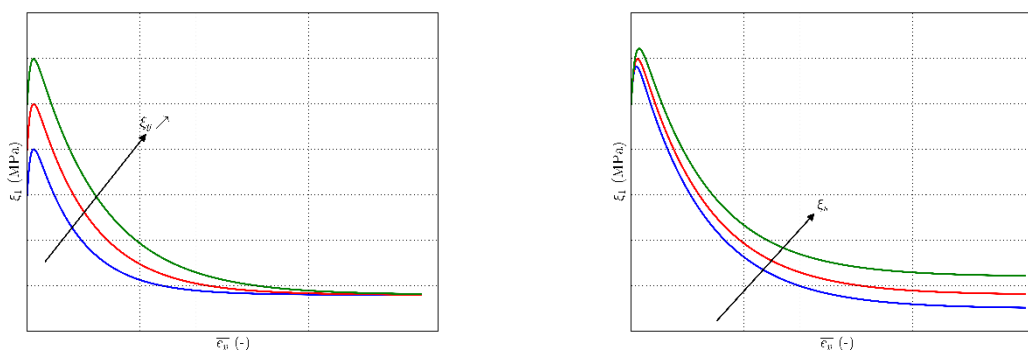
$$\xi_y = \frac{1}{2} (\xi_{yg} + \xi_{yr}) - \frac{1}{2} (\xi_{yg} - \xi_{yr}) \tanh\left(\frac{T - T_g}{w}\right) - s(T - T_g) \quad (5.49)$$

$$\xi_s = \frac{1}{2}(\xi_{sg} + \xi_{sr}) - \frac{1}{2}(\xi_{sg} - \xi_{sr}) \tanh\left(\frac{T - T_g}{w}\right) - n(T - T_g) \quad (5.50)$$

Вредности параметара ојачања добијамо једначином (5.1):

$$h_0 = h_{0g}(1 - f_r) + h_{0r}f_r \quad (5.51)$$

$$h_1 = h_{1g}(1 - f_r) + h_{1r}f_r \quad (5.52)$$



Слика 5.8: Утицај напона течења ξ_y и напона омекшавања ξ_s на вредност напонске променљиве стања ξ_1

Према експериментима за област температура већих од T_g показује се да у материјалу готово да нема трајних деформација. Материјал дакле, на високим температурам поприма својства хипереластичности. За моделирање оваквог, изразито нелинеарног понашања користимо напонску променљиву стања дату изразом:

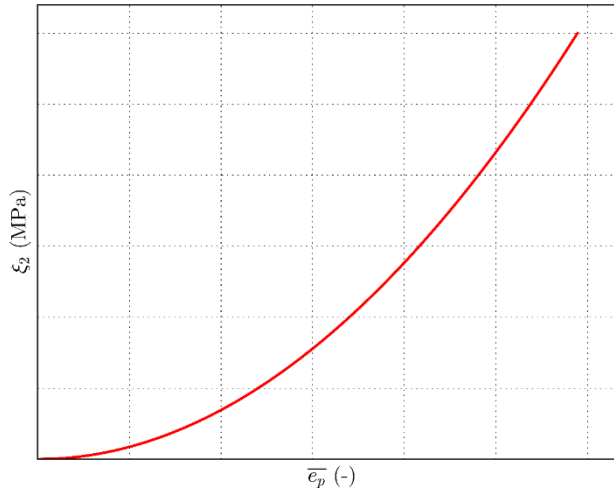
$$\xi_2 = h_2(\bar{\lambda} - 1)^c \quad (5.53)$$

где је c материјални параметар док је коефицијент ојачања дат функцијом:

$$h_2 = 0.5(h_{2g} + h_{2r}) - 0.5(h_{2g} - h_{2r}) \tanh\left(\frac{T - T_g}{w}\right) - l(T - T_g) \quad (5.54)$$

Као што се из једначине (5.53), вредност променљиве расте или се смањује у зависности од режима испитивања оптерећење-растерећење јер директно зависи од ефективног издужења $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\text{tr} \mathbf{b}}{3}} \quad (5.55)$$



Слика 5.9 : Вредност напонске променљиве стања ξ_2 при оптерећењу и растерећењу

Напомена: Треба напоменути да у оригиналној верзији једначине дате у [160] остаје нејасно да ли је степени фактор брзинске зависности m_A унутар заграде или је степен хиперболичке синусне функције. При имплементацији испитане су обе формулације и показано је да се резултати незнатно разликују, односно, веома је мали утицај на зависност напона течења од температуре и брзине деформације. Разлика је уочљива једино за изузетно велике брзине деформације као и изразито ниске температуре ($T < 0$). Облик коришћен у предложеном моделу дат је једначином (5.41). У нашој коначној дефиницији поједностављујемо услов течења заменом активационих параметара чије вредности су реда величина 10^{-19} и 10^{-22} из функције дате у [123] вредностима активационе енталпије у фазама. Разлог за ово јесу пре свега потекли од нумеричке нестабилности приликом интеграције конститутивних релација. Резултати модела показују да су предложене измене биле оправдане и да не утичу на тачност. Такође због промене степена вредности целог израза, уместо Болцманове константе користимо гасну константу. Овакав концепт увођења напонских променљивих стања омогућава поједностављивање модела и лакшу имплементацију. Променљиве директно зависе од брзине односно степена деформације, за разлику од концепта слободне запремине предложеног у [134] увођењем унутрашње променљиве за моделирање оштећења у материјалу.

$$\bar{\tau}_A = \xi_1 + \xi_2 + \alpha_p \bar{p} + \frac{2k_B T}{V} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\gamma}_A^p}{\dot{\gamma}_*} \right)^{\frac{1}{m_A}} \right] \quad (5.56)$$

$$f_A = \bar{\tau}_A^{\text{tr}} - \Delta t \mu_A \gamma_A^p - \xi_1 - \xi_2 - \alpha_p \bar{p} - \frac{2k_B T}{V} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\gamma}_A^p}{\dot{\gamma}_*} \right)^{\frac{1}{m_A}} \right] \quad (5.57)$$

5.2.3 Конститутивне релације микромеханизма В

Како је показано једначином (5.26) запреминска и термичка деформација везани су само за микромеханизам А. Користећи овај приступ могуће је моделирати термо-еластичне ефекте у термичким релацијама. Уз ту претпоставку дисторзиони еластични градијент микромеханизма В дат је у облику:

$$\overline{\mathbf{F}}_B^e = (J_B^e)^{\frac{1}{3}} \mathbf{F}_B^e \quad (5.58)$$

У (5.58) $\overline{\mathbf{F}}_B^e$ је дисторзиони део \mathbf{F}_B^e . Према [142,143]:

$$\overline{\mathbf{b}}_B^e = \overline{\mathbf{F}}_B^e \left(\overline{\mathbf{F}}_B^e \right)^T = (J_B^e)^{-\frac{2}{3}} \mathbf{b}_B^e \quad (5.59)$$

еластични леви Коши-Гринов тензор деформације. Полазећи од дефиниције Хелмхолцове слободне енергије:

$$\psi_B = \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \quad (5.60)$$

сила потребна за истезање једног молекуларног ланца је:

$$f_c = \frac{\partial \psi_B}{\partial r} = \frac{N k_B T}{l} L^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right) \quad (5.61)$$

Према [32] овај микромеханички модел директно се користи за упрошћавање Аруда-Бојс хипереластичног модела [162]. Аруда-Бојс модел је напредни хипереластични модел којим се описује деформација еластомерних материјала. Модел је заснован на претпоставци да се макромолекули налазе дуж дијагонала јединичне запремине. Према [163] макромолекули су повезани са укупно n крутих веза, дужине l . Коначно ефективно истезање је:

$$\overline{\lambda}_S = \sqrt{\frac{(\lambda_s^1)^2 + (\lambda_s^2)^2 + (\lambda_s^3)^2}{3}} = \sqrt{\frac{\text{tr} \overline{\mathbf{C}}}{3}} = \sqrt{\frac{\text{tr} \overline{\mathbf{b}}}{3}} = \sqrt{\frac{\overline{I}_1}{3}} \quad (5.62)$$

показује се да $\overline{\lambda}_S$ зависи само од прве инваријанте \overline{I}_1 тензора $\overline{\mathbf{b}}$. Користећи једначину за Кошијев напон [32,142]:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{2}{J} \left[\frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_1} + \frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_2} \overline{I}_1 \right] \overline{\mathbf{b}} - \frac{2}{J} \frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_2} \left(\overline{\mathbf{b}} \right)^2 + \left[\frac{\partial \psi_B}{\partial J} - \frac{2 \overline{I}_1}{3J} \frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_1} - \frac{4 \overline{I}_2}{3J} \frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_2} \right] \mathbf{I} \quad (5.63)$$

уз услов да напон не зависи од \overline{I}_2 добија се:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{2}{J} \left[\frac{\partial \psi_B}{\partial \overline{I}_1} \right] \overline{\mathbf{b}} + \frac{\partial \psi_B}{\partial J} \mathbf{I} \quad (5.64)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{1}{J} \frac{1}{3\bar{\lambda}_S} \frac{\partial \psi_B}{\partial \bar{\lambda}_S} \bar{\mathbf{b}} + \frac{\partial \psi_B}{\partial J} \mathbf{I} \quad (5.65)$$

Према [164] унутрашња енергија не зависи од издужења, па можемо писати:

$$\psi(\bar{\lambda}_S, J, T) = u(J) - Ts(\bar{\lambda}_S) \quad (5.66)$$

Уз претпоставку малих запреминских деформација, ентропија не зависи од J у горњој једначини запреминска деформација и Кошијев напон дати су линеарном релацијом:

$$\boldsymbol{\sigma}_B : \mathbf{I} = \frac{\psi(\bar{\lambda}_S, J, T)}{\partial J} = \kappa(J-1) \mathbf{I} \quad (5.67)$$

Кошијев напон добијамо из релације (5.64):

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{-T}{3J\bar{\lambda}_S} \frac{s(\bar{\lambda}_S)}{\bar{\lambda}_S} \bar{\mathbf{b}} + \kappa(J-1) \mathbf{I} \quad (5.68)$$

У горњој једначини зависност ентропије од ефективног издужења ланца $\bar{\lambda}_S$ дата је кроз:

$$\frac{s(r(\bar{\lambda}_S))}{\bar{\lambda}_S} = \frac{\partial s}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial \bar{\lambda}_S} = l\sqrt{n} \frac{\partial s}{\partial r} \quad (5.69)$$

Уз релацију промене ентропије са дужином ланца дату у [32]:

$$\frac{\partial s}{\partial r} = \frac{-Nk_B}{1} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right) \quad (5.70)$$

добијамо израз за Кошијев напон у облику:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{Nk_B T}{3J} \frac{\lambda_L}{\bar{\lambda}_S} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_S}{\lambda_L} \right) \bar{\mathbf{b}} + \kappa(J-1) \mathbf{I} \quad (5.71)$$

Користећи поједностављивање:

$$\mu_B = \frac{Nk_B T}{3} \lambda_L \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LB}} \right) \quad (5.72)$$

долазимо до релације за Кошијев напон модификованог Аруда-Бојс хипереластичног модела:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{\mu_B}{J_B^e \lambda^{-1}} \frac{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda_{SB}}{\lambda_{LB}} \right)}{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LB}} \right)} \bar{\mathbf{b}} + \kappa_B (J_B^e - 1) \mathbf{I} \quad (5.73)$$

Променљиве μ_B , λ_{LB} , κ_B представљају материјалне карактеристике модела. Представљено извођење није тривијално и детаље је могуће наћи у [32,162,163]. Функција је дефинисана:

$$\mathcal{L}(x) = \coth x - \frac{1}{x} \quad (5.74)$$

Како у дефиницији модификованог Аруда-Бојс модела фигурише инверзни облик функције неопходно га је израчунати. Израчунавање кроз елементарне функције није могуће, па се намећу два начина решавања једначине (5.74): нумерички употребом неке од метода, нпр. Њутн, или путем неке од апроксимација. Постоји неколико дефинисаних апроксимација:

- $\mathcal{L}^{-1}(x) \approx 3x + \frac{9}{5}x^3 + \frac{297}{175}x^5 + \frac{1539}{875}x^7$ [162]
- $\mathcal{L}^{-1}(x) \approx \frac{x(3-x^2)}{1-x^2}$ [165]
- $\mathcal{L}^{-1}(x) \approx 1.31446 \tan(1.58986x) + 0.91209x|x|$ [166]
- $\mathcal{L}^{-1}(x) \approx 1/(\text{sign}(x)) - x0.84136 \leq |x| < 1$ [166]
- $\mathcal{L}^{-1}(x) = \frac{x(3-2.6x+0.7x^2)}{(1-x)(1+0.1x)}$ [167]

Апроксимација дата у [167] користи се у дефинисању конститутивних релација предложеног модела. Поларна декомпозиција еластичног и пластичног дела градијента деформације гране В:

$$\mathbf{F}_B^e = \mathbf{v}_B^e \mathbf{R}_B^e = \mathbf{R}_B^e \mathbf{U}_B^e \quad (5.75)$$

$$\mathbf{F}_B^p = \mathbf{v}_B^p \mathbf{R}_B^p = \mathbf{R}_B^p \mathbf{U}_B^p \quad (5.76)$$

где \mathbf{R} представља тензор ротације, а \mathbf{U} и \mathbf{v} , десни односно, леви тензор издужења, док индекси е и р означавају еластични и пластични део градијента. Изохорски градијент тензора деформације $\overline{\mathbf{F}}_B^e$ дефинише се једначином:

$$\overline{\mathbf{F}}_B^e = \mathbf{J}^{-\frac{1}{3}} \mathbf{F}_B^e \quad (5.77)$$

Изохорски леви Коши-Гринов тензор деформације $\overline{\mathbf{b}}_B^e$ и изохорски леви тензор $\overline{\mathbf{v}}_B^e$ дефинисани су као:

$$\mathbf{b}_B^e = \overline{\mathbf{F}}_B^e (\overline{\mathbf{F}}_B^e)^T = \mathbf{J}^{-\frac{2}{3}} \mathbf{F}_B^e (\mathbf{F}_B^e)^T = \mathbf{J}^{-\frac{2}{3}} \mathbf{b}_B^e \quad (5.78)$$

$$\overline{\mathbf{v}}_B^e = \sqrt{\mathbf{b}_B^e} = (\mathbf{J}_B^e)^{-\frac{1}{3}} \sqrt{\mathbf{b}_B^e} = (\mathbf{J}_B^e)^{-\frac{1}{3}} \mathbf{v}_B^e \quad (5.79)$$

где је \mathbf{b}_B^e леви Коши-Гринов тензор деформације. Узимањем у обзир еластичне и пластичне делове тензора градијента деформације добија се:

$$\overline{\mathbf{F}}_B^e = \mathbf{J}^{-\frac{1}{3}} \mathbf{F}_B^e, \overline{\mathbf{B}}_B^e = \overline{\mathbf{F}}_B^e (\overline{\mathbf{F}}_B^e)^T = \mathbf{J}^{-\frac{2}{3}} \mathbf{b}_B^e, \overline{\mathbf{v}}_B^e = \mathbf{J}^{-\frac{1}{3}} \mathbf{v}_B^e \quad (5.80)$$

$$\bar{\mathbf{F}}_B^p = \mathbf{F}_B^p, \bar{\mathbf{b}}_B^p = \bar{\mathbf{F}}_B^p (\bar{\mathbf{F}}_B^e)^T = \mathbf{b}_B^p, \bar{\mathbf{v}}_B^p = \mathbf{v}_B^p \quad (5.81)$$

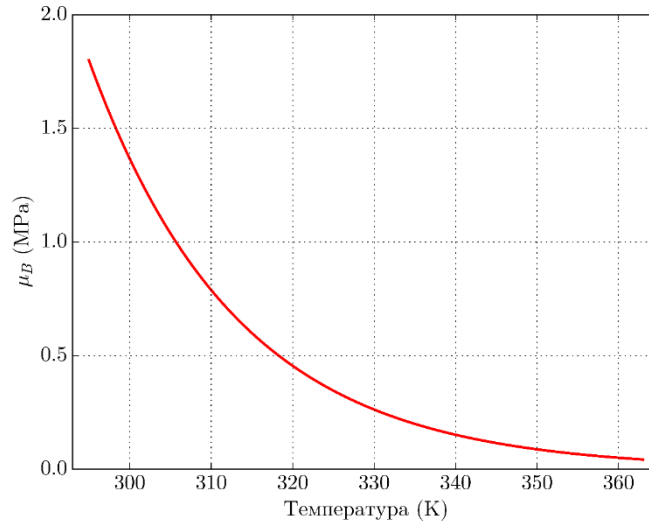
Кошијев напон микромеханизма В:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{\mu_B}{J\lambda_{SB}} \frac{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\lambda_{SB}}{\lambda_{LB}}\right)}{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{LB}}\right)} \bar{\mathbf{b}}' + \kappa_B (J_B^e - 1) \mathbf{I} \quad (5.82)$$

Модул смицања микромеханизма В дат је емпиријском формулом [168]:

$$\mu_B(T) = \mu_{B0} \exp(-a_B(T - T_0)) \quad (5.83)$$

где је μ_{B0} почетна вредност $\mu_B(T)$ на температури T_1 из једначине (5.27) а a_B нагиб слабења модула смицања μ_B са температуром. Ради поједностављивања узето је да је λ_{LB} константно.



Слика 5.10: Промена модула смицања μ_B са температуром

Ефективни напон смицања микромеханизма В дат је у облику:

$$\bar{\tau}_B = \sqrt{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}'_B : \boldsymbol{\sigma}'_B} \quad (5.84)$$

Промена $\dot{\mathbf{F}}_B^p$ и закон течења дати су у облику:

$$\dot{\mathbf{F}}_B^p = \mathbf{D}_B^p \mathbf{F}_B^p \quad (5.85)$$

где је \mathbf{D}_B^p тензор брзине пластичне деформације:

$$\mathbf{D}_B^p = \dot{\gamma}_B^p \mathbf{N}_B^p \quad (5.86)$$

где су $\dot{\gamma}_B^p$ ефективна брзине пластичне деформације и N_B^p правац пластичног течења дат у облику:

$$N_B^p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\boldsymbol{\sigma}'_B}{\bar{\tau}_B} \quad (5.87)$$

Брзина пластичне деформације за микромеханизам В дата је степеном релацијом:

$$\dot{\gamma}_B^p = \left(\frac{\bar{\tau}_B}{\hat{\tau}_B} \right)^{m_B} \quad (5.88)$$

где је $\hat{\tau}_B$ ефективни смичући напон а $\bar{\tau}_B$ гранични напон микромеханизма В. Коришћењем једначине (5.1) добијамо:

$$\hat{\tau}_B = \hat{\tau}_{Bg}(1-f_r) + \hat{\tau}_{Bg}f_r \quad (5.89)$$

Веза Кошијевог и Кирхофовог напона дата је изразом:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = J^{-1} \boldsymbol{\tau}_B \quad (5.90)$$

5.2.4 Микромеханизам С

На основу раније дефинисаног израза за словодну енергију модификованог Аруда-Бојс хипереластичног модела, а сходно Слици 5.2 из укупног градијента деформације добијамо директно девијаторски напон у микромеханизма С у облику:

$$\boldsymbol{\sigma}_C = \frac{\mu_C}{J\lambda_{SC}} \frac{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda_{SC}}{\lambda_{LC}} \right)}{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LC}} \right)} \bar{\mathbf{b}}' \quad (5.91)$$

где се \mathbf{b} рачуна директно из укупног градијента:

$$\mathbf{b} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T \quad (5.92)$$

$$\bar{\mathbf{b}} = J^{-2/3} \mathbf{b} \quad (5.93)$$

$$\bar{\lambda}_S = \sqrt{\frac{\text{tr} \bar{\mathbf{b}}}{3}} \quad (5.94)$$

$$\bar{\mathbf{b}} = \bar{\mathbf{b}} - \frac{\text{tr}\bar{\mathbf{b}}}{3} \mathbf{I} \quad (5.95)$$

$$\mathcal{L}^{-1}(x) = \frac{x(3-2.6x+0.7x^2)}{(1-x)(1+0.1x)} \quad (5.96)$$

5.2.5 Термичке релације

Промена специфичне топлоте дата је релацијом:

$$c_p = c_{p0} - c_{p1}(T - T_g) \quad (5.97)$$

Уз Фуријеов закон:

$$\mathbf{q}_R = -\kappa \nabla T \quad (5.98)$$

где су κ , ∇T и \mathbf{q}_R проводљивост, градијент температуре и флуks, редом. Промена температуре дата је облику:

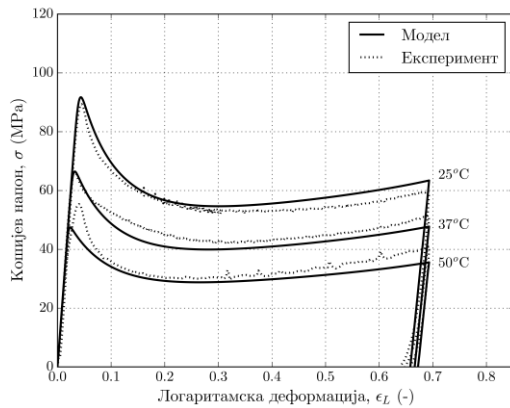
$$c \dot{T} = -\text{Div} \mathbf{q}_R + \dot{q}_R + \beta (\bar{\tau}_A \dot{\gamma}_A^p + \bar{\tau}_B \dot{\gamma}_B^p) \quad (5.99)$$

5.3 Верификација модела

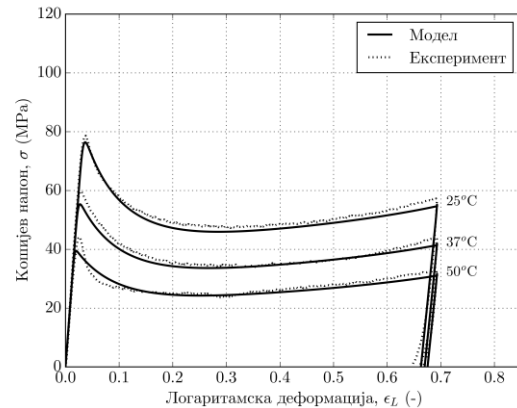
5.3.1 Тестови на једном елементу

Применом теорије на једном хексагоналном осмочворном елементу димензија 1 mm x 1 mm x 1 mm, изложеног једноосном притиску при различитим брзинама деформације и температурама. Материјални модел за ПЛА представљен је у овом поглављу. Како бисмо остварили чисто једноосно притискивање, задато је померање на чворова горњој површини елемента и ограничено померање изван равни за доњу површину XOY, и бочне површине XOZ и YOZ. Изведене су симулације на различитим температурама које одговарају експерименталним вредностима температура. Слика 5.12 приказује поређење између резултата симулација и експерименталних података при брзинама деформације 0.0001 s^{-1} и 0.001 s^{-1} за сваку од температура. Показује се да почетни напон течења опада са порастом температуре. Последишно, вредност вископластичног напона омекшавања након течења такође показује опадајући тренд. За све температуре модел показује добро слагање са експерименталним подацима, чиме се потврђује добра предикција представљеног конститутивног модела. На Слици 5.13 приказано је поређење између предикција модела и експерименталних података при брзинама на температурама 298, 310 и 323 K за брзине 0.0001 s^{-1} и 0.001 s^{-1} . При повећавању брзине деформације напон течења расте упоредо од приближно 60 МПа до 85 МПа. Уочава се да напон течења расте при повећавању брзине деформације за сваку од температура. При нижим температурама напон течења драстично расте са порастом

брзине деформације. Ипак, при повећавању температуре преко транзиционе границе напон течења опада и показује мањи пораст са порастом брзине деформације. Уопштено, велике брзине деформације при ниским температурама даје велику вредност напона течења материјала. Приказани модел у потпуности омогућава моделирање зависност напона течења од брзине деформације и температуре.

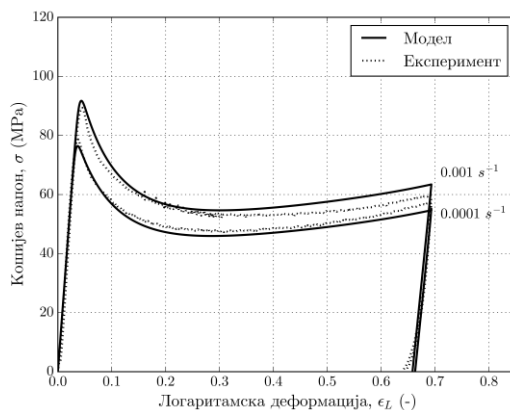


(a) 0.001 s^{-1}

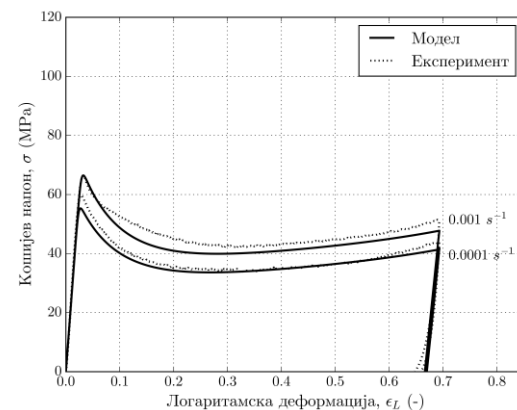


(б) 0.0001 s^{-1}

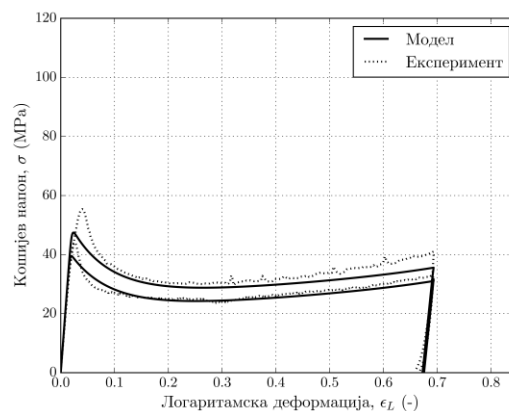
Слика 5.11 Поређење нумеричких резултата са експериментом за брзине деформације 0.001 и 0.0001 s^{-1}



(a)



(б)



(в)

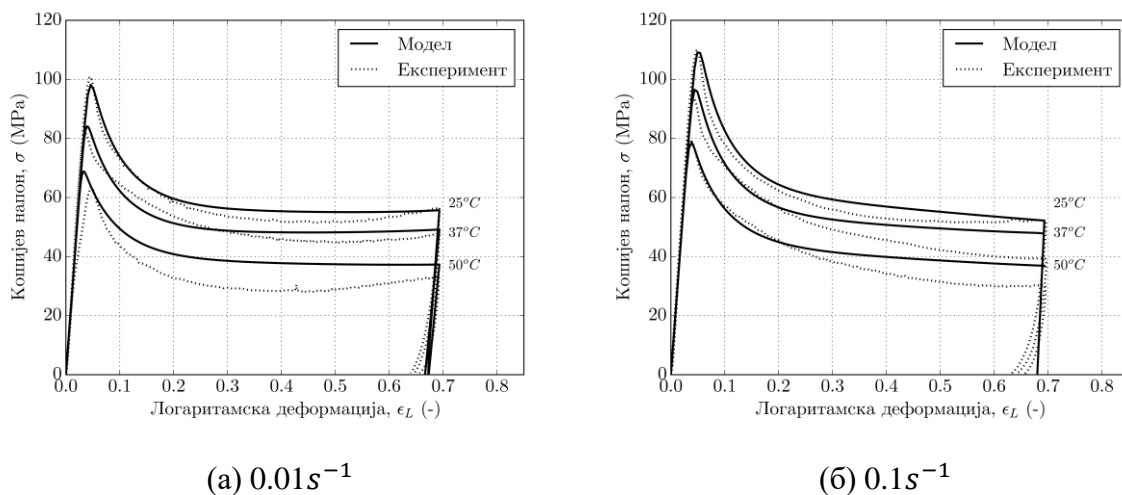
Слика 5.12: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру $25, 37, 50 \text{ } ^\circ\text{C}$

На Слици 5.14 приказано је поређење између резултата симулација и експерименталних података при брзинама деформације 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} за сваку од температура из експеримената. Показује се да почетни напон течења опада са порастом температуре. Последично, вредност вископластичног напона омекшавања након течења такође показује опадајући тренд. За све температуре модел показује добро слагање са експерименталним подацима, чиме се потврђује добра предикција представљеног конститутивног модела. На Слици 5.18 приказано је поређење између предикција модела и експерименталних података при брзинама на температурама 298, 310 и 323 K за брзине 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} . При повећавању брзине деформације напон течења расте упоредо за сваку од температура.

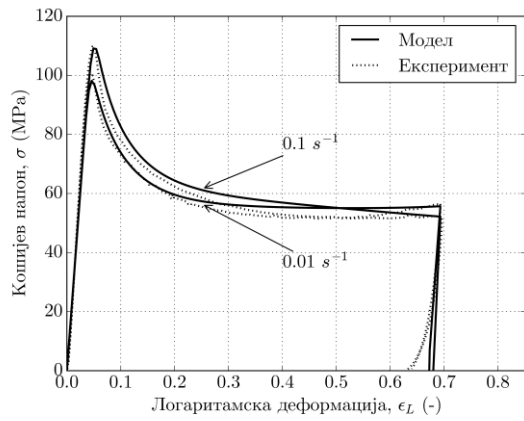
На Слици 5.17 приказано је поређење између резултата симулација и експерименталних података за фотополимер при брзинама деформације 0.01 s^{-1} и 0.1 s^{-1} за сваку од температура из експеримената. Како су због мањег броја мерења сви резултати дати на два упоредна дијаграма, може се приметити промена вредности напона у материјалу са преласком T_g .

5.3.2 Нумеричка симулација ефекта памћења облика

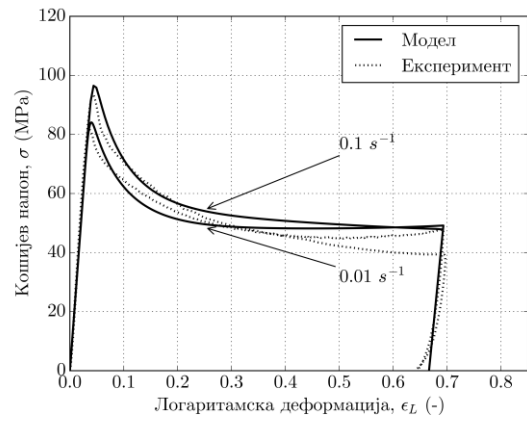
Како су резултати симулација у претходном поглављу показали одговарајуће слагање са експерименталним мерењима применом јединствене групе материјалних параметара за све температуре и брзине деформације у широком опсегу, показује се да модел може да буде примењен у симулацијама обнове облика у полимерним материјалима. За верификациону симулацију је коришћен један ABAQUS C3D8HT термо-механички спрегнут елемент. Брзина деформације у примеру је 0.001 s^{-1} . Температура се мења у складу са експериментом од 298 до 363 K. На слици 5.18 приказани су резултати модела за 3 карактеристичне равни. На слици 5.18 приказан је 3Д координатном систему.



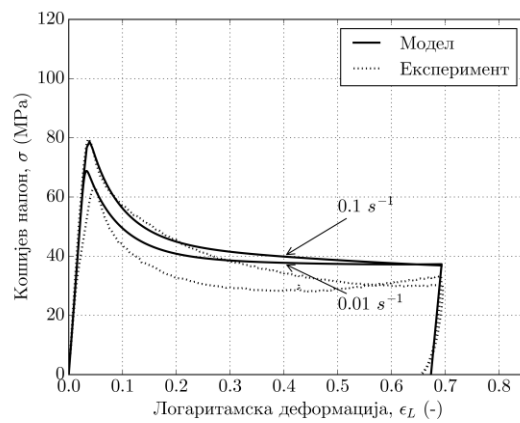
Слика 5.13: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру 0.01 и 0.1 s^{-1}



(a) 25 °C

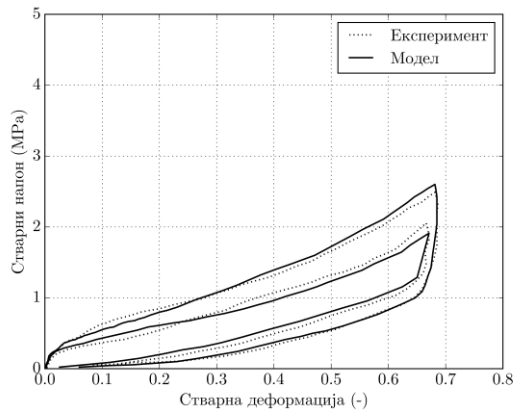


(б) 37 °C

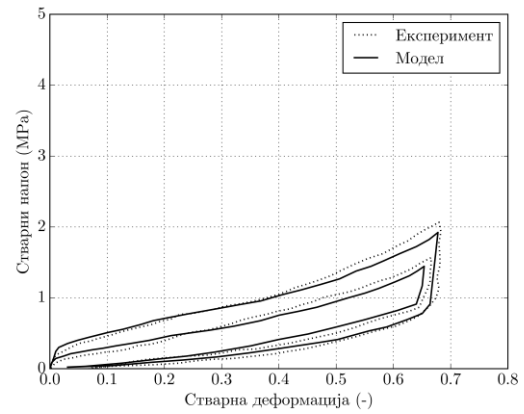


(в) 50 °C

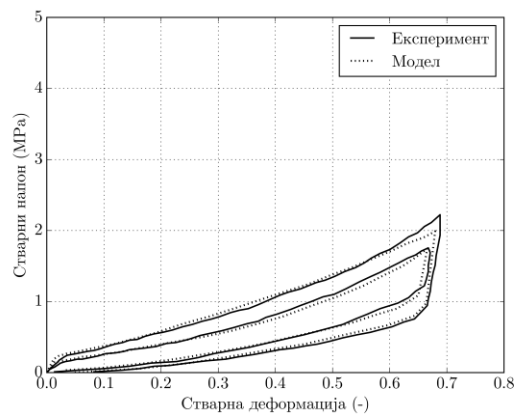
Слика 5.14: Поређење нумеричких резултата са експериментом за температуру 25, 37, 50 °C



(a) 70 °C

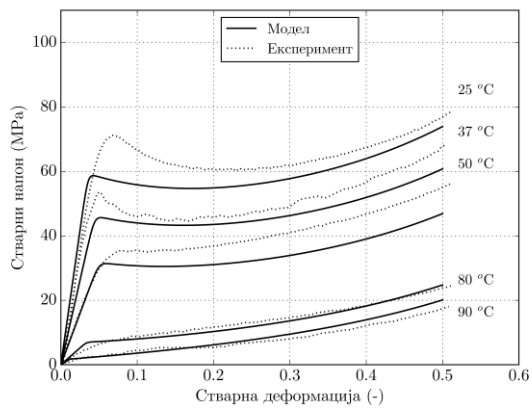


(б) 80 °C

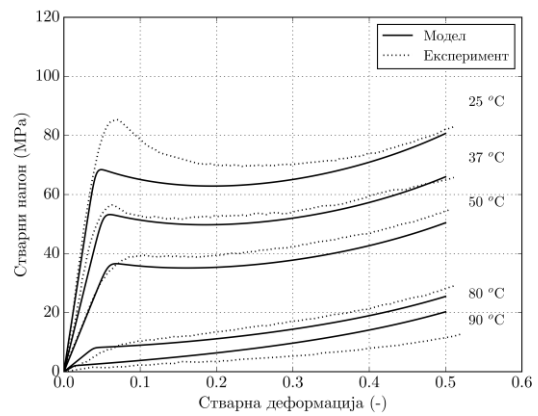


(в) 90 °C

Слика 5.15 Криве стварни напон-стварна деформација за температуру 70, 80, 90 °C

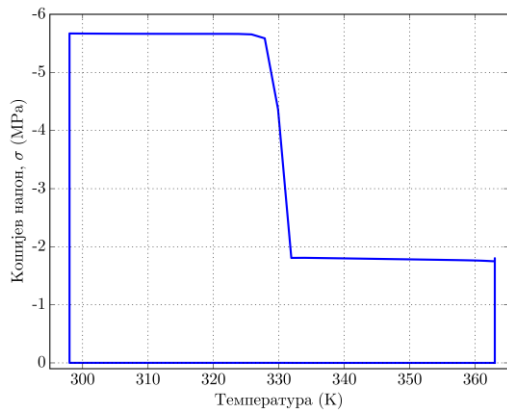


(a) $0.01s^{-1}$

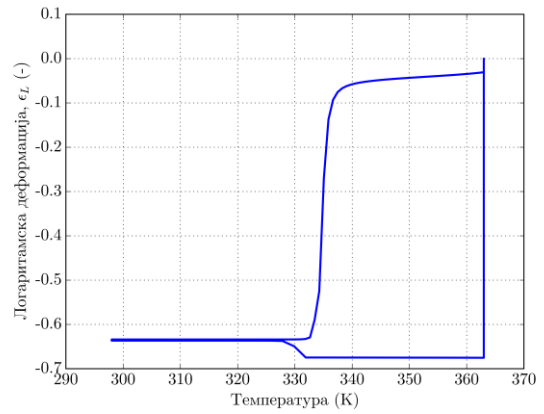


(б) $0.1s^{-1}$

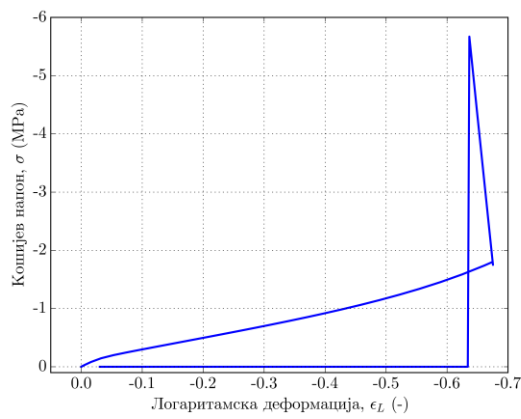
Слика 5.16: Поређење нумеричких резултата са експериментом за брзине деформације 0.01 и 0.1 s^{-1}



(a) T - σ

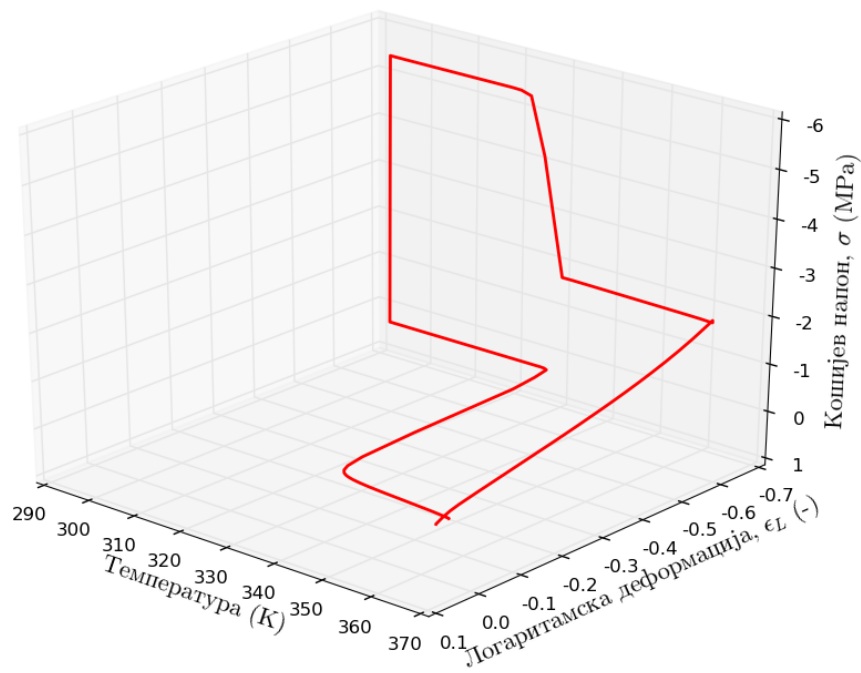


(б) T - ϵ



(в) σ - ϵ

Слика 5.17: Резултати модела приказани у три равни σ - ϵ , T - σ и T - ϵ

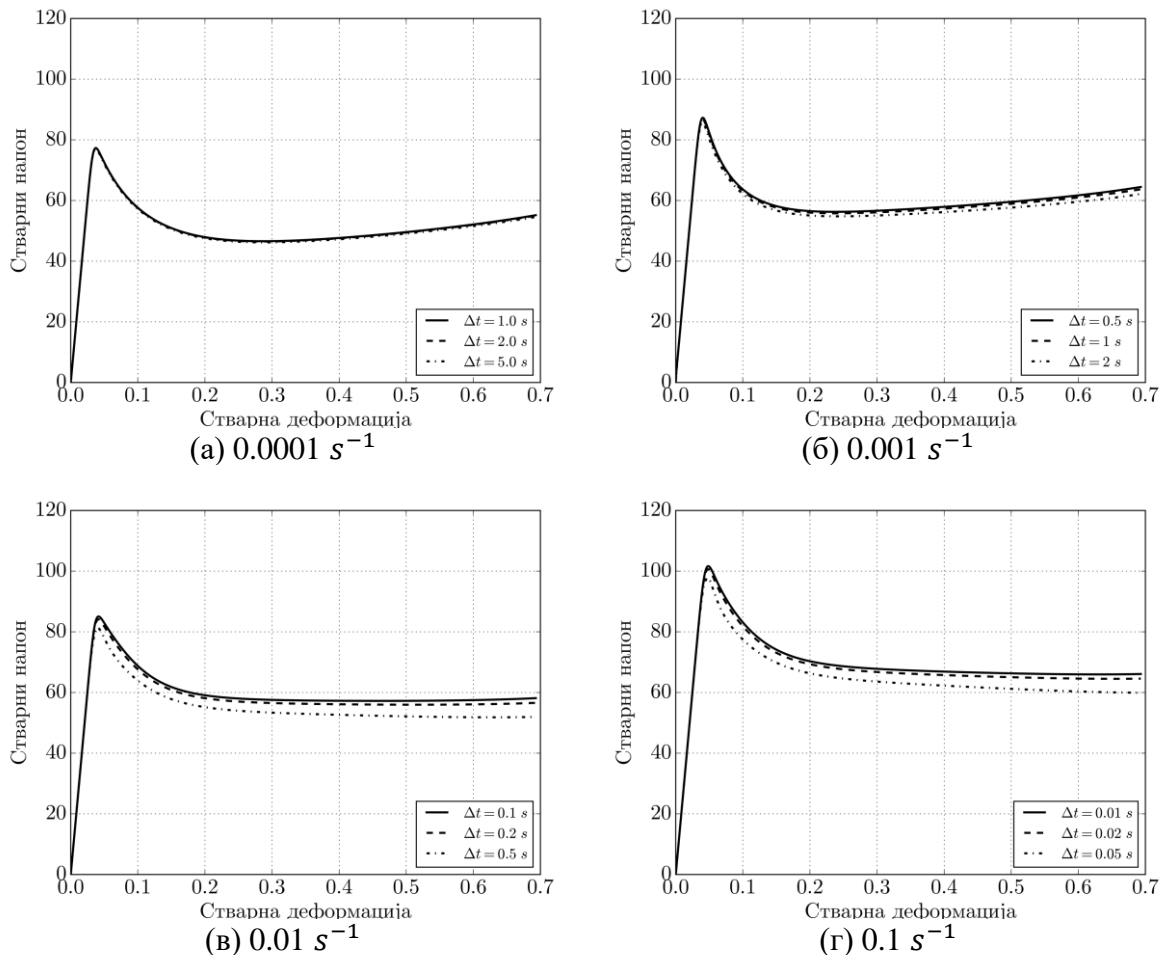


5.18: Приказ вредности симулације у координатном систему T - σ - ϵ

5.3.3 Нумеричке симулације са константним временским кораком

У циљу да покажемо да је представљена интеграциона процедура довољно стабилна, спроведено је неколико нумеричких симулација са константним временским кораком. Коришћењем нумеричких симулација на једном елементу, показујемо резултате за 3 фиксна временска корака за 3 брзине деформације. Температура је у свим симулацијама била истоветна 298 К. Симулације су спроведене на следећи начин:

- 0.1 s^{-1} , са временским корацима 0.01, 0.02, 0.05 s, реално време трајања процеса 5 s
- 0.01 s^{-1} , са временским корацима 0.1, 0.2, 0.5 s, реално време трајања процеса 50 s
- 0.001 s^{-1} , са временским корацима 0.5, 1.0, 2.0 s, реално време трајања процеса 500 s
- 0.0001 s^{-1} , са временским корацима 1.0, 2.0, 10.0 s, реално време трајања процеса 5000 s



5.19: Утицај величине временског корака Δt на тачност интеграције напона за различите брзине деформације

Како се види из приказаних резултата, интеграциони поступак је тачан и довољно робусан да даје резултате без битних одступања у њиховој природи. Како су процеси

виско-пластичног течења сложени, разумљивији нешто већи број корака у односу на процесе класичне пластичности метала.

5.4 Процедура нумеричке интеграције

Ради имплементације фортранског потпрограма у програм за анализу МКЕ, потребно је дефинисати процедуру нумеричке интеграције. У преосталом делу поглавља биће представљени главни кораци у имплементације процедуре нумеричке интеграције.

У Табели 5.2 је приказан списак променљивих стања модела и неопходан простор за чување вредности појединих променљивих стања.

Ознака	Опис	Простор за променљиву стања
\mathbf{F}_A^p	пластични градијент микромеханизма А	9
\mathbf{F}_B^p	пластични градијент микромеханизма В	9
$\dot{\gamma}_A^p$	брзина пластичне деформације микромеханизма А	1
$\dot{\gamma}_B^p$	брзина пластичне деформације микромеханизма В	1
\bar{e}_p	ефективна пластична деформација микромеханизма А	1
Укупно		21

Табела 5.2: Број и меморијски простор за променљиве стања предложеног модела

Започињемо процедуру уз неколико једноставних апроксимација конститутивне теорије за процедуру временске интеграције. Како имплементација модела, који укључују зависност од брзине деформације и температуре, може постати изузетно сложена и робусна у случајевима коришћења више од једног елемента уколико се не примени значајна редукација временског корака. Деформација коју користимо у свим микромеханизмима је логаритамска према наведеним конститутивним релацијама.

У следећим једначинама ради лакшег означавања користимо ознаку n за претходни, односно ознаку $n+1$ за тренутни временски корак.

Познато из претходног корака n и тренутног корака $n+1$:

- $\boldsymbol{\sigma}_n, (\dot{\gamma}_A^p)_n, (\dot{\gamma}_B^p)_n, (\mathbf{F}_A^p)_n, (\mathbf{F}_B^p)_n, \mathbf{F}_n, \mathbf{F}_{n+1}, T_n, T_{n+1}, (\xi_1)_n, (\xi_2)_n$

Израчунати на крају корака $n+1$:

- $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}, (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}, (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1}, (\mathbf{F}_A^p)_{n+1}, (\mathbf{F}_B^p)_{n+1}, (\xi_1)_{n+1}, (\xi_2)_{n+1}$

Једначина промене $\dot{\mathbf{F}}_A^p = \mathbf{D}_A^p \mathbf{F}_A^p$ се интегрални путем процедуре дате у [169]:

$$(\mathbf{F}_A^p)_{n+1} = \exp(\Delta t (\mathbf{D}_A^p)_{n+1}) (\mathbf{F}_A^p)_n \quad (5.100)$$

Еластични део градијента деформације $(\mathbf{F}_A^e)_{tr}$ добијамо коришћењем израза:

$$(\mathbf{F}_A^e)_{tr} = \mathbf{F}_{n+1} (\mathbf{F}_A^p)_n^{-1} \quad (5.101)$$

где је \mathbf{F}_{n+1} укупни градијент деформације, а $(\mathbf{F}_A^p)_n^{-1}$ пластични градијент деформације микромеханизма А на крају претходног корака.

Логаритамска деформација дата је у облику:

$$(\mathbf{E}_A^e)_{tr} = \ln(\mathbf{V}_A^e)_{tr} \quad (5.102)$$

Пробни еластични девијаторски напон микромеханизма А дат је у облику:

$$(\boldsymbol{\sigma}_A)_{tr} = 2\mu_A (\mathbf{E}_A^e)_{tr} + K(\text{tr}(\mathbf{E}_A^e)_{tr} \mathbf{I} - 3K\alpha_t(T_{n+1} - T_0)\mathbf{I}) \quad (5.103)$$

где је \mathbf{E}_A^e пробна еластична деформација, T_{n+1} текућа температура, T_0 референтна температура. Пробни ефективни смичући напон добијамо коришћењем Кошијевог пробног девијаторског напона:

$$(\bar{\tau}_A)_{tr} = \sqrt{\frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{tr} : (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{tr}} \quad (5.104)$$

$$(\mathbf{N}_A^p)_{tr} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{tr}}{(\bar{\tau}_A)_{tr}}} \quad (5.105)$$

$$\bar{\tau}_A = (\xi_1)_{n+1} + (\xi_2)_{n+1} + \alpha_p \bar{p}_{n+1} + \frac{2k_B T_{n+1}}{V} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\dot{\gamma}_0^*} \right)^{\frac{1}{m_A}} \right] \quad (5.106)$$

уз претпоставку да важи:

$$(\mathbf{N}_A^p)_{n+1} = (\mathbf{N}_A^p)_{tr} \quad (5.107)$$

добијамо имплицитну једначину за брзину пластичне деформације, коју решавамо бисекцијама.

$$f_A = (\bar{\tau}_A)_{tr} - \mu_A \Delta t (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} - \bar{\tau}_A = 0 \quad (5.108)$$

Брзина пластичне деформације на крају корака је:

$$(\mathbf{D}_A^p)_{n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} (\mathbf{N}_A^p)_{n+1} \quad (5.109)$$

Ефективни смичући напон на крају корака је:

$$(\bar{\tau}_A)_{n+1} = (\bar{\tau}_A)_{tr} - \mu_A \Delta t (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} \quad (5.110)$$

Кошијев напон микромеханизма А на крају корака је:

$$(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1} = (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{tr} - 2\mu_A \Delta t \mathbf{D}_A^p \quad (5.111)$$

Следећи исту процедуру, интегралимо једначине за микромеханизам В. Пробни еластични градијент добијамо из једначине:

$$(\mathbf{F}_B^e)_{tr} = \mathbf{F}_{n+1} (\mathbf{F}_B^p)_n^{-1} \quad (5.112)$$

где је \mathbf{F}_{n+1} укупни градијент деформације, а $(\mathbf{F}_B^p)_n^{-1}$ пластични градијент деформације микромеханизма В на крају претходног корака.

$$(\boldsymbol{\sigma}_B^e)_{tr} = \frac{\mu_B (T_{n+1})}{(J_B^e)_{n+1} \lambda_{SB}} \frac{L^{-1} \left(\frac{\lambda_{SB}}{\lambda_{LB}} \right)}{L^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LB}} \right)} \overline{\mathbf{b}}_B^e \quad (5.113)$$

Пробни ефективни смичући напон микромеханизма В рачунамо преко пробног девијаторског напона изразом:

$$(\overline{\boldsymbol{\tau}}_B)_{tr} = \sqrt{\frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_B^e)_{tr} : (\boldsymbol{\sigma}_B^e)_{tr}} \quad (5.114)$$

Пробни правац нормале пластичног течења добијамо из једначине:

$$(\mathbf{N}_B^p)_{tr} = \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{(\boldsymbol{\sigma}_B^e)_{tr}}{(\overline{\boldsymbol{\tau}}_B)_{tr}} \quad (5.115)$$

Уз почетну претпоставку да важи:

$$(\mathbf{N}_B^p)_{n+1} = (\mathbf{N}_B^p)_{tr} \quad (5.116)$$

Долазимо до имплицитне једначине за брзину пластичне деформације микромеханизма В:

$$f_B = (\overline{\boldsymbol{\tau}}_B)_{tr} - \mu_B (T_{n+1}) \Delta t (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1} - \hat{\boldsymbol{\tau}}_B (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1}^{1/m_B} = 0 \quad (5.117)$$

коју решавамо бисекцијама. Брзина пластичне деформације на крају корака је:

$$(\mathbf{D}_B^p)_{n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1} (\mathbf{N}_B^p)_{n+1} \quad (5.118)$$

Кошијев напон микромеханизма В на крају корака је:

$$(\boldsymbol{\sigma}_B)_{n+1} = (\boldsymbol{\sigma}_B)_{tr} - \sqrt{2} \mu_B (T_{n+1}) \Delta t (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1} \quad (5.119)$$

Ефективни смичући напон на крају корака је:

$$(\bar{\tau}_B)_{n+1} = (\bar{\tau}_B)_n - \mu_B \Delta t (\dot{\gamma}_B^p)_{n+1} \quad (5.120)$$

Кошијев напон микромеханизма С на крају корака се добија директно из укупног градијента :

$$(\sigma_C)_{n+1} = \frac{\mu_C (T_{n+1})}{J_{n+1} \lambda_{SC}} \frac{L^{-1} \left(\frac{\lambda_{SC}}{\lambda_{LC}} \right) \bar{\tau}}{L^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LC}} \right) \mathbf{b}} \quad (5.121)$$

Укупни Кошијев напон на крају корака:

$$\sigma_{n+1} = (\sigma_A)_{n+1} + (\sigma_B)_{n+1} + (\sigma_C)_{n+1} \quad (5.122)$$

5.4.1 Израчунавање материјалних Јакобијана

Ради интеграције напонских имплицитних једначина Њутновом методом неопходно је дефинисати матрице материјалних Јакобијана. Сложеност модела налаже апроксимацију нумеричким диференцирањем. У случају спрегнуте термо-механичке анализе неопходно је израчунати:

- матрицу извода напона по деформацији $C_{ij} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial e_j}$
- вектор извода механичке дисипације по деформацији $\mathcal{L}_i = \frac{\partial \mathcal{P}_i}{\partial e_j}$
- вектор извода напона по температуром $\mathcal{K}_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial T}$
- извод механичке дисипације по температури $\mathcal{M} = \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial T}$
-

Запреминска генерисана топлота у јединици времена или брзину пластичне дисипације је дата релацијом:

$$\mathcal{P} = \beta (\bar{\tau}_A \dot{\gamma}_A^p + \bar{\tau}_B \dot{\gamma}_B^p) \quad (5.123)$$

док су $\bar{\tau}_A$ и $\bar{\tau}_B$ ефективни смичући напони за микромеханизме А и В срачунати на крају корака, а $\dot{\gamma}_A^p$ и $\dot{\gamma}_B^p$ одговарајуће брзине пластичне деформације за микромеханизме А и В. Коефицијент β одређује количину пластичне дисипације која се претвара у топлоту. Користећи нумеричке апроксимације представљене у [168] и [170] тангентни оператор је могуће израчунати нумеричким диференцирањем. Пертурбациони градијент се рачуна изменом само једне од шест компоненти тензора деформације у јединици времена:

$$\Delta \mathbf{F}_{\pm}^{kl} = \pm \frac{\epsilon}{2} [(\mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_l) \mathbf{F} + (\mathbf{e}_l \otimes \mathbf{e}_k) \mathbf{F}] \quad (5.124)$$

где је пертурбациони коефицијент ϵ , а \mathbf{e}_k представљају базне векторе. Коришћењем горње релације добијамо пертурбирани градијент деформације, $\Delta \mathbf{F}_{\pm}^{kl}$ као:

$$\Delta \mathbf{F}_{\pm}^{kl} = \mathbf{F} + \Delta \mathbf{F}_{\pm}^{(kl)} \quad (5.125)$$

У сваком међукораку рачуна се Кошијев тензор напона за тренутни пертурбирани градијент деформације, позитивни или негативни. Применом методе централних разлика добијамо:

$$C_{ijkl}^T = \frac{\sigma_{ij}(\mathbf{F}_{kl}^+) - \sigma_{ij}(\mathbf{F}_{kl}^-)}{2\epsilon} \quad (5.126)$$

За сваку пертурбацију \mathbf{F}_{kl}^+ или \mathbf{F}_{kl}^- добијамо једну колону матрице 6×6 C_{ijkl}^T . Неопходно је ограничити прираштај деформације у временском кораку:

$$N = \max \left\{ \text{nint} \left[\frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\epsilon_{cr}} + 0.5 \right], 1 \right\} \quad (5.127)$$

где је nint функција најближег целог броја, а $\Delta \bar{\epsilon}$ еквивалентни прираштај укупне логаритамске деформације. Деформација ϵ_{cr} је критична вредност при којој долази до течења:

$$\epsilon_{cr} = \frac{k\hat{t}}{3E_y} \quad (5.128)$$

док су k број међукорака, \hat{t} укупни напон течења за све микромеханизме и E_y модул еластичности. Уколико је $N > 1$, коришћењем градијента брзине деформације на почетку корака могуће је израчунати нове градијенте деформације:

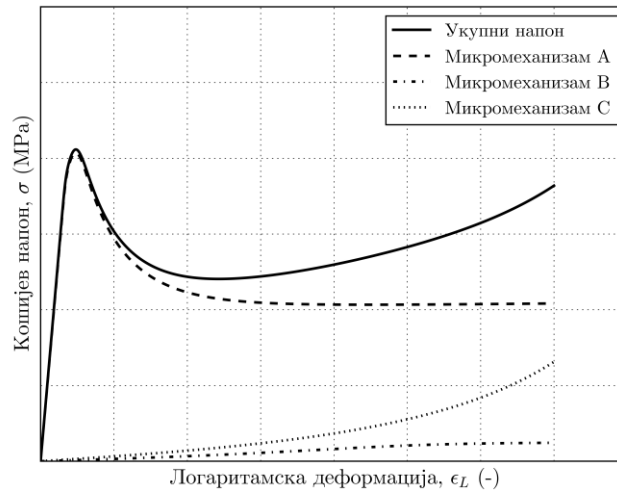
$$\mathbf{L}_n = \frac{\mathbf{F}_{n+1} - \mathbf{F}_n}{\Delta t_{n+1}} (\mathbf{F}_n)^{-1} \quad (5.129)$$

За сваки међукорак k рачуна се пертурбирани градијент деформације \mathbf{F}_k :

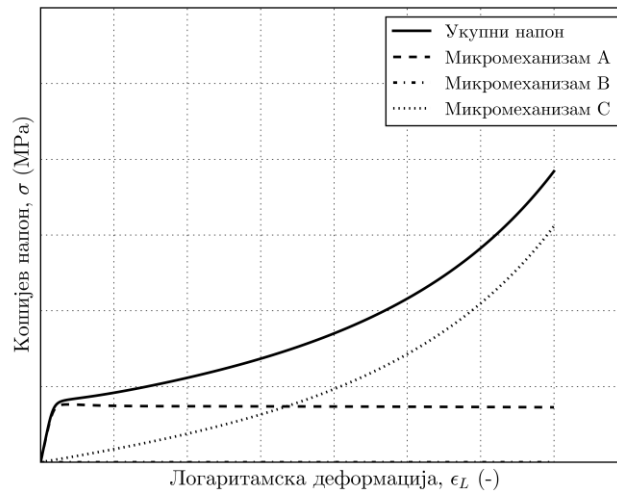
$$\mathbf{F}_k = \left(\mathbf{I} + \frac{k\Delta t_{n+1}}{N} \mathbf{L}_n \right) \mathbf{F}_n \quad (5.130)$$

5.5 Материјални параметри модела

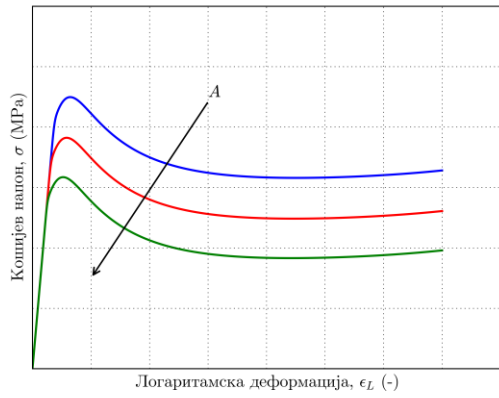
Како се кроз извођење конститутивних релација показало, и поред смањења број променљивих стања број параметара модела је и даље велики. Како ће у Поглављу 6 бити приказно за потребе естимације и оптимизације параметара развијен је једноставан алат базиран на 1Д формулацији модела. Трансформацијом једначина са 1Д на општи 3Д модел могуће је извршити потпуну естимацију целог сета параметара. Ово се напомиње зато што је неке параметре веома тешко одредити мерењем или искуствено. Параметре који описују еластично понашање материјала, $E_1, E_2, E_3, E_4, T_1, T_g, T_h$ као и напонске променљиве стања ξ_1 и ξ_2 могуће је са мањом или већом тачношћу иницијално одредити из експеримената, а затим фино подешавати кроз поступак оптимизације објашњен у Поглављу 6. Параметри чије вредности није било могуће одредити на други начин су претпостављене на почетку а затим оптимизоване поступком објашњеним у Поглављу 6. На сликама 5.12 и 5.13 приказан је утицај појединачних микромеханизма на укупни Кошијев напон за температуре испод, односно изнад T_g . На сликама 5.13 – 5.15 приказан је утицај појединачних параметара микромеханизма на криве течења.



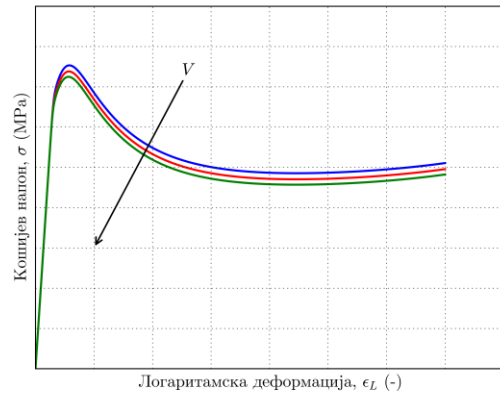
Слика 5.20: Утицај појединих микромеханизама на укупан Кошијев напон испод T_g



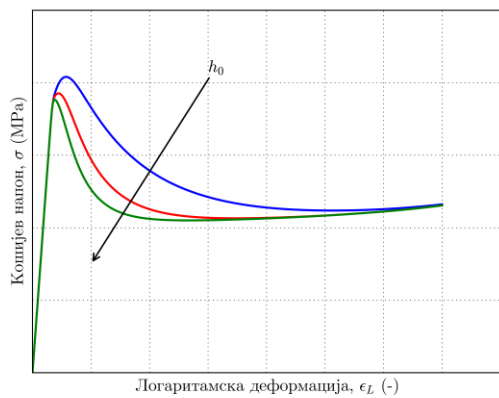
Слика 5.21: Утицај појединих микромеханизама на укупан Кошијев напон изнад T_g



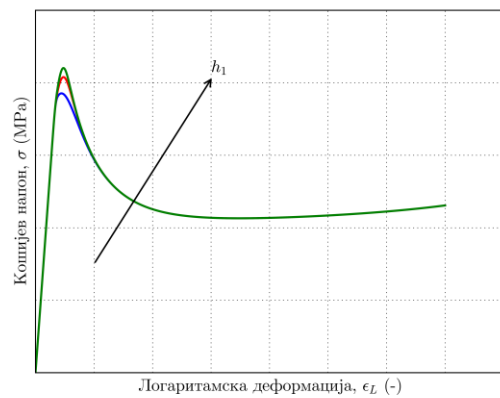
(a) A



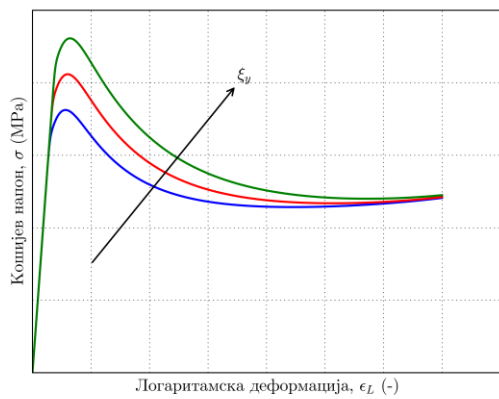
(б) V



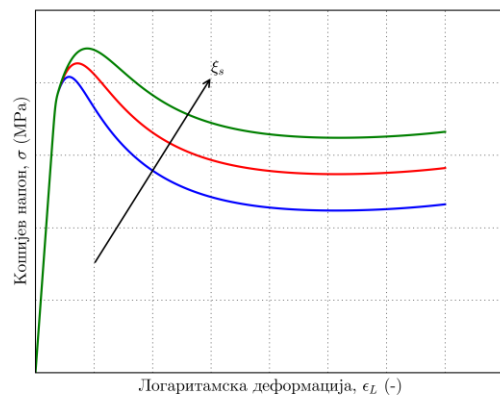
(в) h_0



(г) h_1

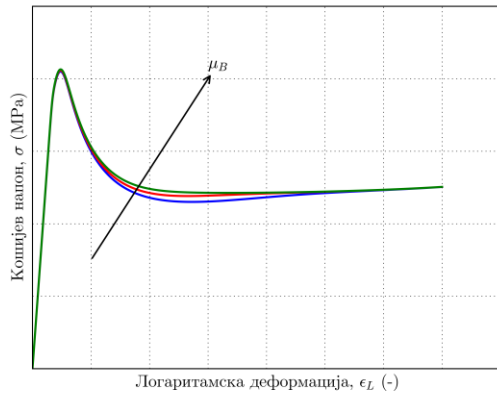


(д) ξ_y

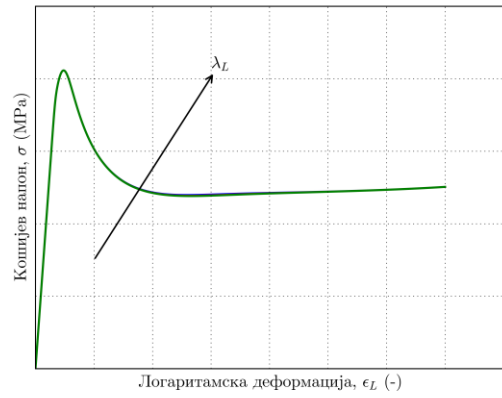


(е) ξ_s

Слика 5.22 Утицај параметара микромеханизма A на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији

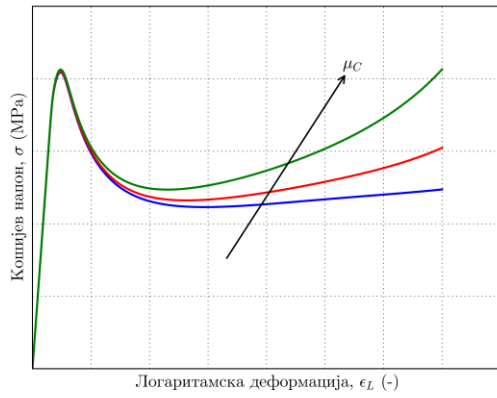


(a) μ_B

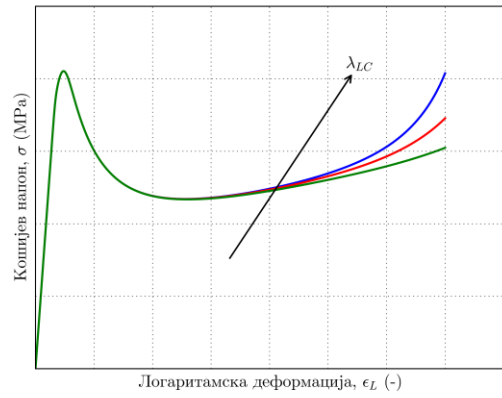


(б) λ_L

Слика 5.23 Утицај параметара микромеханизма В на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији



(a) μ_C



(б) λ_{Lc}

Слика 5.24 Утицај параметара микромеханизма С на криву течења. Смер стрелице показује растућу вредност параметара при варијацији

Микромеханизм	Параметар	ПЛА	Clear
Микромеханизм А	E_1 (MPa)	2700	2300
	E_2 (MPa)	2300	2050
	E_3 (MPa)	80	60
	E_4 (MPa)	40	38
	T_1 (MPa)	293	293
	T_g (K)	331	331
	T_h (K)	363	363
	k_1 (-)	18.45	16.5
	k_2 (-)	440.0	230.0
	k_3 (-)	38.5	38
	v_g (-)	0.36	0.36
	v_r (-)	0.495	0.495
	A_g (kJ/mol)	225	208
	A_r (kJ/mol)	70.6	60.0
	ζ (-)	0.11	0.09
	b (K)	0.012	0.01
	γ_0 (s ⁻¹)	$1.3 \cdot 10^{11}$	$1.45 \cdot 10^{11}$
	w (-)	1.26	2.3
	α_p	0.06	0.045
	V	$8.1 \cdot 10^{-28}$	$8.1 \cdot 10^{-28}$
	m_A (-)	4.1	6.2
	h_{0g} (MPa)	400	400
	h_{0r} (MPa)	30	30
	h_{1g} (MPa)	350	350
	h_{1r} (MPa)	70	70
	h_{2g} (MPa)	1.5	1.5
	h_{2r} (MPa)	0.22	0.22
	l_g (MPaK ⁻¹)	0.35	0.35
	l_r (MPaK ⁻¹)	0.002	0.002
	c (-)	0.6	0.6
	ξ_{sg} (MPa)	22	22
	ξ_{sr} (MPa)	0.075	0.075
	n_g (MPaK ⁻¹)	0.27	0.27
n_r (MPaK ⁻¹)	0.002	0.002	
ξ_{yg} (MPa)	11.0	11.0	
ξ_{yr} (MPa)	0.08	0.08	
s_g (MPaK ⁻¹)	0.1	0.1	
s_r (MPaK ⁻¹)	0.001	0.0012	
Микромеханизм В	μ_{B0} (MPa)	1.5	1.5
	λ_{LB} (-)	1.56	1.56

	\hat{t}_{Bg} (MPa)	60.0	50.0
	\hat{t}_{Br} (MPa)	0.1	0.02
	a_B (MPaK ⁻¹)	0.079	0.032
	m_B (-)	2.4	3.1
Микромеханизам С	μ_C (MPa)	0.75	0.6
	λ_{LC} (-)	1.38	1.43

Табела 5.3. Табела усвојених материјалних параметара

Параметар	ПЛА	Clear
β	0.73	0.65
k (W / mK)	0.45	0.24
c_p (kJ / kgK)	2300	2100
ρ kg / m ³	1240	1050

Табела 5.4. Табела усвојених термичких параметара

Поглавље 6

6 Идентификација материјалних параметара

6.1 Опште напомене о идентификацији параметара материјалног модела

Процес теоријске формулације и нумеричке имплементације материјалног модела не може се сматрати комплетним до његове коначне верификације поређењем са доступним експерименталним резултатима. У ту сврху неопходно је одредити групу материјалних параметара модела. Сваки материјални модел састоји се из конститутивних релација и параметара који карактеришу једначине специфичне за дати материјал. Тачност одређених параметара, уз претходно имплементирање модела, кључно утиче на тачност резултата модела, односно нумеричке симулације МКЕ. Комерцијални софтвери углавном у новијим верзијама пружају могућност идентификације параметара кроз експерименталне криве, за моделе неке од модела доступних у библиотеци модела.

Укупно гледано тема није широко обрађена специјализовано на пољу материјалних модела и остаје простора за даљи рад на том пољу. Управо су полимерни материјали у том смислу добар показатељ тежине и обима овог задатка. Како је раније изложено, иако често захтевају само испитивање притискивањем, захтевни стандарди налажу испитивање на различитим температурама и брзинама деформације. Брзинске формулације пластичности и температура зависност већине параметара носи са собом велику групу параметара које треба одредити. Број неопходних испитивања могли би да формулишемо на следећи начин:

$$n_i = n_t n_b n_p \quad (6.1)$$

где су n_t број потребних испитивања, n_t број температура на којима се испитиује n_b број брзина деформације, n_p број успешних понављања. Управо је овај последњи параметар оно што додатно отежава процес испитивања полимерних материјала. Ситуација је, заправо, још неповољнија ако се узме у обзир укупан број неуспешних, односно укупан број уопште извршених испитивања. Због саме променљиве структуре, сложених услова испитивања уз мноштво опреме дешава се често да резултати одступају једни од других значајно, да дође до промене услова испитивања или да просто нема очитаних резултата у складу са стандардима. Такви резултати се одбацују а мерења се понављају до постизања адекватних резултата. Сваки од ових тестова је изузетно временски захтеван јер припреме за један узорак могу трајати и до 90 минута. У раду је сваки од експеримената поновљен 3 пута успешно. Искуство кроз испитивање показало је да број тестова код идентификације материјала може варирати. У нашем случају фотополимери су са 2 брзине деформације и 5 брзина захтевали 59 тестова, док је у случају ПЛА са 4 брзине и 6 температура тај број био око 130. При томе, како је раније објашњено у Глави 3, нека од иницијално планираних испитивања на крају су обустављена због велике дисперзије и немогућности читавања резултата у датим мерним условима. Узевши све

у обзир, број тестова може бити енорман што намеће идентификацију параметара модела употребом мањег броја тестова и креирање тзв. виртуелних експеримената кроз оптимизацију употребом модела. Једноставни материјални модели могу се калибрисати и мануелним подешавањем параметара кроз низ неуспешних покушаја и корекција. Ипак код модела који имају велики број параметара и треба да задовоље широку групу тестова овај задатак је временски скуп и готово неизводљив уз постизање одговарајуће тачности.



Слика 6.1: Дијаграм добијања материјалних параметара [32]

Према [32] почетне параметре је могуће одредити на два начина:

- Монте-Карло оптимизациони метод где се сваком параметару модела задају гранични интервали а затим се генерише произвољна вредност за сваки параметар у задатом интервалу, и врши се идентификација мерењем грешке
- познавање природе материјала

На ова запажања, овде износимо још једно. Велико искуство у самом процесу како израде узорака али и извођења експеримената од велике је важности за идентификацију параметара. Ово је чест случај код испитивања метала, где се параметри, чији број код модела пластичности није значајан, могу одредити са довољном тачношћу искуствено, а затим даље калибрисати кроз неколико покушаја. Ипак треба водити рачуна јер лош иницијални одабир може изазвати да минимизациони алгоритам уђе у проблем са нежељеним локалним минимумом, а може такође значајно успорити процедуру добијања параметара.

Након симулације експеримента коришћењем материјалног модела неопходно је израчунати величину грешке у предикцији модела. Уколико је експеримент изведен у контроли деформације, симулација се изводи истом историјом деформације, при чему се грешка између предикције вредности напона модела и експерименталних података користи за евалуацију тачности предикција модела. Грешка предикције дата је:

$$e=f(\sigma_m-\sigma_e) \quad (6.2)$$

Где σ_m представља вектор напона добијен материјалним моделом, а σ_e вектор напона добијен експерименталним испитивањима. Функцију f у (6.2) могуће је добити на следећи начин:

- Нормализовану разлику квадрата корена:

$$f(y_m, y_e) = \frac{\sqrt{\langle (y_m - y_e)^2 \rangle}}{\sqrt{\langle (y_e)^2 \rangle}} \quad (6.3)$$

- Нормализована средња апсолутна разлика:

$$f(y_m, y_e) = \frac{\langle |y_m - y_e| \rangle}{\langle |y_e| \rangle} \quad (6.4)$$

- Коefицијент R^2 :

$$f(y_m, y_e) = 1 - \frac{\sum_1^n ((y_m)_i - (y_e)_i)^2}{\sum_1^n ((y_i)_e - \langle y_e \rangle)^2} \quad (6.5)$$

Калибрација параметара материјалних модела није широко обрађивана како у радовима и литератури уопште. Најшири преглед поступака и модела калибрације, директно повезаних са материјалним моделима МКЕ, дат је у [32]. Нека од решења предложена су у [123,161,162]. Предложена решења се могу свести на неколико општих тачака:

- поједностављивање модела на 1Д формулацију
- искуствено одређивање почетних параметара
- употреба програма за рад са табелама или функција у скрипт језицима за смањивање грешке између резултата мерења и модела

Закључујемо да су кораци које треба задати у процесу верификације материјалног модела полимера следећи:

- спровођење неопходних тестова на свим температурама ибрзинама деформације
- претпостављање иницијалне групе параметара модела, најчешће искуствено
- пронаћи јединствену групу параметара која ће преко предложеног модела дати задовољавајуће резултате за све спроведене експерименте

6.2 1Д материјални модел

У овом поглављу представљен је 1Д материјални модел коришћен у оквиру оптимизационог алгорита. Због дужине овде представљамо облик модела за ниже температуре испитивања. Формулисани 1Д материјални модел је написан у програмском језику python и интегрисан у цео оптимизациони алат приказан на Слици 6.3 ради симулација и утврђивања материјалних параметара. Треба нагласити да овакви модели апроксимативни јер не узимају у обзир попречне и запреминске деформације.

Следеће конститутивне једначине односе се на следеће основне величине:

- λ - издужење
- λ^p - пластично издужење
- $\lambda^e = \lambda(\lambda^p)^{-1}$ - еластични део издужења
- $\epsilon = \ln \lambda$ - логаритамска деформација
- $\epsilon^e = \ln \lambda^e$ - логаритамска еластична деформација
- T - температура
- σ - Кошијев напон

Коришћењем дефинисаних величина могуће је 3Д формулацију предложеног модела превести на 1Д облик. На почетку сваког корака могуће је израчунати еластичну деформацију преко једначина:

$$\lambda_A^e = \lambda(\lambda_A^p)^{-1} \quad (6.6)$$

и

$$\lambda_B^e = \lambda(\lambda_B^p)^{-1} \quad (6.7)$$

Еластична деформација на почетку корака је:

$$\epsilon_A^e = \ln \lambda_A^e \quad (6.8)$$

Коришћењем познатих релација израчунавамо напон микромеханизма А:

$$\sigma_A = E\epsilon_A^e - E\alpha_t(T - T_0) \quad (6.9)$$

Напон σ_A представља ефективну вредност напона микромеханизма А:

$$\bar{\sigma}_A = \sigma_A, \quad \bar{p} = \frac{1}{3} \sigma_A \quad (6.10)$$

Брзина пластичне деформације дата је једначином:

$$\dot{\epsilon}_A^p = \epsilon^* \sinh^{m_A} \left(\frac{\bar{\sigma}_A V}{2k_B T} \right) \quad (6.11)$$

Израчунатом брзином пластичне деформације ажурирамо пластичну деформацију на крају корака:

$$\epsilon_A^p = \epsilon_A^p + \dot{\epsilon}_A^p \Delta t \quad (6.12)$$

Брзина пластичне деформације микромеханизма В:

$$\dot{\epsilon}_B^p = \left(\frac{\bar{\sigma}_B}{\hat{\sigma}_B} \right)^{m_B} \quad (6.13)$$

Израчунатом брзином пластичне деформације ажурирамо пластичну деформацију на крају корака:

$$\epsilon_B^p = \epsilon_B^p + \dot{\epsilon}_B^p \Delta t \quad (6.14)$$

$$\bar{\sigma}_B = \frac{\mu_B}{\lambda_{SB}} \frac{L^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_{SB}}{\lambda_{LB}} \right)}{L^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LB}} \right)} \left((\lambda_B^e)^2 - \frac{1}{\lambda_B^e} \right) \quad (6.15)$$

Напоне у микромеханизму С на крају корака добијамо изразом:

$$\bar{\sigma}_C = \frac{\mu_C}{\lambda_{SC}} \frac{L^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_{SC}}{\lambda_{LC}} \right)}{L^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LC}} \right)} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (6.16)$$

Укупни напон на крају корака је:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_A + \bar{\sigma}_B + \bar{\sigma}_C \quad (6.17)$$

Полазећи од Вон Мизесовог критеријума за другу инваријанту девијатора напона:

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2] = \frac{\sigma_0}{3} \quad (6.18)$$

даље следи:

$$J_2 = \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - (\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2) = \sigma_0 \quad (6.19)$$

Еквивалентни напон је у општем случају:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{33}\sigma_{11} + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)} \quad (6.20)$$

За равански проблем једначина има облик:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + 3\tau_{12}^2} \quad (6.21)$$

док у случају чистог смицања можемо писати:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3\tau_{12}^2} \quad (6.22)$$

што коначно даје везу:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3}\bar{\tau} \quad (6.23)$$

На основу горње једначине добијене вредности материјалних параметара могуће је трансформацијом превести на општи облик:

$$\bar{\tau}\dot{\gamma} = \sigma\dot{\epsilon} \quad (6.24)$$

и коначна веза:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}} \quad (6.25)$$

Аналогно, могуће је наћи везу вредности материјалних параметара 1Д и 3Д модела следећим формулама:

$$\alpha_p^{1D} = \sqrt{3} \alpha_p^{3D} \quad (6.26)$$

$$\widehat{\sigma}_B^{1D} = \sqrt{3} \widehat{\tau}_B^{3D} \quad (6.27)$$

$$V^{1D} = \frac{1}{\sqrt{3}} V^{3D} \quad (6.28)$$

$$h_0^{1D} = \sqrt{3} h_0^{3D} \quad (6.29)$$

$$h_1^{1D} = \sqrt{3} h_1^{3D} \quad (6.30)$$

$$\xi_y^{1D} = \sqrt{3} \xi_y^{3D} \quad (6.31)$$

$$\xi_s^{1D} = \sqrt{3} \xi_s^{3D} \quad (6.32)$$

$$\mu_B^{1D} = \sqrt{3} \mu_B^{3D} \quad (6.33)$$

$$\mu_C^{1D} = \sqrt{3} \mu_C^{3D} \quad (6.34)$$

У једначинама (6.27) - (6.35) индекси 1D и 3D означавају вредности материјалних параметара у 1Д односно 3Д формулацији. Вредност еластичног модула Е могуће је израчунати након усвајања вредности Поасоновог коефицијента. Као што се из једначина (6.27) - (6.35) може видети параметре А, ζ , m_A , m_B , λ_{LB} , λ_{LC} није потребно преачунавати.

6.3 Идентификациони алат за одређивање параметара модела

Ипак, један од изазова јесте коришћење софтвера отвореног кода за креирање идентификационог алата који би служио као веза између поједностављених конститутивних релација модела и солвера МКЕ софтвера отвореног кода. Процедура одређивања параметара и касније верификације материјалног модела у МКЕ приказана је на слици 6.2.. Као што се са ове поједностављене шеме може видети, проблем се може разложити на три дела:

- прикупљање података и формулација - обављање експеримената, дефинисање почетних параметера, формулисање 1Д модела и адаптација података за даљу поступак
- идентификација - прослеђени подаци из почетне фазе се путем изабране функције оптимизације итеративно рачунају и минимизира се функција грешке
- верификација - оптимизовани параметри модела се адаптирају за 3Д модел и покреће се симулација у МКЕ одабраним солвером

При идентификацији параметара, у општем случају, неопходно је имати полазни математички модел, поредбене вредности и почетне параметре модела. Према приказаној шеми може се успоставити аналогија у случају калибрације материјалног модела за МКЕ. У нашем случају, математички модел је поједностављени 1Д материјални модел који се калибрише, поредбене вредности су вредности експеримената спроведених испитивањем материјала, док су почетни параметри иницијално претпостављени материјални параметри модела.



Слика 6.2: Алгоритам индентификације материјалних параметара помоћу индентификационог алата

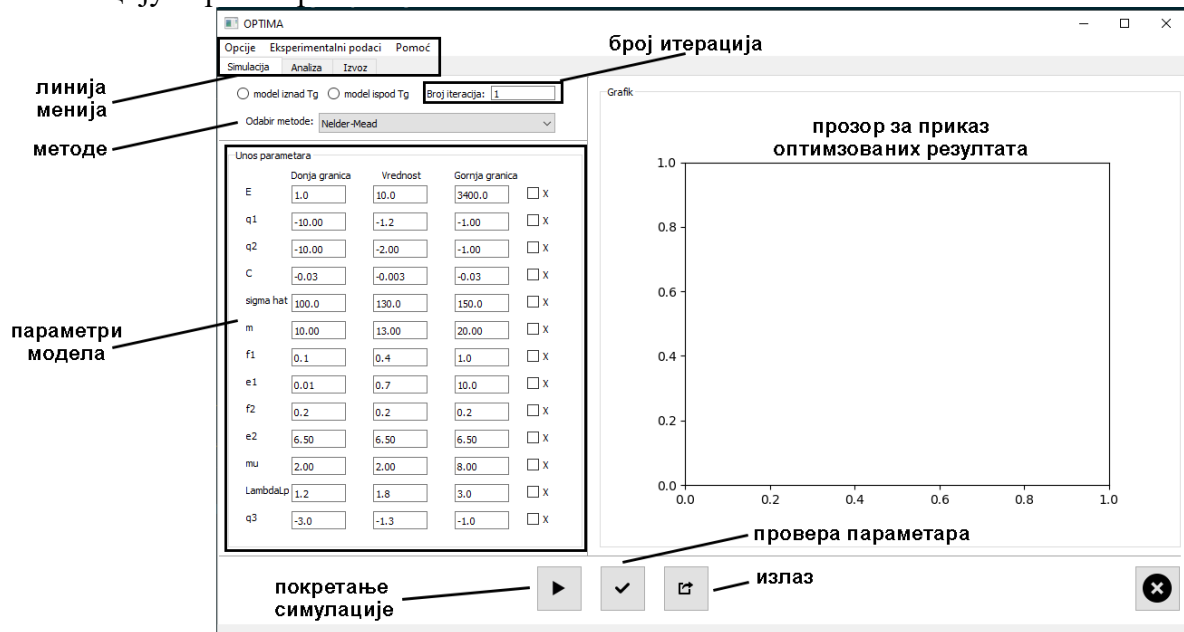
Предикције модела пореде се са експерименталним подацима, а добијена разлика користи се за израчунавање вредности скаларне грешке предикције. Коначно, користи се нумерички алгоритам минимизације како би се утврдила нова група материјалних параметара и процедура се понавља до постизања следећег побољшања предикције. Ова процедура може се дати у облику проблема математичке минимизације:

$$\min \sum_{i=1}^N f(\mathbf{M}^i(\xi) - \mathbf{E}^i) \quad (6.35)$$

где ξ представља вектор материјалних параметара које треба оптимизовати, N је број група експерименталних података, f је функција за израчунавање вредности грешке предикције, $\mathbf{M}^i(\xi)$ је предикција модела i -тих експерименталних података, \mathbf{E}^i i -та група експерименталних података, било напона или деформације. Као што је приказано, први корак је симулирање експерименталних услова испитивања коришћењем одабраног материјалног модела уз коришћење иницијалних материјалних параметара. Ова формулација, која се назива и проблем нелинеарног програмирања: 1) добра стратегија одређивања иницијалних материјалних параметара, 2) одабир одговарајућег мерења грешке функције f , 3) коришћење погодног нелинеарног оптимизационог решавања.

Алат који је коришћен за идентификацију параметара првобитно је развијен као програм из командне линије (енг. *CLI - command line interface*) а након тестирања и развоја

преточен је у графички кориснички интерфејс (енг. *GUI - graphical user interface*) који је знатно погоднији за рад. На Слици 6.3. је приказано радно окружење идентификационог алата за анализу и оптимизацију параметара.



Слика 6.3: Изглед графичког корисничког интерфејса идентификационог алата

Поглавље 7

7 Нумерички примери

Циљ сваког научног истраживања јесте примена у реалним или практичним условима. Након представљања комплетне процедуре добијања експерименталних резултата и верификовања кроз поређење са резултатима модела биће представљено неколико нумеричких примера. Сваки од наведених примера има улогу да прикаже једну од битних карактеристика модела: тачност, поузданост и робусност. Напомена је да изложени примери нису верификациони већ су изведени са циљем показивања ових наведених карактеристика. Примери су:

- нумеричка симулација слободног обнављања облика ПЛА материјала прогревањем након деформације
- поређење експерименталних резултата обнове облика код фотополимера са предвиђањем модела
- симулирање адијабатског загревања у узорцима од ПЛА материјала при брзинама деформације 0.1 s^{-1} и 0.01 s^{-1}
- симулација обнове облика у сложеној чланковитој структури
- нумеричка симулација убацивања полимерног стента у артерију

7.1 Пример враћања облика у узорку од ПЛА прогревањем

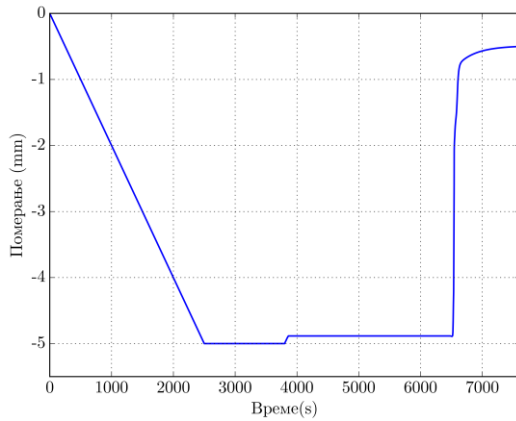
Цилиндрични узорак истих димензија које су коришћене у експериментима изнетим у Глави 3 (висина и пречник 10 mm) коришћен је при симулацији обнове облика прогревањем у оквиру термо-механичког циклуса. Како је поређење резултата модела и експеримената приказано у Глави 5, пример приказан овде има за циљ чисто нумерички приказ поља температуре и померања која су добијена МКЕ симулацијом спроведене у [30]. У симулацији обнове облика коришћени су исти услови као у експерименту, узорак је сабијен притисном плочом до висине која одговара 50% почетне висине, брзином деформације 0.0001 s^{-1} . При моделирању коришћене су предности симетрије, моделирана је само осмина узорка са 388 С3D8НТ елемената. Гранични услови притисне плоче задати су кроз брзину деформације. Гранични услови хлађења и загревања задати су на спољашњој површини моделираног узорка, кроз коефицијент површинске конвекције. Дијаграм промене температуре узорка приказан је на Слици 7.1а.

Процес симулације је следећи:

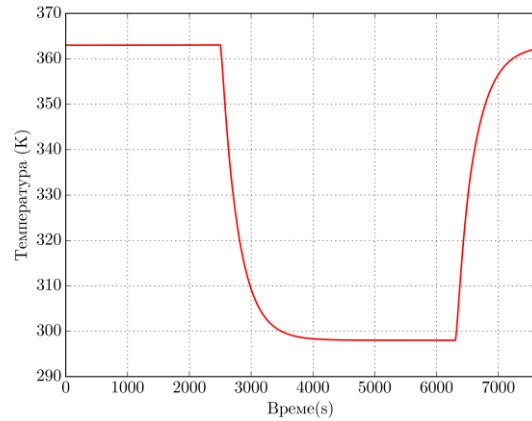
- при константној температури од 363 K (90 °C) узорак је притиснут брзином деформације од 0.0001 s^{-1} до висине 5 mm
- хлађење узорка до 298 K (25 °C) уз задржавање претходних кинематских ограничења
- охлађени узорак се растеређује
- обнова облика загревањем узорка до почетне температуре 363 K (90 °C)
-

Слика 7.2 даје упоредни приказ поља температуре и померања током деформисања узорка, На Слици 7.3 приказана су поља температуре и померања током растеређења и загревања до обнове облика.

На Слици 7.3 се може видети да при прогревању узорака обод цилиндра има за $\approx 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вишу температуру све до преласка транзиционе температуре. Ово резултира тиме да рубни делови цилиндра почињу враћање у трајни облик раније у односу на централни део узорка, правећи облик приказан на Сликама 7.2д и 7.2е. Као што се може видети у том тренутку температура на ивици је 338 K у односу на 334.5 K у средишту узорка, чиме се показује да и при малим променама температуре у граничном појасу око T_g долази до тренутне промене механичких карактеристика и обнове облика. У табели 7.1 дат је



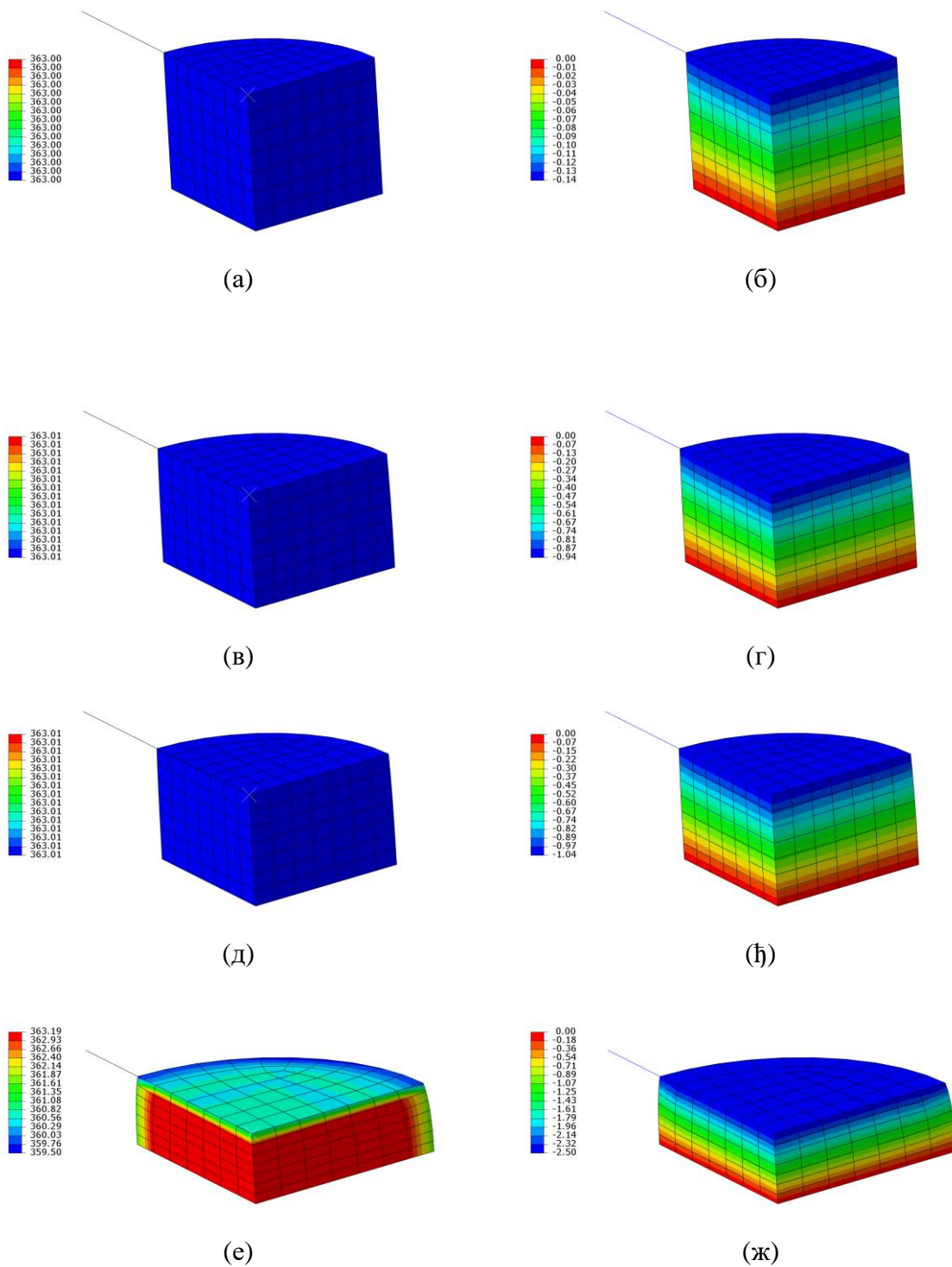
(а) померања



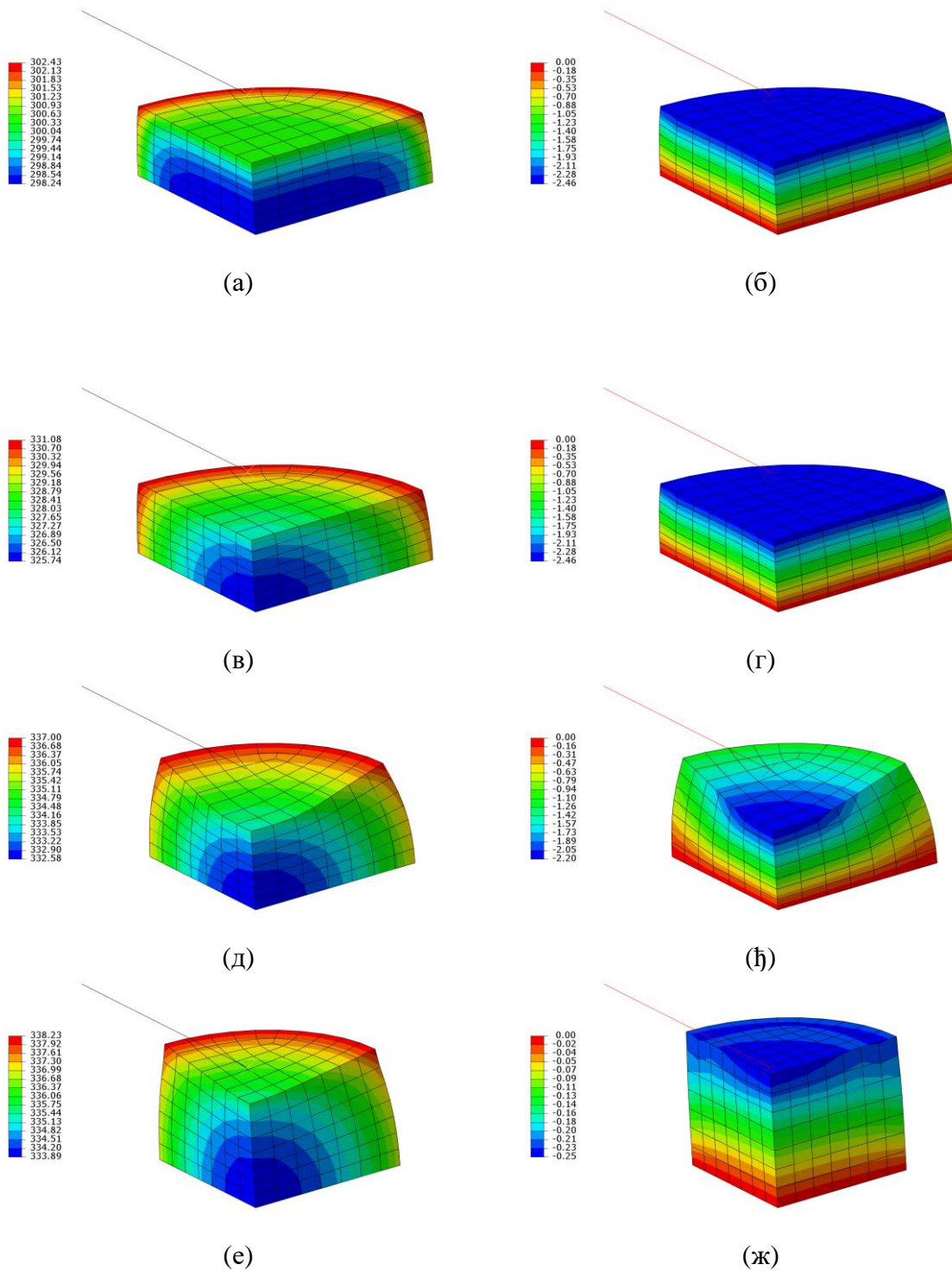
(б) температура

Слика 7.1: Промене температуре и померања средишњег чвора горње површине узорка у току времена

упоредни приказ времена у симулацији и потребног броја корака за завршетак појединачних фаза симулације.



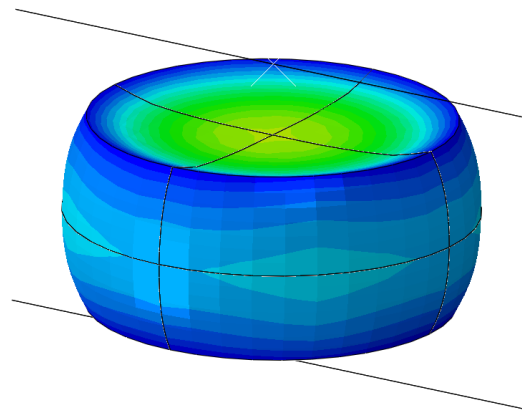
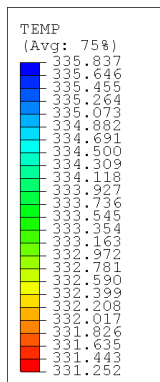
Слика 7.2: Упоредни приказ поља температуре (колона лево) и померања (колона десно) током деформисања у термо-механичком циклусу



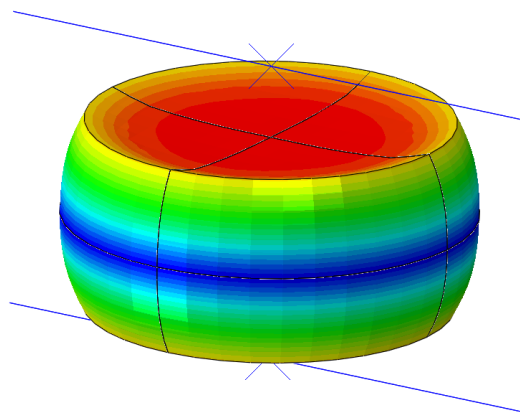
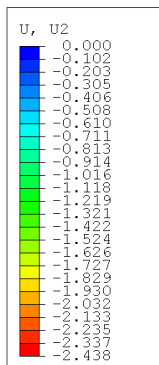
Слика 7.3: Упоредни приказ поља температуре (колона лево) и померања (колона десно) током загревања у термо-механичком циклусу

Фаза симулације	Време	Број корака
деформисање при $T > T_g$	2500s	157
хлађење до $T < T_g$	1300s	300
растерећење	2500s	157
загревање до $T > T_g$	1300s	360
Укупно	7600s	914

Табела 7.1 Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика цилиндричних узорка

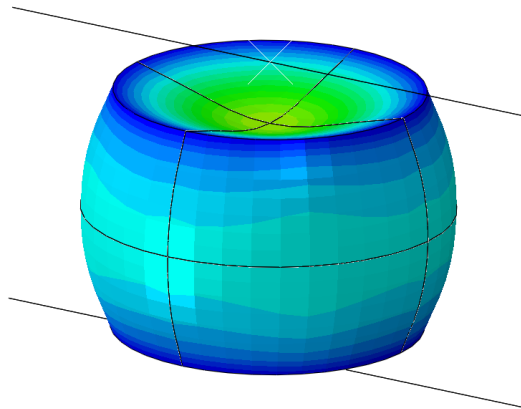
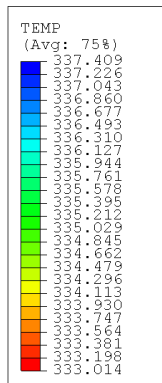


(а) температуре

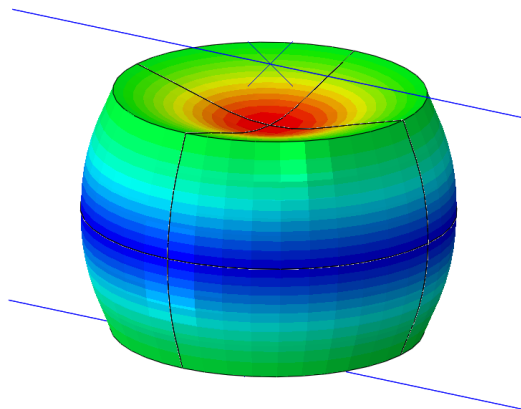
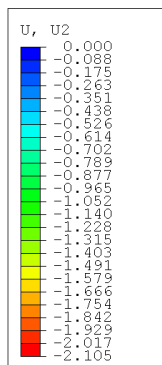


(б) померања

Слика 7.4: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 335 К

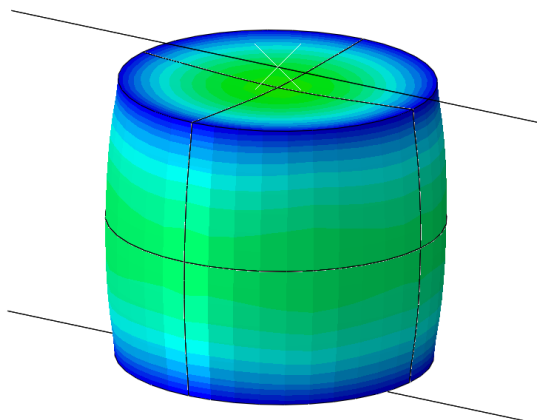
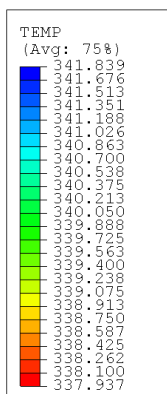


(a) температуре

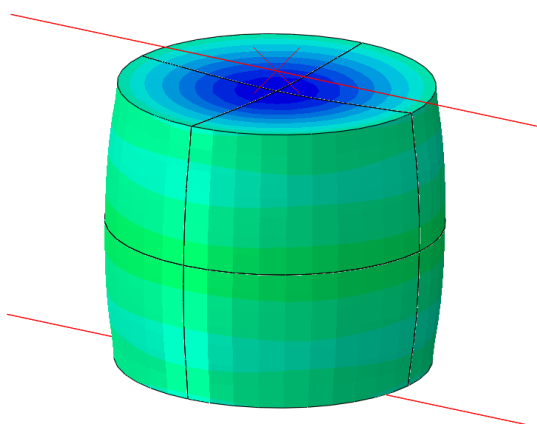
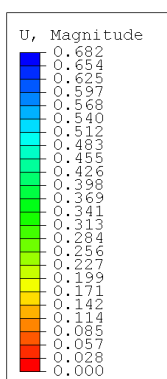


(б) померања

Слика 7.5: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 338 К

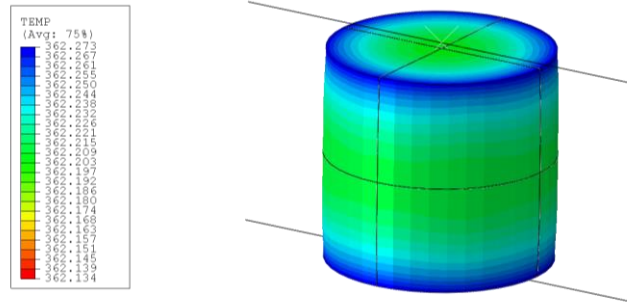


(a) температуре

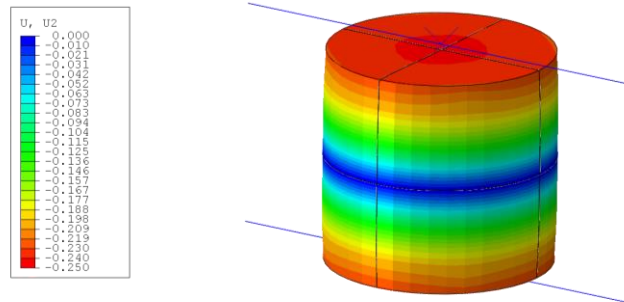


(б) померања

Слика 7.6: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 341 К

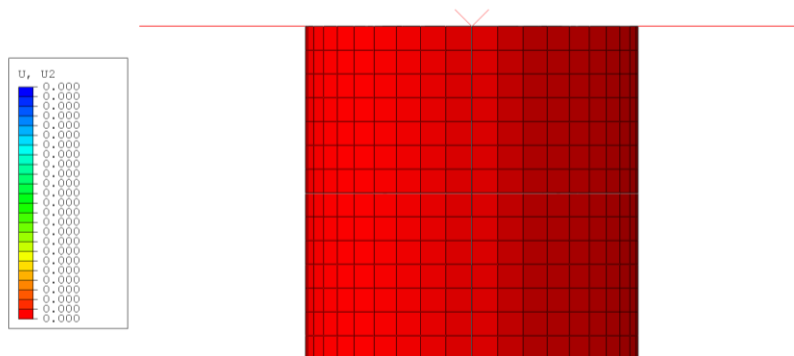


(а) изглед узорка пре притискивања

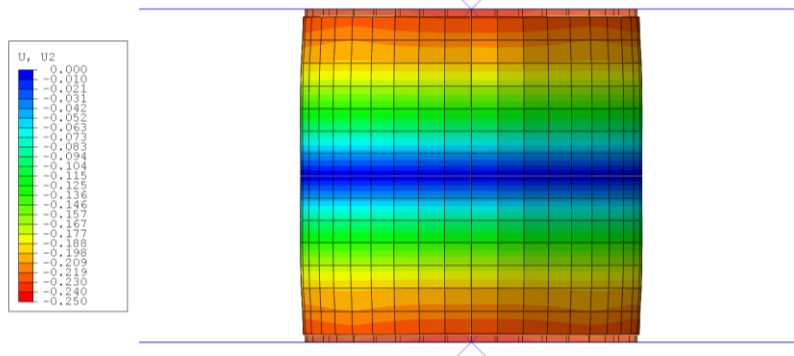


(б) изгледа узорка након загревања

Слика 7.7: Температуре (горе) и померања (доле) на цилиндричном узорку при температури 362 К



(а) изглед узорка пре притискивања



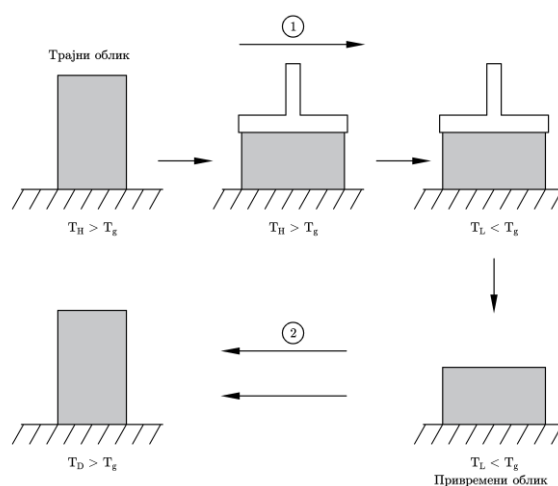
(б) изгледа узорка након загревања

Слика 7.8: Изглед цилиндричног узорка пре притискивања (горе) и након загревања (доле). На слици узорка након загревања дат је упоредни приказ почетног и крајњег профила узорка

7.2 Ефекат памћења облика у фотополимерима

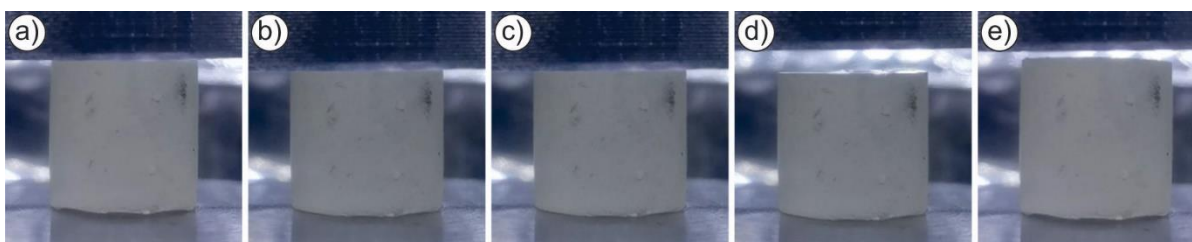
Узорак димензија 3 mm и 3 mm, направљен од фотополимерне смоле Clear испитан је у термо-механичком циклусу обнове облика. Испитивање је извршено брзином деформације 0.01 s^{-1} . Шематски приказ експерименталне процедуре дат је на Слици 7.9. Експеримент се одвија у неколико приказаних корака:

- загревање до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ и притискивање до деформације 10% почетне висине
- хлађење до температуре $23 \text{ }^\circ\text{C}$ уз задржавање ограничења
- уклањање ограничења и загревање до $90 \text{ }^\circ\text{C}$

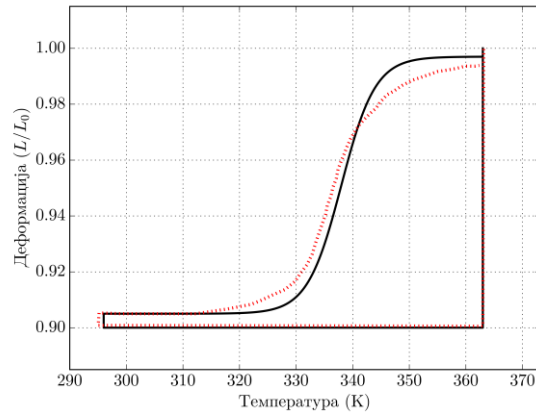


Слика 7.9: Шематски приказ термо-механичког циклуса за фотополимер. Део шеме означен са 1 - деформисање при високој температури, 2 - процес обнове облика загревањем

На Слици 7.10 приказан је експериментални процес слободне обнове облика загревањем. При моделирању мреже узорка коришћене су предности изложене у Примеру 1, услови симетрије и задата брзина деформације преко притисне плоче на горњој површини узорка. Прогревавање и хлађење је задато као гранични услов преко површине узорка и са коефицијентом конвекције.



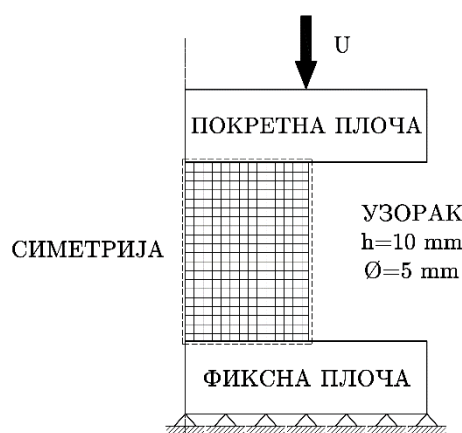
Слика 7.10: Сlike експеримента слободне обнове облика узорка од фотополимера: (a) почетак деформисања на $90 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) крај деформисања $90 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) ограничено хлађење до $23 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) уклањање ограничења при $23 \text{ }^\circ\text{C}$, (e) слободна обнова облика загревањем до $90 \text{ }^\circ\text{C}$



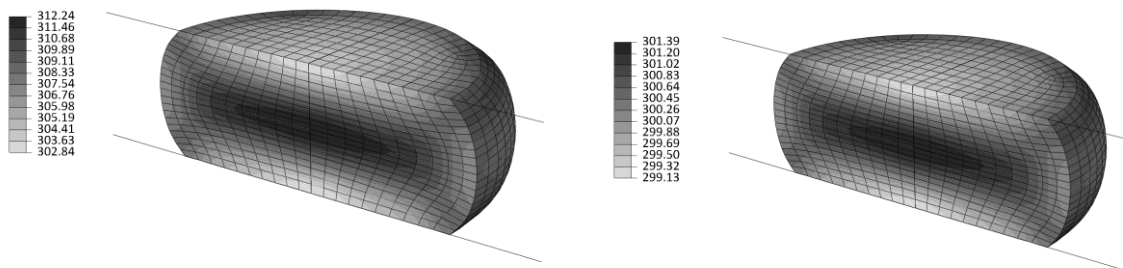
Слика 7.11: Промена деформације при загревању у узорцима од фотополимера након деформације од 10%

7.3 Симулације притиска цилиндричних узорака

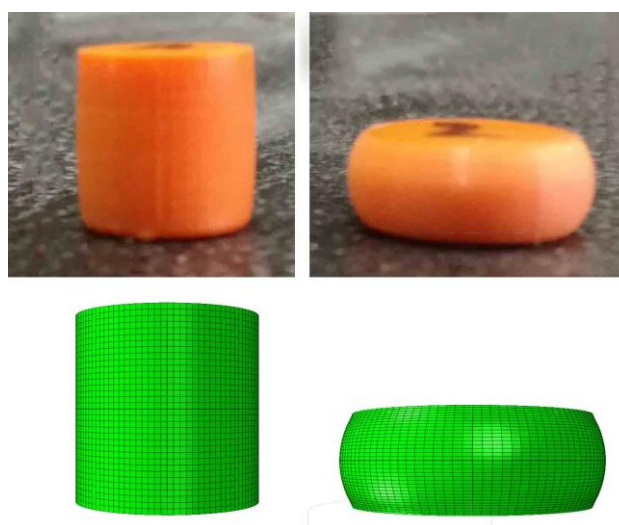
У овом примеру, једноосни тестови притиска на цилиндричним узорцима симулиран је при две брзине деформације и на собној температури (25 °C). Слика 7.12 приказује мрежу и граничне услове симулације притискивања. У симулацији је коришћен материјални модел представљен у Поглављу 5. Притисна и фиксирана плоча моделирани су као круто тело. Доњој плочи спречена су померања у свим правцима, као и све ротације. Горњој притисној плочи задато је померање у функцији времена, према експерименталним подацима. Ради смањења времена трајања прорачуна, симулирана је само четвртина цилиндричног узорка уз примену симетричних граничних услова на свим равнима пресека. Цилиндрични узорак моделиран је са 488 C3D8HT елемената. Слика 7.13 приказује вредности и дистрибуцију температуре у цилиндричним узорцима при две различите брзине 0.01 s^{-1} и 0.001 s^{-1} , које одговарају експерименталним условима.



Слика 7.12: Шематски приказ мреже и граничних услова

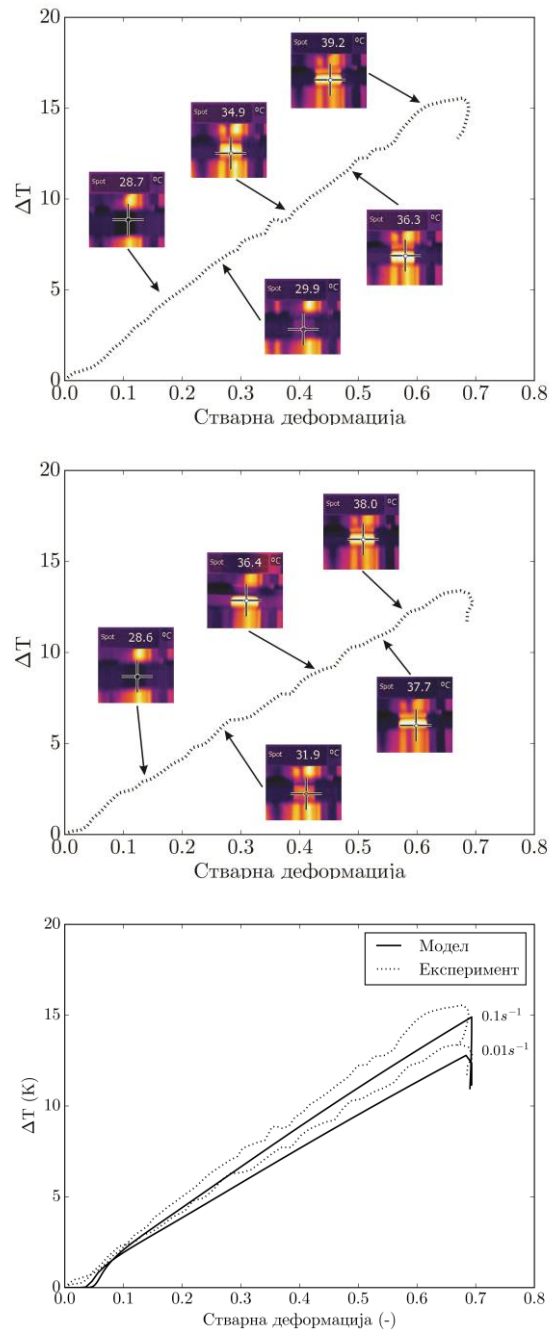


(a) 0.01 s^{-1} , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (б) 0.001 s^{-1} , $25 \text{ }^\circ\text{C}$
 Слика 7.13: Поље температура на попречном пресеку узорка



Слика 7.14: Поређење профила узорка након испитивања (ред горе) и симулације (ред доле)

Профил узорка добијених симулацијом поређен је са профилем узорка из експеримената. Како се види на Слици 7.14 симулација даје довољно реална предвиђања буричастог облика. На Слици 7.15 приказани су резултати два мерења промене температуре узорка при великим брзинама деформације са предвиђањем материјалног модела.

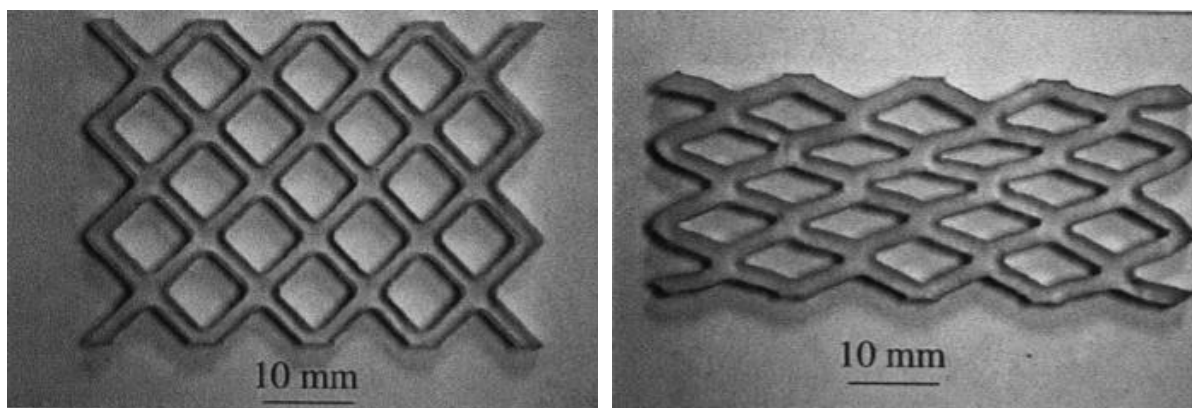


Слика 7.15: Поређење резултата добијених мерењем термо-визијском камером и резултата модела

7.4 Ефекат памћења облика у чланковитој дијамантској структури

Како би се показала ефикасност модела користимо структуру сложене геометрије приказане у [123]. Изглед сложене чланковите дијамантске структуре, ширине 50 mm, 35 mm, 3 mm приказан је на Слици 7.16. Сваки од чланака је квадратног облика странице 6.5 mm и радијуса углава 1 mm. Ширина странице сваког чланка је 2.16 mm. Експеримент приказан у раду [123] састоји се од следећег термо-механичког циклуса:

- смањивање висине узорка притискивањем на повишеној температури брзином деформације 0.02 mm/s
- хлађење узорка до собне температуре уз задржавање кинематских ограничења
- уклањање кинематских ограничења уз загревање узорка до температуре почетног испитивања



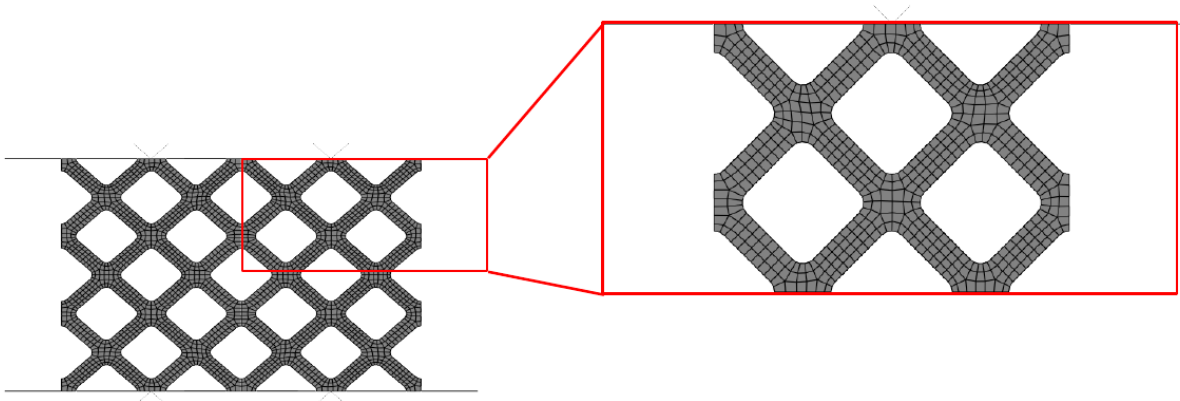
Слика 7.16: Узорак чланковите дијамантске структуре

Како је приказано на Слици 7.17 због симетрије модела израђена је осмина целе структуре. На Слици 7.18 приказан је цео модел структуре са укљученим равнима симетрије. На Слици 7.19 приказана је осмина моделираног узорка са мрежом коначних елемената. Модел је израђен од 1064 C3D8HT термо-механички спрегнутих елемената. У Табели 7.2 дат је упоредни приказ времена у симулацији и потребног броја корака за завршетак појединачних фаза симулације.

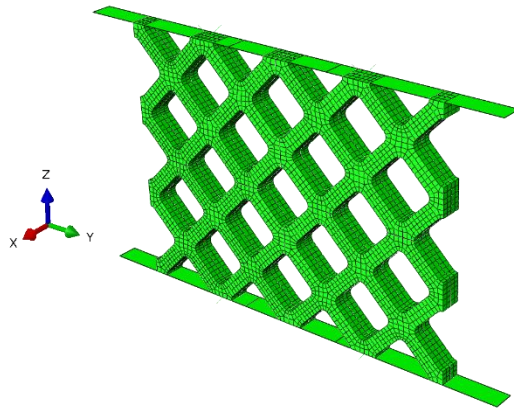
Фаза симулације	Време	Број корака
Деформисање брзином 0.02 mm / s при $T > T_g$	25s	667
хлађење до $T < T_g$	300s	98
растеређење	10s	54
загревање до $T > T_g$	300s	186
Укупно	636s	1005

Табела 7.2: Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика чланковите структуре

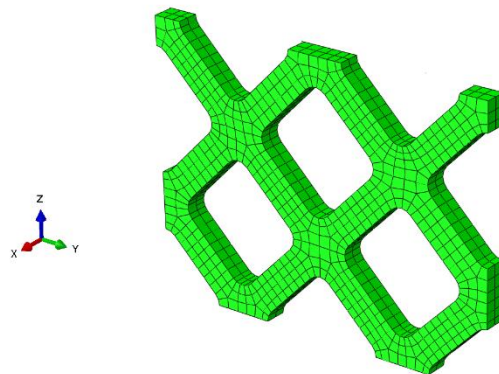
На Слици 7.21 приказане су слике узорка током представљеног термо-механичког циклуса у току слободне обнове облика (лево) и резултати симулације материјалним моделом (десно).



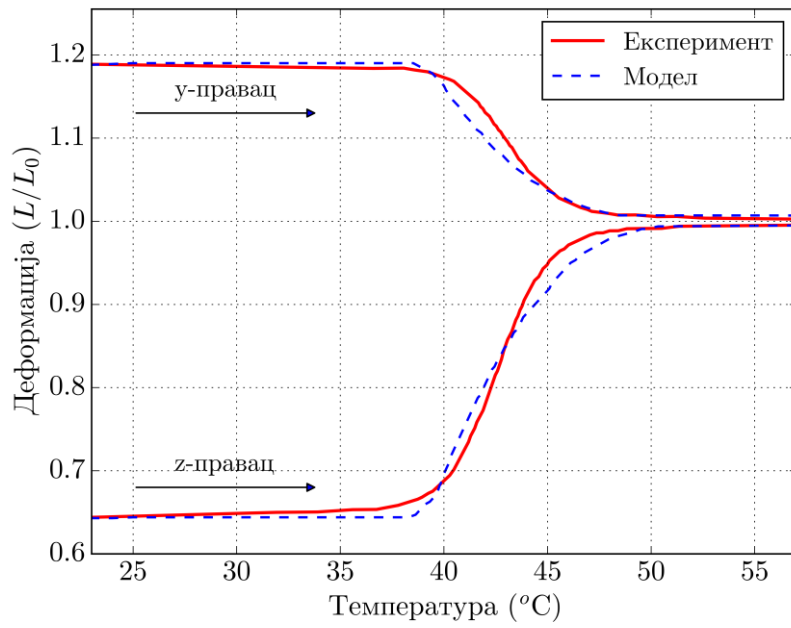
Слика 7.17: Издвојен део моделиране мреже из целог модела



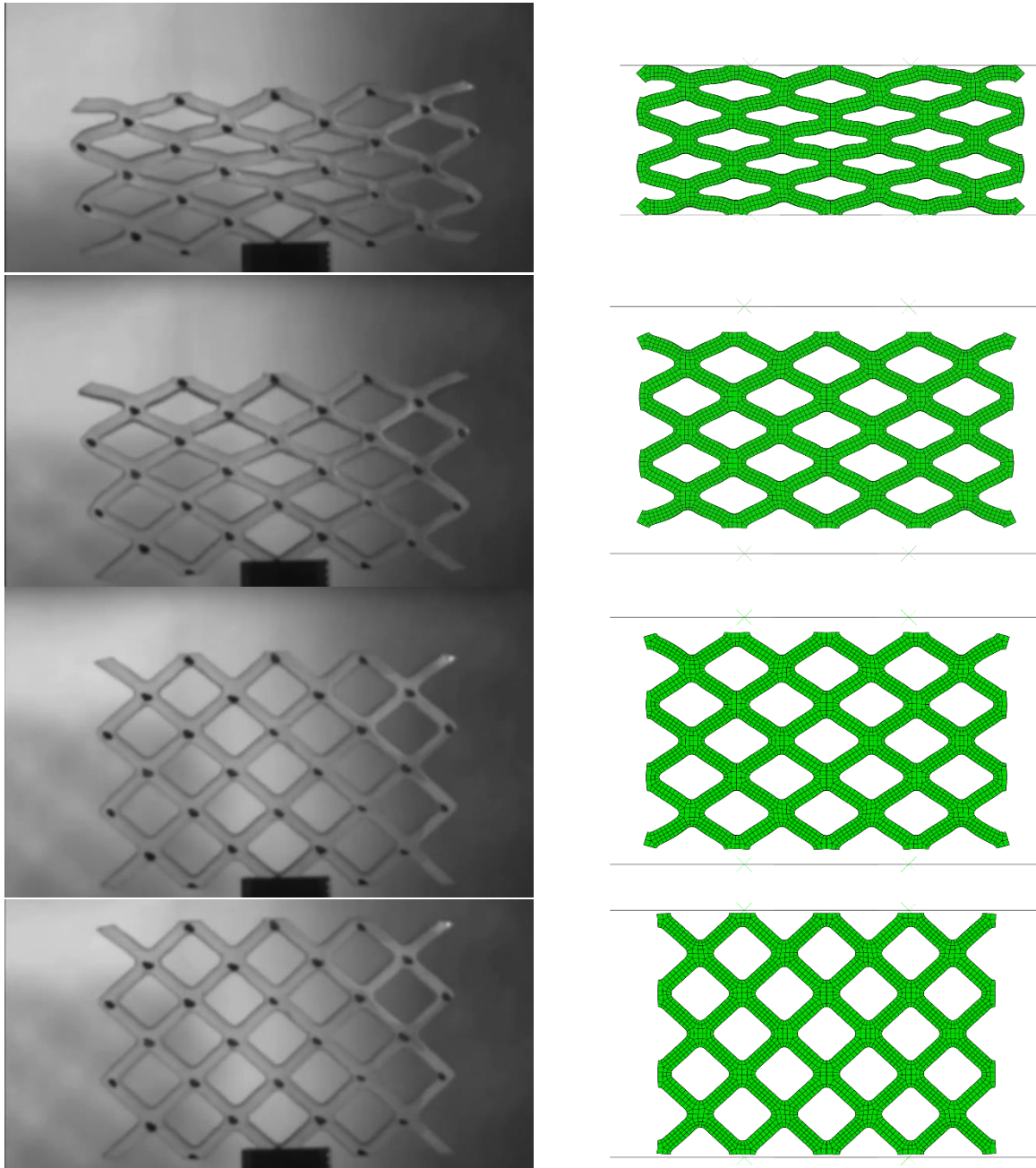
Слика 7.18: Мрежа коначних елемената на читавом моделу



Слика 7.19: Мрежа коначних елемената на осмини модела



Слика 7.20: Промена деформације при обнови облика загревањем

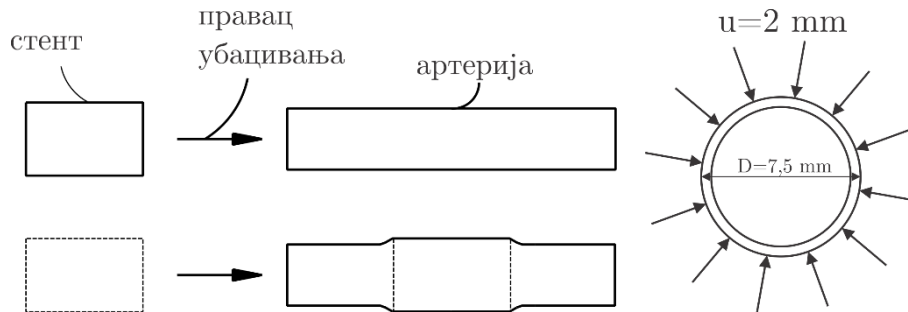


Слика 7.21: Ефекат памћења облика у чланковитој дијамантској структури

7.5 Симулација убацавања стента у артерију

Полимери са памћењем облика користе се у биомедицини за израду стентова за ширење крвних судова. Неколико студија демонстрира могућности различитих материјала за ову намену [50,171]. Стентови представљају битне биомедицинске компоненте и део су ширих студија које укључују и експерименталне и нумеричке методе [123], [138] и [122]. У приказаној симулацији коришћена је поједностављена геометрија стента и артерије. Главни циљ овог примера је да покаже ефикасност усвојеног термо-механичког модела, као и робусност интеграционе процедуре у целини. Цилиндрични стент моделиран је представљеним материјалним моделом и параметрима ПЛА полимера. Почетна дужина стента је 10 mm, спољашњи пречник 7 mm и унутрашњи

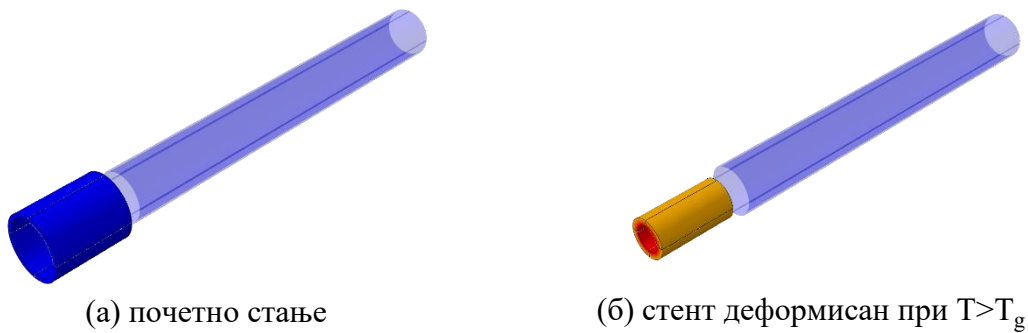
пречник 6 mm. Артерија је моделирана као цев унутрашњег пречника 6 mm и дебљине зида 0.5 mm, дужине 100 mm. Артерија је моделирана као нестишљиви хипереластични модел модула смицања 0.1 МПа. Шематски приказ процедуре убацивања стента приказан је на Слици 7.22.



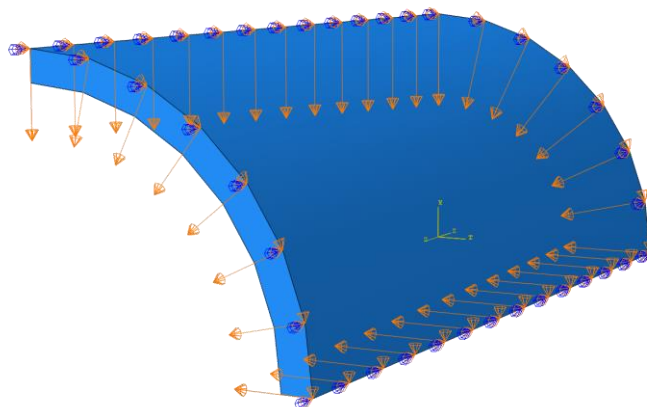
Како је на Слици 7.23 приказано, термо-механички циклус уметања стента састоји се из 4 фазе:

- на повишеној температури од 90 °C, стент је радијално оптерећен, при чему му се спољашњи пречник смањује на 5.5 mm (унутрашњи пречник артерије је 6 mm)
- стент се хлади до температуре 23 °C, уз спречена радијална померања, чиме се постиже фиксација облика
- уклањање ограничења и релаксација стента
- транслација стента на жељено место у артерији
- загревање стента до почетне температуре, изнад транзиционе, чиме се постиже ефекат обнове облика

Симулирање описаног модела спроведено је у ABAQUS/Standard [30]. Како је систем симетричан, стент је моделиран као 1/4 укупне геометрије, са 3024 C3D8HT елемената. На почетној температури свим чворовима на спољашњој површини стента задата су радијална померања у цилиндричном координатном систему као на Слици 7.24. Предности симетрије коришћене су и при моделирању мреже артерије. Артерија је моделирана као четвртина целокупне геометрије, коришћењем 1000 елемената C3D8H. Гранични услови за артерију су: спречена померања чворова у равнима управним на осу стента и задате симетрије дуж тангентних праваца цилиндричног координатног система. Такође спречене транслације свих чворова артерије дуж аксијалне осе z. Контакт између спољашње површине стента и унутрашње површине артерије моделиран је без трења.



(в) стент уметнут у артерију при $T < T_g$ (г) обновљен облик стента загревањем
Слика 7.23: Приказ фаза симулације убацивања стента у артерију



Слика 7.24: Изометријски приказ задатих померања при радијалној компресији стента

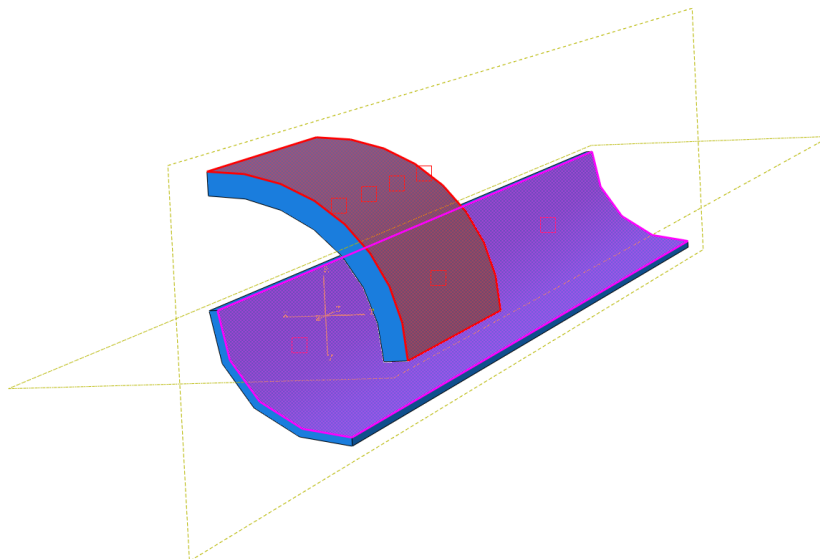
Како је показано на Слици 7.27 на почетку симулације пречник стента је већи од унутрашњег пречника артерије. Након компресије и хлађења постиже се фиксација привременог облика у стенту. Стент је након тога убачен у артерију. Коначно, загревањем стента преко границе транзиционе температуре постиже се ефекат обнове облика што резултује ширењем крвног суда чији је унутрашњи почетни пречник мањи од спољашњег пречника стента након обнове облика. Предвиђања симулације као и вредности спољашњег пречника представљене су на Слици 7.28. Са дијаграма се види да спољашњи пречник стента, са почетних 5.5 mm након радијалне компресије, достиже пречник од 7.24 mm на крају симулације при загревању.

На слици 7.30 приказана су поља померања и логаритамске деформације на крају симулације убацивања стента у артерију. У табели 7.3 дат је упоредни приказ времена у симулацији и потребног броја корака за завршетак појединачних фаза симулације.

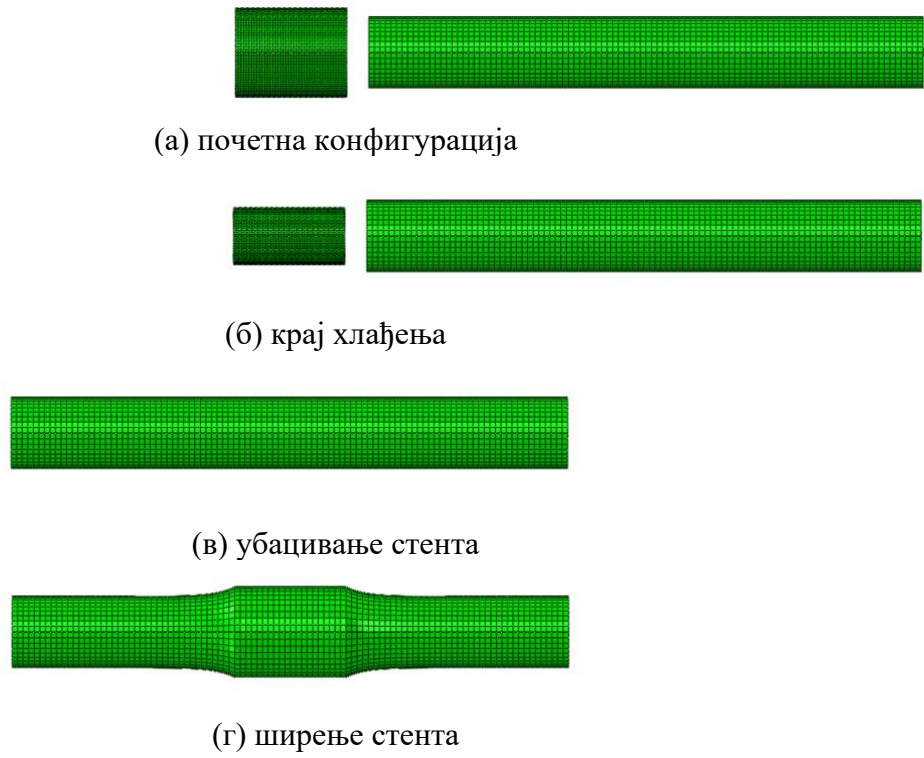
Фаза симулације	Време	Број корака
деформисање при $T > T_g$	60s	50
хлађење до $T < T_g$	300s	81
растерећење	0.1s	31
загревање до $T > T_g$	300s	321
Укупно	660.1s	483

Табела 7.3: Време у симулацији и број корака у симулацији обнове облика стента

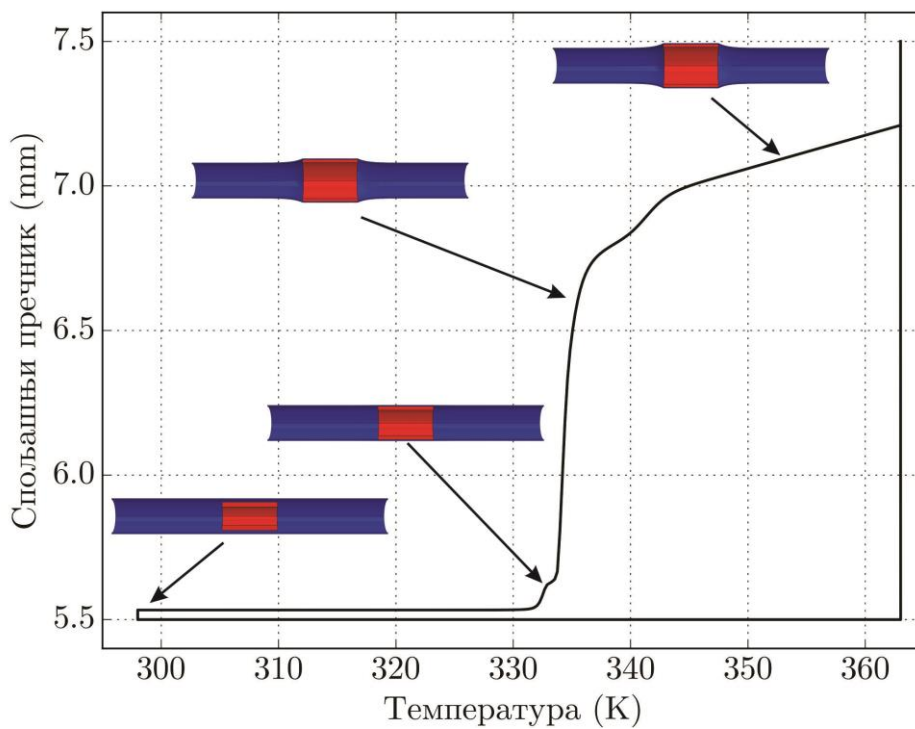
Напомена: Треба нагласити да се у реалним условима хумане медицине стентови не греју на тако високим температурама какве су због природе материјала дате у моделу. Коришћењем предложеног општег материјалног модела и параметара за материјале попут ПЛЛА (кополимер ПЛА) или термосета тБА и ПЦЛ чије су температуре транзиције значајно ближе температури људског тела, добили би се реалнији резултати. Како поље и развој оваквих материјала представљају све више садашњост на овоме предстоји даљи рад у будућим истраживањима. Као назнаку даљих истраживања овде представљамо резултате добијене нашим моделом поређене са експерименталним резултатима добијеним за кополимер ПЛА, ПЛЛА представљен у [171]. Као што се види, добро слагање резултата модела са експериментима из литературе, показује се да је предложени материјални модел општег карактера и може се користити за готово полимерне материјале.



Слика 7.25: Моделиране контактне површине. Црвеном бојом означена је спољашња површина стента, а љубичастом бојом означена је унутрашња површина артерије. Стент је заротиран ради ефектнијег приказа



Слика 7.26: Мрежа коначних елемената стента и артерије током симулације



Слика 7.27: Промена спољашњег пречника стента са температуром



(a) $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$



(б) $T=59 \text{ }^\circ\text{C}$

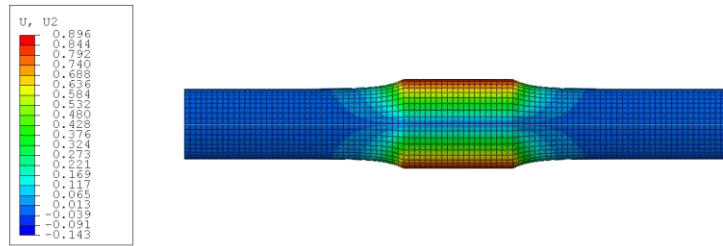


(в) $T=70 \text{ }^\circ\text{C}$

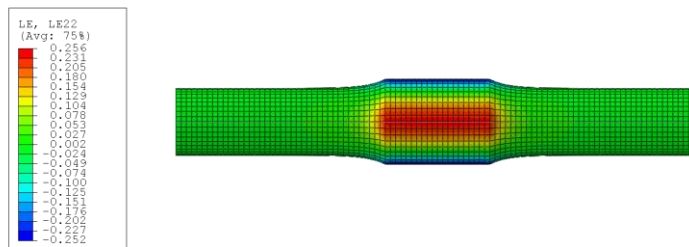


(г) $T=90 \text{ }^\circ\text{C}$

Слика 7.28: Попречни пресек артерије са уметнутим стентом на различитим температурама у симулацији термо-механичког циклуса обнове облика; ради боље прегледности искључен је приказ мреже елемената и приказан симетрично попречни пресек артерије.

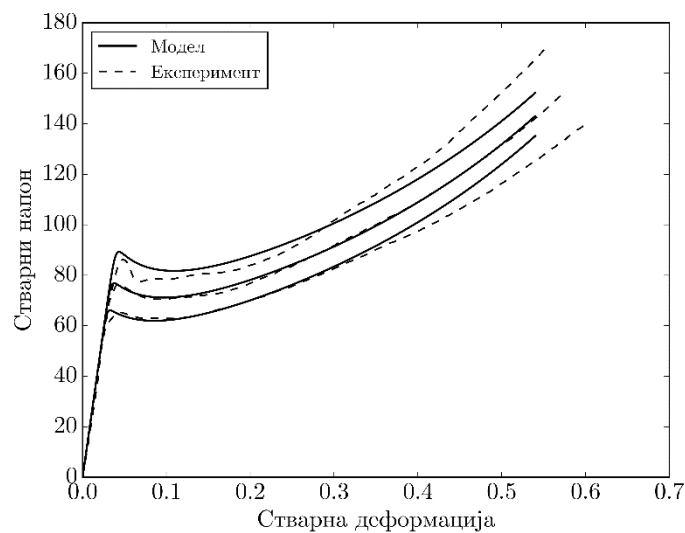


(а) померања



(б) логаритамска деформација

Слика 7.29: Поља померања и логаритамске деформације на крају симулације убацивања стента у артерију.



Слика 7.30: Поређење резултата модела и експеримента на ПЛЈА [171]

Поглавље 8

8 Закључна разматрања

8.1 Закључци

Развој нових, напредних материјала, попут оних са својством памћења облика и особином реаговања на различите спољашње стимулансе порастао је у последње две деценије. Њихова примена, пре свега у биомедицини, хуманој медицини, роботички и прецизној механици поставља пред истраживаче и инжењере задатак дефинисања правила понашања и развој модела којим би се описало сложено понашање ових материјала. Треба напоменути да потребу за истраживањем намеће и брзо растући развој адитивних и технологија производње термопластичних полимерних материјала. Посебно треба напоменути да је развој адитивних технологија отворио потпуно ново начин изучавања материјала конвенционалних и напредних материјала. У условима када свака радионица или истраживачка лабораторија уз технологију 3Д/4Д штампе постаје мали опитни центар, баца се потпуно ново светло и на раније познате и коришћене материјале, док се истовремено омогућава изучавање потпуно нових појава у паметним материјалима. Термопластике, полимери и хидрогелови све више замењују металне делове у уређајима и конструкцијама које то дозвољавају. Поред замене расте број број истраживања и модела којим би се описало сложено понашање које се у овим материјалима јавља. Постојећи модели, бивају замењени новим, који поред унапређења у погледу тачности, треба да дају и одређене предности у погледу имплементације и поједностављивања.

Током експерименталних испитивања у Центру за динамичка испитивања и инжењерски софтвер на Факултету инжењерских наука, уочено је неколико битних карактеристика полимера са својством памћења облика. Пре свега, могућност испитивања при великим деформационим режимима (>50%), првенствено испитивање притискивањем. И поред експерименталних ограничења која су наметнута постојећом опремом, овај режим је изабран као онај у коме се термопластични материјали најчешће и експлоатишу, попут притискивања, индентације, изливања и дубоких извлачења. Поред великих деформација посебан изазов представљала је изражена зависност полимера са својством памћења облика, како од температуре, тако и од брзине деформације, односно испитивања. Посебно при изузетно великим брзинама деформације када услед изузетно брзог процеса, долази до појаве адијабатског загревања проучаваног материјала. Брзина процеса не дозвољава одвођење топлоте са површине узорка, услед чега се узорак загрева додатно, мењају му се материјалне карактеристике и тиме се усложњава моделирање понашања материјала. Како све карактеристике материјала зависе од температуре, долази до драстичног пада механичких карактеристика. Појава дисипације наметнула је и укључивање спрегнутог термо-механичког моделирања материјала.\\

Сложено понашање полимера са памћењем облика превазилази оквири до сад познатих теорија малих деформација. Како пратеће сложене напонске релације прати и својство памћења облика изискује се примена теорије великих деформација и дефинисање нових конститутивних релације у односу на постојеће. У оквиру тезе је представљен приступ декомпоновања градијента деформације, као и разлагање укупног напона на више одвојених вредности, које свака за себе представљају одвојене механизме којим се описује одређени део понашања материјала. Поред декомпозиције напона и градијента

деформације у оквиру свих формулација закона течења коришћена је ефективна вредност пластичне деформације. Иако је у тренутку израде тезе постојало неколико материјалних модела, формулисан је нови модел са циљем поједностављивања ранијих теорија уз задржавање тачности. Применом мултипликативне декомпозиције градијента деформације и применом великих деформација, формулисан је модел као унапређење постојећих решења, нудећи поузданост резултата уз редукцију броја материјалних параметара. Како је у моделу примењено термо-механичко спрезање, уз повећани број материјалних Јакобијана, аналитичко формулисање постало је превише непоуздано и сложено па је примењена теорија пертурбација градијента деформације а на основу решења датих у [168,170] Овако софтверско решење представља општи оквир за решавање термо-механичких проблема применом методе коначних елемената, али и основу за даље унапређивање и истраживање како на пољу полимерних материјала у адитивним технологијама тако и метала са сличним својствима.

Истраживање се одвијало у неколико фаза:

- преглед литературе уз припрему експерименталних процедура према стандарду ASTM D695
- израда узорака адитивним технологијама, адаптирање опреме и мерних система и извођење термо-механичких експеримената
- теорија изнета у раду [123] преформулисана је у модел који се уз упрошћавања може применити на другим материјалима уз задржавање тачности
- примена предложених поједностављивања изнетих у [169] за ефикасну интеграцију конститутивних једначина
- укупан напон је декомпонован на више независних напонских механизма а интеграција напона је извршена у правцу пробног девијатора напона чиме је модел поједностављени и проблем се своди на решавање једне скаларне нелинеарне једначине

Применом ових поступака у оквиру тезе су добијени следећи резултати:

- направљена је велика група термо-механичких експеримената за полимер са својством памћења облика ПЛА, на више различитих брзина деформације (0.0001 до 0.1 s^{-1}) и температура (у распону 23 до $90 \text{ }^\circ\text{C}$)
- направљена је велика група термо-механичких експеримената за фотополимер са својством памћења, при брзинама деформације 0.01 и 0.1 s^{-1} и температурама у распону 23 до $90 \text{ }^\circ\text{C}$
- формулисани материјални модел је верификован поређењем добијених резултата модела са резултатима спроведених експеримената, на више различитих брзина деформације од 0.0001 до 0.1 s^{-1} и температурама у распону од 23 до $90 \text{ }^\circ\text{C}$, уз одлично слагање резултата модела са резултатима експеримената
- верификација на неким од доступних резултата из литературе уз задовољавајуће слагање резултата модела са коришћеним подацима
- добијени резултати коришћени су за моделирање нумеричких примера које се могу сматрати виртуелним експериментима - коришћење брзине деформације које није било могуће постићи опремом или симулирање убацивања стента у артерију
- израђен је идентификациони алата који користи 1Д модел и експлицитни солвер за примарну идентификацију и калибрацију материјалних параметара предложеног модела

- развијена методологија за нумеричко моделирање и експерименталне процедуре је општег карактера и може се применити при моделирању понашања свих полимерних материјала

8.2 Правац будућег истраживања

Иако је истраживање у оквиру ове дисертације обимно, и поред уско специјализованих поставља и опште оквире, постоји још простора за унапређења у будућим истраживањима. Неке од напомена и праваца будућег истраживања су:

- проширење презентоване теорије и модела на растућу потребу за моделима којима би се дефинисало термо-механичко понашање 4Д штампаних структура
- даљи развој идентификационог алата радног назива ОПТИМА, како би се он додатно унапредио. Унапређење треба да иде у више праваца: проширење доступних алата за обраду експерименталних резултата, унапређење опција за анализу, ширење библиотеке модела који се могу калибрисати и као кључно повезивање овог алата опште намене са екстерним солверима како оним отвореног кода и комерцијалних солвера који дозвољавају корисничке материјалне моделе
- комбиновање представљеног материјалног модела и његова даља примена у композитима, пре свега оним, добијеним 3Д штампањем и адитивним технологијама са различитим ојачавачима, али и на све заступљеније наноконтролите од паметних материјала
- дефинисање опште теорије и модела који би могао да моделира оштећење у паметним структурама као и изражену анизотропију која се у 4Д штампаним структурама јавља
- активна примена и моделирање материјала који се употребом адитивних технологија користе у инжењерингу ткива и израду биомедицинских средстава попут стентова и носача

Литература

- [1] Petrini L, Migliavacca F. Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. *Journal of Metallurgy* 2011;2011:501483. <https://doi.org/10.1155/2011/501483>.
- [2] Hartl DJ, Lagoudas DC. Aerospace applications of shape memory alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 2007;221:535–52. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO211>.
- [3] Kheirikhah MM, Rabiee S, Edalat ME. A Review of Shape Memory Alloy Actuators in Robotics. *RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*; 2011, p. 206–17.
- [4] Erkeçoğlu S, Sezer AD, Bucak S. Smart Delivery Systems with Shape Memory and Self-Folding Polymers. *Smart Drug Delivery System, IntechOpen*; 2016. <https://doi.org/10.5772/62199>.
- [5] Korde JM, Kandasubramanian B. Naturally biomimicked smart shape memory hydrogels for biomedical functions. *Chemical Engineering Journal* 2020;379:122430. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122430>.
- [6] Liu C, Qin H, Mather PT. Review of progress in shape-memory polymers. *J Mater Chem* 2007;17:1543–58. <https://doi.org/10.1039/B615954K>.
- [7] Lee KM, Koerner H, Vaia RA, Bunning TJ, White TJ. Light-activated shape memory of glassy, azobenzene liquid crystalline polymer networks. *Soft Matter* 2011;7:4318–24. <https://doi.org/10.1039/C1SM00004G>.
- [8] Heuchel M, Sauter T, Kratz K, Lendlein A. Thermally induced shape-memory effects in polymers: Quantification and related modeling approaches. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 2013;51:621–37. <https://doi.org/10.1002/polb.23251>.
- [9] Razzaq MY, Behl M, Nöchel U, Lendlein A. Magnetically controlled shape-memory effects of hybrid nanocomposites from oligo(omega-pentadecalactone) and covalently integrated magnetite nanoparticles. *Polymer* 2014;55:5953–60. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.07.025>.
- [10] Schmidt AM. Electromagnetic Activation of Shape Memory Polymer Networks Containing Magnetic Nanoparticles. *Macromolecular Rapid Communications* 2006;27:1168–72. <https://doi.org/10.1002/marc.200600225>.
- [11] Garces IT, Aslanzadeh S, Boluk Y, Ayranci C. Effect of Moisture on Shape Memory Polyurethane Polymers for Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Materials* 2019;12:244. <https://doi.org/10.3390/ma12020244>.
- [12] Liu Y, Li Y, Chen H, Yang G, Zheng X, Zhou S. Water-induced shape-memory poly(D,L-lactide)/microcrystalline cellulose composites. *Carbohydrate Polymers* 2014;104:101–108. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.031>.
- [13] Navarro-Baena I, Kenny JM, Peponi L. Thermally-activated shape memory behaviour of bionanocomposites reinforced with cellulose nanocrystals. *Cellulose* 2014;21:4231–46. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0446-5>.
- [14] Li WR JJ and Rodgers, Xie T. Semi-crystalline two-way shape memory elastomer. *Polymer* 2011;52:5320–5. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.09.030>.
- [15] Yu L, Shahsavan H, Rivers G, Zhang C, Si P, Zhao B. Programmable 3D Shape Changes in Liquid Crystal Polymer Networks of Uniaxial Orientation. *Advanced Functional Materials* 2018;28:1802809. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802809>.
- [16] Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013;Vol. 58, iss. 4:1415–8. <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>.

- [17] Kuang X, Zhao Z, Chen K, Fang D, Kang G, Qi HJ. High-Speed 3D Printing of High-Performance Thermosetting Polymers via Two-Stage Curing. *Macromolecular Rapid Communications* 2018;39:1700809. <https://doi.org/10.1002/marc.201700809>.
- [18] Kumar S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *JOM* 2003;55:43–7. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0175-y>.
- [19] Riheen MA, Saha TK, Sekhar PK. Inkjet Printing on PET Substrate. *Journal of The Electrochemical Society* 2019;166:3036–9. <https://doi.org/10.1149/2.0091909jes>.
- [20] Wagner M, Chen T, Shea K. Large Shape Transforming 4D Auxetic Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing* 2017;4:133–42. <https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0027>.
- [21] Boatti E, Scalet G, Auricchio F. A three-dimensional finite-strain phenomenological model for shape-memory polymers: Formulation, numerical simulations, and comparison with experimental data. *International Journal of Plasticity* 2016;83:153–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.04.008>.
- [22] Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Triple shape memory polymers by 4D printing. *Smart Materials and Structures* 2018;27:065010. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aabc2a>.
- [23] Hossain M, Navaratne R, Perić D. 3D printed elastomeric polyurethane: Viscoelastic experimental characterizations and constitutive modelling with nonlinear viscosity functions. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 2020;126:103546. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103546>.
- [24] Inverardi N, Pandini S, Bignotti F, Scalet G, Marconi S, Auricchio F. Sequential Motion of 4D Printed Photopolymers with Broad Glass Transition. *Macromolecular Materials and Engineering* 2020;305:1900370. <https://doi.org/10.1002/mame.201900370>.
- [25] Södergård A, Stolt M. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Progress in Polymer Science* 2002;27:1123–63. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00012-6).
- [26] Mohanty AK, Misra M, Hinrichsen G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering* 2000;276–277:1–24. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W).
- [27] Lunt J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability* 1998;59:145–52. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00148-1).
- [28] Senatov FS, Niaza KV, Zadorozhnyy MY, Maksimkin AV, Kaloshkin SD, Estrin YZ. Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2016;57:139–48. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.036>.
- [29] Dunić V, Busarac N, Slavković V, Rosić B, Niekamp R, Matthies H, et al. A thermo-mechanically coupled finite strain model considering inelastic heat generation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 2016;28:993–1007. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0442-5>.
- [30] Smith M. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 2017. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp; 2017.
- [31] Diez JM. Thermoviscoplasticity of Glassy Polymers: Experimental Characterization, Parameter Identification and Model Validation 2010.
- [32] Bergström J, editor. *Mechanics of Solid Polymers*. William Andrew Publishing; 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31150-2.09994-5>.

- [33] Martin O, Avérous L. Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer* 2001;42:6209–19. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00086-6).
- [34] Jamshidian M, Arab-Tehrany E, Imran M, Jacquot M, Desobry S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2010;9:552–71. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>.
- [35] Америчка агенција за храну и лекове. FDA inventory of effective food contact substance (FCS) notifications no.178 2002.
- [36] Lopes MS, Jardim AL, Filho RM. Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Engineering* 2012;42:1402–13. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.534>.
- [37] Nampoothiri KM, Nair NR, John RP. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology* 2010;101:8493–501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.092>.
- [38] Bergstrom J, Hayman D. An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Polylactide (PLA) for Medical Applications. *Annals of Biomedical Engineering* 2016;44:330–40.
- [39] Garg S, Serruys PW. Coronary stents: looking forward. *Journal of the American College Cardiology* 2010;56:43–78. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2010.06.008>.
- [40] Hamad K, Kaseem M, Yang HW, Deri F, Ko YG. Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *EXPRESS Polymer Letters* 2015;9:435–55. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2015.42>.
- [41] Soares JS, Moore JE, Rajagopal KR. Constitutive Framework for Biodegradable Polymers with Applications to Biodegradable Stents. *ASAIO Journal* 2008;54:295–301.
- [42] Erne P, Schier M, Resink TJ. The road to bioabsorbable stents: reaching clinical reality? *Cardiovasc Intervent Radiol* 2006;29:11–6.
- [43] Tsuji H, Miyauchi S. Poly(l-lactide): 6.Effects of crystallinity on enzymatic hydrolysis of poly(l-lactide) without free amorphous region. *Polymer Degradation and Stability* 2001;71:415–24. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00191-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00191-9).
- [44] Haers PE, Suuronen R, Lindqvist C, Sailer H. Biodegradable polylactide plates and screws in orthognathic surgery: technical note. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery* 2010;26:87–91. [https://doi.org/10.1016/S1010-5182\(98\)80045-0](https://doi.org/10.1016/S1010-5182(98)80045-0).
- [45] Wiebe J, Nef HM, Hamm CW. Current Status of Bioresorbable Scaffolds in the Treatment of Coronary Artery Disease. *Journal of the American College of Cardiology* 2014;64:415–24. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jacc.2014.09.041>.
- [46] Dhandayuthapani B, Yoshida Y, Maekawa T, Kumar DS. Polymeric Scaffolds in Tissue Engineering Application: A Review. *International Journal of Polymer Science* 2011;2011. <https://doi.org/10.1155/2011/290602>.
- [47] Coutu DL, Yousefi AM, Galipeau J. Three-dimensional porous scaffolds at the crossroads of tissue engineering and cell-based gene therapy. *Journal of Cellular Biochemistry* 2009;108:537–46. <https://doi.org/10.1002/jcb.22296>.
- [48] Kellomaki M, Niiranen H, Puumanen K, Ashammakhi N, Waris T, TormaLa P. Bioabsorbable scaffolds for guided bone regeneration and generation. *Biomaterials* 2000;21:2495–505.
- [49] Maharana T, Mohanty B, Negi YS. Melt–solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. *Progress in Polymer Science* 2009;34:99–124. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.10.001>.

- [50] Yakacki CM, Shandas R, Lanning C, Rech B, Eckstein A, Gall K. Unconstrained recovery characterization of shape-memory polymer networks for cardiovascular applications. *Biomaterials* 2007;28:2255–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.030>.
- [51] DeJong ES, DeBerardino TM, Brooks DE, Judson K. In vivo comparison of a metal versus a biodegradable suture anchor. *Arthroscopy* 2004;20:511–6. <https://doi.org/doi:10.1016/j.arthro.2004.03.008>.
- [52] Lluís C, José LF, María PV, María LJ, Enrique G. Optimization of Biodegradable Nanocomposites Based on aPLA/PCL Blends for Food Packaging Applications. *Macromolecular Symposia* 2006;233:191–7. <https://doi.org/10.1002/masy.200690017>.
- [53] Langer R. Drug delivery and targeting. *Nature* 1998;392:5–10.
- [54] Tan ML, Choong PFM, Dass CR. Recent developments in liposomes, microparticles and nanoparticles for protein and peptide drug delivery. *Peptides* 2010;31:184–93. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2009.10.002>.
- [55] Valantin M-A, Aubron-Olivier C, Ghosn J, Laglenne E, Pauchard M, Schoen H, et al. Polylactic acid implants (New-Fill)® to correct facial lipoatrophy in HIV-infected patients: results of the open-label study VEGA. *AIDS* 2003;17:2471–7. <https://doi.org/10.1002/jbm.1067>.
- [56] Lasprilla AJR, Martinez GAR, Lunelli BH, Jardini AL, Filho RM. Poly lactic acid synthesis for application in biomedical devices — A review. *Biotechnology Advances* 2012;30:321–8. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.019>.
- [57] Siracusa V, Rocculi P, Romani S, Dalla Rosa M. Biodegradable polymers for food packaging. *Trends in Food Science and Technology* 2008;19:634–43.
- [58] Cairncross RA, Becker JG, Ramaswamy S, O'Connor R. Moisture sorption, transport, and hydrolytic degradation in polylactide. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2006;131:774–85. <https://doi.org/10.1385/ABAB:131:1:774>.
- [59] Mensitieri G, Di Maio E, Buonocore GG, Nedi I, Oliviero M, Sansone L, et al. Processing and shelf life issues of selected food packaging materials and structures from renewable resources. *Trends in Food Science and Technology* 2011;22:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.10.001>.
- [60] Rajičić B. Optimizacija za postupak 3D štampe 2019.
- [61] Saenz F, Otarola C, Valladares K, Rojas J. Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K. *Additive Manufacturing* 2021;39:101841. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101841>.
- [62] Haleem A, Javaid M. Polyether ether ketone (PEEK) and its 3D printed implants applications in medical field: An overview. *Clinical Epidemiology and Global Health* 2019;7:571–7. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2019.01.003>.
- [63] Raj SA, Muthukumar E, Jayakrishna K. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings* 2018;5:11219–26. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.146>.
- [64] Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials* 2020;5:110–5. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>.
- [65] Rohde S, Cantrell J, Jerez A, Kroese C, Damiani D, Gurnani R, et al. Experimental Characterization of the Shear Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Experimental Mechanics* 2018;58:871–84. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0343-6>.
- [66] Zhang X, Fan W, Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications* 2020;21:100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>.
- [67] Tibbitts S. The Emergence of 4D Printing. TED Conference 2013.

- [68] Chua CK, Leong KF. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping. World Scientific Publishing Co Inc; 2014.
- [69] Pei E. 4D printing – revolution or fad? *Assembly Automation* 2014;34:123–7. <https://doi.org/10.1108/AA-02-2014-014>.
- [70] Seliktar D, Dikovskiy D, Napadensky E. Bioprinting and tissue engineering: recent advances and future perspectives. *Israel Journal of Chemistry* 2013;53:795–804.
- [71] Huang SH, Liu P, Mokasdar A, Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013;67:1191–203.
- [72] Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology* 2014;32:773–85.
- [73] Chua CK, Yeong WY. Bioprinting: principles and applications. vol. 1. World Scientific Publishing Co Inc; 2014.
- [74] Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2014;23:1917–28.
- [75] O'Donnell J, Ahmadkhanlou F, Yoon H-S, Washington G. All-printed smart structures: a viable option? *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics; 2014, p. 905729–905729.
- [76] Yap YL, Yeong WY. Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. *Virtual and Physical Prototyping* 2014;9:195–201. <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>.
- [77] Yap Y, Yeong W. Shape recovery effect of 3D printed polymeric honeycomb: This paper studies the elastic behaviour of different honeycomb structures produced by PolyJet technology. *Virtual and Physical Prototyping* 2015;10:91–9.
- [78] Gosselin C, Duballet R, Roux P, Gaudillière N, Dirrenberger J, Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials and Design* 2016;100:102–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- [79] Chia HN, Wu BM. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering* 2015;9:1–14.
- [80] Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Analytical Chemistry* 2014;86:3240–53. <https://doi.org/10.1021/ac403397r>.
- [81] Milenkovic S, Slavkovic V, Fragassa C, Grujovic N, Palic N, Zivic F. Effect of the raster orientation on strength of the continuous fiber reinforced PVDF/PLA composites, fabricated by hand-layup and fused deposition modeling. *Composite Structures* 2021;270:114063. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114063>.
- [82] Varadan VV, Chin L-C, Varadan VK. Modelling integrated sensor/actuator functions in realistic environments. *Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering*, 1992, p. 1–1.
- [83] Leo DJ. Engineering analysis of smart material systems. John Wiley & Sons; 2007.
- [84] Pei E. 4D Printing: dawn of an emerging technology cycle. *Assembly Automation* 2014;34:310–4. <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-062>.
- [85] Ge Q, Qi HJ, Dunn ML. Active materials by 4D printing. *Applied Physics Letters* 2013;103:131901.
- [86] Yakacki CM, Shandas R, Safranski D, Ortega AM, Sassaman K, Gall K. Strong, Tailored, Biocompatible Shape Memory Polymer Networks. *Advanced Functional Materials* 2007;18:2428–35. <https://doi.org/10.1002/adfm.200701049>.

- [87] Zarek M, Mansour N, Shapira S, Cohn D. 4D Printing of Shape Memory-Based Personalized Endoluminal Medical Devices. *Macromolecular Rapid Communications* 2017;38:1600628. <https://doi.org/10.1002/marc.201600628>.
- [88] Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Self-expanding/shrinking structures by 4D printing. *Smart Materials and Structures* 2016;25:105034.
- [89] Yakacki CM, Shandas R, Lanning C, Rech B, Eckstein A, Gall K. Unconstrained recovery characterization of shape memory polymer networks for cardiovascular applications. *Biomaterials* 2007;28:2255–63. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.030>.
- [90] Ge Q, Sakhaei AH, Lee H, Dunn CK, Fang NX, Dunn ML. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. *Scientific Reports* 2016;6:31110. <https://doi.org/10.1038/srep31110>.
- [91] Irvine S, Venkatraman S. Bioprinting and Differentiation of Stem Cells. *Molecules* 2016;21:1188. <https://doi.org/10.3390/molecules21091188>.
- [92] Miao S, Zhu W, Castro NJ, Nowicki M, Zhou X, Cui H, et al. 4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate. *Scientific Reports* 2016;6:27226. <https://doi.org/10.1038/srep27226>.
- [93] Jiang Y, Wang Q. Highly-stretchable 3D-architected Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports* 2016;6:34147. <https://doi.org/10.1038/srep34147>.
- [94] Wei H, Zhang Q, Yao Y, Liu L, Liu Y, Leng J. Direct-Write Fabrication of 4D Active Shape-Changing Structures Based on a Shape Memory Polymer and Its Nanocomposite. *ACS Appl Mater Interfaces* 2017;9:876–83. <https://doi.org/doi:10.1021/acsami.6b12824>.
- [95] Kim K, Zhu W, Qu X, Aaronson C, McCall WR, Chen S, et al. 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle–polymer composite materials. *ACS Nano* 2014;8:9799–806.
- [96] Meier H, Haberland C, Frenzel J. Structural and functional properties of NiTi shape memory alloys produced by selective laser melting. *Innovative Developments in Design and Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* 2011:291–6.
- [97] Dadbakhsh S, Speirs M, Kruth J-P, Schrooten J, Luyten J, Van Humbeeck J. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory nickel titanium parts. *Advanced Engineering Materials* 2014;16:1140–6.
- [98] Rossiter J, Walters P, Stoimenov B. Printing 3D dielectric elastomer actuators for soft robotics. In: Bar-Cohen Y, Wallmersperger T, editors. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*, vol. 7287, SPIE; 2009, p. 149–58. <https://doi.org/10.1117/12.815746>.
- [99] Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B, et al. Active printed materials for complex self-evolving deformations. *Scientific Reports* 2014;4:7422.
- [100] Ge Q, Dunn CK, Qi HJ, Dunn ML. Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures* 2014;23:094007. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094007>.
- [101] Yu K, Ritchie A, Mao Y, Dunn ML, Qi HJ. Controlled sequential shape changing components by 3D printing of shape memory polymer multimaterials. *Procedia IUTAM* 2015;12:193–203.
- [102] Carbonell C, Braunschweig AB. Toward 4D Nanoprinting with Tip-Induced Organic Surface Reactions. *Accounts of Chemical Research* 2017;50:190–8. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00307>.
- [103] Mao Y, Yu K, Isakov MS, Wu J, Dunn ML, Jerry Qi H. Sequential Self-Folding Structures by 3D Printed Digital Shape Memory Polymers. *Scientific Reports* 2015;5. <https://doi.org/10.1038/srep13616>.
- [104] Lendlein A, Langer R. Biodegradable, Elastic Shape-Memory Polymers for Potential Biomedical Applications. *Science* 2002;296:1673–6. <https://doi.org/10.1126/science.1066102>.

- [105] Hosseinzadeh M, Ghoreishi M, Narooei K. An investigation into the effect of thermal variables on the 3D printed shape memory polymer structures with different geometries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2021;1045389X211028286. <https://doi.org/10.1177/1045389X211028286>.
- [106] Boyce MC, Parks DM, Argon AS. Large inelastic deformation of glassy polymers. Part I: rate dependent constitutive model. *Mechanics of Materials* 1988;7:15–33. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(88\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0167-6636(88)90003-8).
- [107] Boyce MC, Parks DM, Argon AS. Large inelastic deformation of glassy polymers. Part II: numerical simulation of hydrostatic extrusion. *Mechanics of Materials* 1988;7:35–47. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(88\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0167-6636(88)90004-X).
- [108] Boyce MC, Weber GG, Parks DM. On the kinematics of finite strain plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1989;37:647–65. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(89\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(89)90033-1).
- [109] Tobushi H, Hara H, Yamada E, Hayashi S. Thermomechanical properties in a thin film of shape memory polymer of polyurethane series. *Smart Materials and Structures* 1996;5:483.
- [110] Tobushi H, Hashimoto T, Hayashi S, Yamada E. Thermomechanical Constitutive Modeling in Shape Memory Polymer of Polyurethane Series. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 1997;8:711–8. <https://doi.org/10.1177/1045389X9700800808>.
- [111] Tobushi H, Hashimoto T, Ito N, Hayashi S, Yamada E. Shape Fixity and Shape Recovery in a Film of Shape Memory Polymer of Polyurethane Series. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 1998;9:127–36. <https://doi.org/10.1177/1045389X9800900206>.
- [112] Lin JR, Chen LW. Shape-memorized crosslinked ester-type polyurethane and its mechanical viscoelastic model. *Journal of Applied Polymer Science* 1999;73:1305–19. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990815\)73:7<1305::AID-APP24>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990815)73:7<1305::AID-APP24>3.0.CO;2-5).
- [113] Abrahamson ER, Lake MS, Munshi NA, Gall K. Shape Memory Mechanics of an Elastic Memory Composite Resin. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2003;14:623–32. <https://doi.org/10.1177/104538903036213>.
- [114] Liu Y, Gall K, Dunn ML, McCluskey P. Thermomechanical recovery couplings of shape memory polymers in flexure. *Smart Materials and Structures* 2003;12:947.
- [115] Diani J, Liu Y, Gall K. Finite strain 3D thermoviscoelastic constitutive model for shape memory polymers. *Polymer Engineering and Science* 2006;46:486–92. <https://doi.org/10.1002/pen.20497>.
- [116] Qi HJ, Nguyen TD, Castro F, Yakacki CM, Shandas R. Finite deformation thermo-mechanical behavior of thermally induced shape memory polymers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2008;56:1730–51. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.12.002>.
- [117] Nguyen TD, Qi H H Jerry, Castro F, Long K. A thermoviscoelastic model for amorphous shape memory polymers: Incorporating structural and stress relaxation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2008;56:2792–814. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2008.04.007>.
- [118] Chen Y-C, Lagoudas DC. A constitutive theory for shape memory polymers. Part I: Large deformations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2008;56:1752–65. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.12.005>.
- [119] Barot G, Rao I. Constitutive modeling of the mechanics associated with crystallizable shape memory polymers. *Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik ZAMP* 2006;57:652–81.

- [120] Barot G, Rao I, Rajagopal K. A thermodynamic framework for the modeling of crystallizable shape memory polymers. *International Journal of Engineering Science* 2008;46:325–51.
- [121] Rajagopal KR, Srinivasa AR. A thermodynamic frame work for rate type fluid models. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2000;88:207–27. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(99\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(99)00023-3).
- [122] Reese S, Böl M, Christ D. Finite element-based multi-phase modelling of shape memory polymer stents. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2010;199:1276–86. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.08.014>.
- [123] Srivastava V, Chester SA, Anand L. Thermally actuated shape-memory polymers: Experiments, theory, and numerical simulations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2010;58:1100–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2010.04.004>.
- [124] Baghani M, Naghdabadi R, Arghavani J, Sohrabpour S. A thermodynamically-consistent 3D constitutive model for shape memory polymers. *International Journal of Plasticity* 2012;35:13–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.007>.
- [125] Xiao R, Choi J, Lakhera N, Yakacki CM, Frick CP, Nguyen TD. Modeling the glass transition of amorphous networks for shape-memory behavior. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2013;61:1612–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.02.005>.
- [126] Xiao R, Nguyen TD. Thermo-mechanics of Amorphous Shape-memory Polymers. *Procedia IUTAM* 2015;12:154–61. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2014.12.017>.
- [127] Xiao R. Modeling shape-memory effects in amorphous polymers. *Materials Today: Proceedings* 2019;16:1462–8.
- [128] Volk BL, Lagoudas DC, Chen Y-C, Whitley KS. Analysis of the finite deformation response of shape memory polymers: I. Thermomechanical characterization. *Smart Materials and Structures* 2010;19:075005. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/7/075005>.
- [129] Yu K, Xie T, Leng J, Ding Y, Qi HJ. Mechanisms of multi-shape memory effects and associated energy release in shape memory polymers. *Soft Matter* 2012;8:5687–95. <https://doi.org/10.1039/C2SM25292A>.
- [130] Scalet G, Pandini S, Messori M, Toselli M, Auricchio F. A one-dimensional phenomenological model for the two-way shape-memory effect in semi-crystalline networks. *Polymer* 2018;158:130–48. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.027>.
- [131] Pieczyska EA, Staszczak M, Maj M, Kowalczyk-Gajewska K, Golasinski K, Cristea M, et al. Investigation of thermomechanical couplings, strain localization and shape memory properties in a shape memory polymer subjected to loading at various strain rates. *Smart Materials and Structures* 2016;25:085002. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/085002>.
- [132] Gu J, Leng J, Sun H. A constitutive model for amorphous shape memory polymers based on thermodynamics with internal state variables. *Mechanics of Materials* 2017;111:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.04.008>.
- [133] Mirkhalaf SM, Fagerström M. The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 2021;25:119–31. <https://doi.org/10.1007/s11043-019-09429-w>.
- [134] Srivastava V, Chester SA, Ames NM, Anand L. A thermo-mechanically-coupled large-deformation theory for amorphous polymers in a temperature range which spans their glass transition. *International Journal of Plasticity* 2010;26:1138–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.01.004>.
- [135] Garcia-Gonzalez D, Rusinek A, Jankowiak T, Arias A. Mechanical impact behavior of polyether–ether–ketone (PEEK). *Composite Structures* 2015;124:88–99. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.061>.

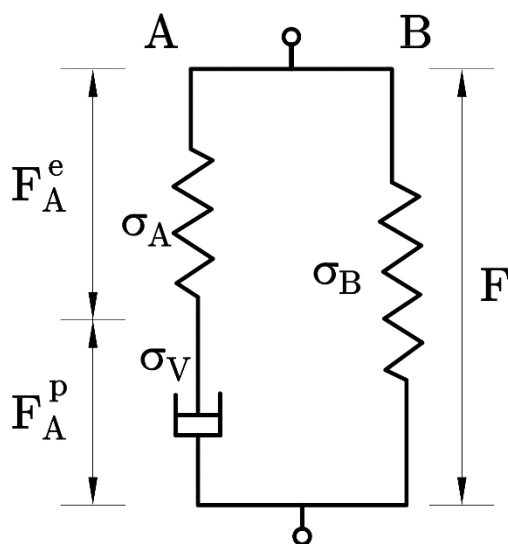
- [136] Zou R, Xia Y, Liu S, Hu P, Hou W, Hu Q, et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites Part B: Engineering* 2016;99:506–13. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>.
- [137] Zhang P, To AC. Transversely isotropic hyperelastic-viscoplastic model for glassy polymers with application to additive manufactured photopolymers. *International Journal of Plasticity* 2016;80:56–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.12.012>.
- [138] Abueidda DW, Bakir M, Abu Al-Rub RK, Bergström JS, Sobh NA, Jasiuk I. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials and Design* 2017;122:255–67. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>.
- [139] Garzon-Hernandez S, Garcia Gonzalez D, Jérusalem A, Arias A. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Materials and Design* 2020:108414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108414>.
- [140] Garzon-Hernandez S, Arias A, Garcia Gonzalez D. A continuum constitutive model for FDM 3D printed thermoplastics. *Composites Part B: Engineering* 2020;201:108373. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108373>.
- [141] Holzapfel GA. *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering Science*. Meccanica 2002;37:489–90. <https://doi.org/10.1023/A:1020843529530>.
- [142] Bonet J, Wood RD. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*. Cambridge University Press; 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755446>.
- [143] Živković M. *Nelinearna analiza konstrukcija* 2006.
- [144] Dišić A. Razvoj metodologije i uređaja za dinamičko ispitivanje materijala i zavarenih spojeva sa primenom u numeričkim proračunima konstrukcija pri velikim brzinama deformacije 2018.
- [145] Arruda EM, Boyce MC, Jayachandran R. Effects of strain rate, temperature and thermomechanical coupling on the finite strain deformation of glassy polymers. *Mechanics of Materials* 1995;19:193–212. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)00034-E](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00034-E).
- [146] Meijer HEH, Govaert LE. Multi-Scale Analysis of Mechanical Properties of Amorphous Polymer Systems. *Macromolecular Chemistry and Physics* 2003;204:274–88. <https://doi.org/10.1002/macp.200290080>.
- [147] Dupaix RB, Boyce MC. Constitutive modeling of the finite strain behavior of amorphous polymers in and above the glass transition. *Mechanics of Materials* 2007;39:39–52. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.02.006>.
- [148] Slavkovic V, Grujovic N, Disic A, Radovanovic A. Influence of Annealing and Printing Directions on Mechanical Properties of PLA Shape Memory Polymer Produced by Fused Deposition Modeling. *International Congress of Serbian Society of Mechanics*, 2017.
- [149] Ota S. Current status of irradiated heat-shrinkable tubing in Japan. *Radiation Physics and Chemistry* 1981;18:81–7. [https://doi.org/10.1016/0146-5724\(81\)90066-2](https://doi.org/10.1016/0146-5724(81)90066-2).
- [150] Bergström JS, Boyce MC. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1998;46:931–54. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00075-6).
- [151] Mulliken AD, Boyce MC. Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures* 2006;43:1331–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.04.016>.
- [152] Bergstrom JS, Bischoff JE. An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE. *International Journal of Structural Changes in Solids* 2010;2:31–9.

- [153] Bergström JS, Boyce MC. Constitutive modeling of the time-dependent and cyclic loading of elastomers and application to soft biological tissues. *Mechanics of Materials* 2001;33:523–30. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(01\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(01)00070-9).
- [154] Torres JP, Frontini PM. Mechanics of polycarbonate in biaxial impact loading. *International Journal of Solids and Structures* 2015;85–86:125–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.02.010>.
- [155] Vieira AC, Guedes RM, Tita V. Constitutive modeling of biodegradable polymers: Hydrolytic degradation and time-dependent behavior. *International Journal of Solids and Structures* 2014;51:1164–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.12.010>.
- [156] Lee EH. Elastic-Plastic Deformation at Finite Strains. *Journal of Applied Mechanics* 1969;36:1–6. <https://doi.org/10.1115/1.3564580>.
- [157] Anand L. On H. Hencky's Approximate Strain-Energy Function for Moderate Deformations. *Journal of Applied Mechanics* 1979;46:78–82. <https://doi.org/10.1115/1.3424532>.
- [158] Anand L. Moderate deformations in extension-torsion of incompressible isotropic elastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1986;34:293–304. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(86\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0022-5096(86)90021-9).
- [159] Mahieux CA, Reifsnider KL. Property modeling across transition temperatures in polymers: application to thermoplastic systems. *Journal of Materials Science* 2002;37:911–20. <https://doi.org/10.1023/A:1014383427444>.
- [160] Richeton J, Ahzi S, Daridon L, Rémond Y. A formulation of the cooperative model for the yield stress of amorphous polymers for a wide range of strain rates and temperatures. *Polymer* 2005;46:6035–43. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.079>.
- [161] Garcia Gonzalez D, Rusinek A, Bendarna A, Bernier R, Klosak M, Bahi S. Material and structural behaviour of PMMA from low temperatures to over the glass transition: Quasi-static and dynamic loading. *Polymer Testing* 2019;81:106263. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106263>.
- [162] Arruda EM, Boyce MC. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1993;41:389–412. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90013-6).
- [163] Flory PaulJ, Volkenstein M. Statistical mechanics of chain molecules. *Biopolymers* 1969;8:699–700. <https://doi.org/10.1002/bip.1969.360080514>.
- [164] Treloar LRG. *The Physics of Rubber Elasticity (Third Edition)*. *British Polymer Journal* 1976;8:39–39. <https://doi.org/10.1002/pi.4980080107>.
- [165] Cohen A. A Padé approximant to the inverse Langevin function. *Rheologica Acta* 1991;30:270–3. <https://doi.org/10.1007/BF00366640>.
- [166] Bergström JS, Boyce MC. Mechanical Behavior of Particle Filled Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology* 1999;72:633–56.
- [167] Jedynak R. Approximation of the inverse Langevin function revisited. *Rheologica Acta* 2015;54:29–39. <https://doi.org/10.1007/s00397-014-0802-2>.
- [168] Johnsen J, Clausen AH, Grytten F, Benallal A, Hopperstad OS. A thermo-elasto-viscoplastic constitutive model for polymers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2019;124:681–701. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.11.018>.
- [169] Henann DL, Anand L. A large deformation theory for rate-dependent elastic–plastic materials with combined isotropic and kinematic hardening. *International Journal of Plasticity* 2009;25:1833–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.11.008>.
- [170] Sun W, Chaikof EL, Levenston ME. Numerical approximation of tangent moduli for finite element implementations of nonlinear hyperelastic material models. *Journal of Biomechanical Engineering* 2008;130:061003–061003. <https://doi.org/10.1115/1.2979872>.

- [171] Filipovic N, Nikolic D, Isailovic V, Milosevic M, Geroski V, Karanasiou G, et al. In vitro and in silico testing of partially and fully bioresorbable vascular scaffold. *Journal of Biomechanics* 2021;115:110158. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.110158>.
- [172] Eswaran SK, Kelley JA, Bergstrom JS, Virginia L. Material Modeling of Polylactide. *SIMULIA Customer Conference* 2011:1–11.
- [173] Belbachir S, Zaiiri F, Ayoub G, Maschke U, Nait-Abdelaziz M, Gloaguen JM, et al. Modelling of photodegradation effect on elastic-viscoplastic behaviour of amorphous polylactic acid films. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2010;58:241–55. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.10.003>.
- [174] Weber G, Anand L. Finite deformation constitutive equations and a time integration procedure for isotropic, hyperelastic-viscoplastic solids. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1990;79:173–202. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(90\)90131-5](https://doi.org/10.1016/0045-7825(90)90131-5).

Додатак А

У додатку су представљене основне конститутивне релације материјалног модела за полимерне материјале при температурама нижим од транзиционе температуре T_g . Применом теорије великих деформација и усвајањем релација раније дефинисаних у [151,152,154] формулисан је материјални модел за полимерне материјале за температуре ниже од транзиционе температуре T_g . Овај материјални модел представља унапређени материјални модел представљен у [172] и [173] на бази експеримената спроведених на 3Д штампаним узорцима, у опсегу брзина деформације коришћених у испитивању од 0.0001 s^{-1} до 0.1 s^{-1} . Поред температурне, модел кроз конститутивне релације и закон течења омогућава моделирање зависности материјала од брзине деформације. Реолошки 1Д модел је приказан на Слици А.1. Модел се састоји од два микромеханизма. Микромеханизам А се састоји од еластичне опруге и вископластичне пригушнице док се микромеханизам В састоји од нелинеарне температурно зависне опруге.



Слика А.1 Реолошка репрезентација модела

Еластична опруга и пригушница микромеханизма А описују иницијално еластично понашање материјала праћено брзински зависним пластичним течењем које је последица међумолекуларног отпора ротацији ланчаних сегмената полимера [106]. Нелинеарна опруга описује деформационо ојачање материјала у области великих деформација изазвано ентропијским отпором поравнању полимерних ланаца [145].

A.1 Конститутивне релације

На основу Сlike А.1 важи:

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_A=\mathbf{F}_B \quad (\text{A.1})$$

Применом мултипликативне декомпозиције градијента деформације микромеханизма А на еластични и пластични део може се писати:

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p \quad (\text{A.2})$$

Брзина промене пластичног градијента деформације, $\dot{\mathbf{F}}_A^p$ повезана је са брзином промене тензора промене облика \mathbf{D}_A^p релацијом:

$$\dot{\mathbf{F}}_A^p=\mathbf{D}_A^p \mathbf{F}_A^p \quad (\text{A.3})$$

где $\mathbf{D}_A^p=(\mathbf{L}_A+\mathbf{L}_A^T)/2$ а \mathbf{L} представља градијент брзине деформације. Претпостављамо да је правац \mathbf{D}_A^p у правцу еластичног девијаторског напона микромеханизма А:

$$\mathbf{D}_A^p=\mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p \quad (\text{A.4})$$

где је \mathbf{D}_A^p тензор брзине пластичне деформације:

$$\mathbf{D}_A^p=\dot{\gamma}_A^p \mathbf{N}_A^p \quad (\text{A.5})$$

где су $\dot{\gamma}_A^p$ ефективна брзине пластичне деформације и \mathbf{N}_A^p правац пластичног течења датог у облику:

$$\mathbf{N}_A^p=\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\boldsymbol{\sigma}'_A}{\bar{\tau}_A} \quad (\text{A.6})$$

где је $\dot{\gamma}_A^p$ брзина пластичне деформације микромеханизма А, $\boldsymbol{\sigma}'_A$ девијаторски напон микромеханизма А, а $\bar{\tau}_A$ представља еквивалентни смичући напон микромеханизма А дат релацијом:

$$\bar{\tau}_A=\sqrt{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}'_A:\boldsymbol{\sigma}'_A} \quad (\text{A.7})$$

Вредност тензора \mathbf{D}_A^p је дата преко брзине пластичне деформације $\dot{\gamma}_A^p$. Специфично понашање материјала дефинише се увођењем специфичних конститутивних релација којима повезујемо напоне, $\boldsymbol{\sigma}_A$ и $\boldsymbol{\sigma}_B$, са деформацијом и брзином пластичне деформације $\dot{\gamma}_A^p$, датим преко градијената деформације у микромеханизмима \mathbf{F}_A и \mathbf{F}_B . Како су микромеханизми модела у паралелној вези укупни Кошијев напон $\boldsymbol{\sigma}$ је дат релацијом:

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{\sigma}_A+\boldsymbol{\sigma}_B \quad (\text{A.8})$$

Напон у микромеханизму А дат је еластичним конститутивним законом:

$$\boldsymbol{\sigma}_A = J_A^{e-1} [2\mu_A \mathbf{E}_A^e + K(\text{tr}(\mathbf{E}_A^e))\mathbf{I}] \quad (\text{A.9})$$

где су:

$$J_A^e = \det(\mathbf{F}_A^e) \quad (\text{A.10})$$

односно:

$$\mathbf{E}_A^e = \ln \mathbf{v}_A^e \quad (\text{A.11})$$

логаритамска стварна деформација (Хенкијева) деформација изведена из \mathbf{F}_A^e , \mathbf{I} тензор идентитета другог реда, μ_A и K су Ламеове константе. Зависност модула еластичности од температуре дата је релацијом:

$$f_E = 1 + q_E \frac{T - T_0}{T_0} \quad (\text{A.12})$$

па важи:

$$E_A = E_{A0} \left\{ 1 + q_E \frac{T - T_0}{T_0} \right\} \quad (\text{A.13})$$

где је E_{A0} иницијална вредност модула еластичности на почетној температури, T тренутна температура, T_0 је референтна температура а q_E је фактор зависност модула еластичности од температуре.

Вега брзине пластичне деформације $\dot{\gamma}_A^p$ и напона који делује на вископластични елемент дата је релацијом дефинисаном у [150]:

$$\dot{\gamma}_A^p = (\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1} \left(\frac{\bar{\tau}_A}{f_p f_{\epsilon_p} \hat{\tau}} \right)^{m_A} \quad (\text{A.14})$$

где је $\bar{\tau}_A$ вредност напона течења, m_A експонент напона течења који даје зависност материјалног модела од брзине деформације а f_{ϵ_p} представља функцију деформационог омекшавања након течења у материјалу преко релације:

$$f_{\epsilon_p} = f_r + (1 - f_r) e^{-\bar{\epsilon}_p / \hat{\epsilon}_1} \quad (\text{A.15})$$

где је ефективна пластична деформација дата релацијом:

$$\bar{\epsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \boldsymbol{\epsilon}_p : \boldsymbol{\epsilon}_p \quad (\text{A.16})$$

У једначини (A.13) $\bar{\epsilon}_p$ представља главне вредности тензора \mathbf{b}_p , док f_r представља коначну вредност граничног напона $\hat{\tau}$ након омекшања, док вредности $\hat{\epsilon}_1$ даје карактеристичну деформацију транзиције. Наведени приступ је често примењив како би се приказала промена напона течења са пластичном деформацијом и омекшавање полимера након напона течења. Када говоримо о зависности напона, односно функције течења од

температуре функција којом је се скалира функција течења дата је у експоненцијалном облику:

$$f_p = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (\text{A.17})$$

где, као и у случају еластичне опруге, T представља тренутну температуру, T_0 референтну температуру а n је фактор степене зависности функције течења од температуре. Према Слици А.1 Кошијев напон микромеханизма B добија се директно из укупног градијента деформације F . Полазећи од ове претпоставке изохорски део левог Коши-Гриновог тензора деформације дат је релацијом:

$$\bar{\mathbf{b}} = J^{-2/3} \mathbf{F} \mathbf{F}^T \quad (\text{A.18})$$

уз:

$$\bar{\lambda}_{SB} = \sqrt{\frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{b}})}{3}} \quad (\text{A.19})$$

долазимо до релације за девијаторски део Кошијевог напона модификованог Аруда-Бојс хипереластичног модела:

$$\boldsymbol{\sigma}_B = \frac{\mu_B}{J \bar{\lambda}_{SB}} \frac{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_{SB}}{\lambda_{LB}} \right)}{\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{LB}} \right)} \bar{\mathbf{b}} \quad (\text{A.20})$$

где је μ_B модул смицања а λ_{LB} максимално истезање ланаца молекула. Извођење представљених релација није тривијално и детаљније је изложено у [32,162,163]. Треба напоменути да постоје различите дефиниције инверзне Лангевин функције. Функција је дата преко:

$$\mathcal{L}(x) = \coth x - \frac{1}{x} \quad (\text{A.21})$$

где је $\mathcal{L}(x)$ инверзна Лангевин функција. Инверзна Лангевин функција апроксимативно се израчунава једначином датом у [167]:

$$\mathcal{L}(x) \approx x \frac{3 - 2.6x + 0.7x^2}{(1-x)(1+0.1x)} \quad (\text{A.22})$$

Промена температуре са пластичном деформацијом дата је релацијом:

$$c\dot{T} = -\text{Div} \mathbf{q}_R + \mathbf{q}_R + \beta \bar{\tau}_A \dot{\gamma}_A^p \quad (\text{A.23})$$

У Табели А.1 дате су вредности материјалних параметара предложеног модела за температуре ниже од T_g добијене калибрацијом процедуром представљеном у Поглављу 6.

Параметар	Вредност
E_{A0} (МПа)	2258.7
ν (-)	0.36
$\hat{\tau}$ (МПа)	127.1
m_A (-)	12.5
ξ (-)	0.01
C_1 (-)	-0.00552
f_f (-)	0.58
$\hat{\epsilon}_1$ (-)	0.055
μ_B (МПа)	6.2
λ_{LB} (-)	4.42
q_e (МпаК ⁻¹)	1.62979
q_p (-)	-3.31487
n (-)	-5.08527
β (-)	0.85
k (W/mK)	0.4
c_p (kJ/kgK)	2100

Табела А.1 Материјални параметри модела

А.2 Процедура нумеричке интеграције напона

Материјални модел је написан као фортрански потпрограм и имплементиран у програм за анализу МКЕ РАК Multiphysics [29]. Приликом имплементације неопходно је дефинисати процедуру нумеричке интеграције. Поред тога, уведено је неколико апроксимација представљене конститутивне теорије при процедури временске интеграције. При имплементацији материјалних модела који зависе од брзине деформације и температуре код симулације која укључује више од једног елемента примењујемо редукацију временског корака. Деформација примењена у свим конститутивним релацијама микромеханизма је логаритамска. Ради лакшег означавања користимо ознаку n за претходни, односно ознаку $n+1$ за текући временски корак.

Познато из претходног корака n и тренутног корака $n+1$:

- $\sigma_n, (\dot{\gamma}_A^p)_n, (F_A^p)_n, F_n, F_{n+1}, T_n, T_{n+1}$

Израчунати на крају корака $n+1$:

- $\sigma_{n+1}, (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}, (F_A^p)_{n+1}$

Једначина промене пластичног градијента:

$$\dot{F}_A^p = D_A^p F_A^p \quad (A.24)$$

може се интегралити методом датом у [174]:

$$(\mathbf{F}_A^p)_{n+1} = \exp(\Delta t(\mathbf{D}_A^p)_{n+1}) (\mathbf{F}_A^p)_n \quad (\text{A.25})$$

Еластични део градијента деформације \mathbf{F}_A^e микромеханизма А дат је релацијом:

$$(\mathbf{F}_A^e)_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} (\mathbf{F}_A^p)_n^{-1} \quad (\text{A.26})$$

где је пробно стање добијено коришћењем пластичног градијента деформације микромеханизма А из претходног корака $(\mathbf{F}_A^p)_n^{-1}$. Еластични део градијента деформације микромеханизма А на крају корака добија се из релације:

$$(\mathbf{F}_A^e)_{n+1} = (\mathbf{F}_A^e)_n \exp(-\Delta t(\mathbf{D}_A^p)_{n+1}) \quad (\text{A.27})$$

а еластична логаритамска деформација на крају корака:

$$(\mathbf{E}_A^e)_{n+1} = \ln(\mathbf{v}_A^e)_{n+1} = (\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}} - \Delta t(\mathbf{D}_A^p)_{n+1} \quad (\text{A.28})$$

где користимо пробну еластичну логаритамску деформацију са почетка корака:

$$(\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}} = \ln(\mathbf{v}_A^e)_{\text{tr}} \quad (\text{A.29})$$

Коришћењем конститутивних релација, могуће је израчунати напон на крају корака:

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1} &= \frac{1}{J_A^e} \left(2(\mu_A)_{n+1} (\mathbf{E}_A^e)_{n+1} + K(\text{tr}(\mathbf{E}_A^e)_{n+1}) \mathbf{I} \right) = (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{\text{tr}} - 2\Delta t(\mu_A)_{n+1} (\mathbf{D}_A^p)_{n+1} = \\ &= (\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{\text{tr}} - \sqrt{2}\Delta t(\mu_A)_{n+1} (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} (\mathbf{N}_A^p)_{n+1} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

где се користи чињеница да је \mathbf{D}_A^p девијаторско чиме се дефинише девијаторски напон микромеханизма А релацијом:

$$(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{\text{tr}} = \frac{1}{J_A^e} \left(2(\mu_A)_{n+1} (\mathbf{E}_A^e)_{n+1} + K(\text{tr}(\mathbf{E}_A^e)_{n+1}) \mathbf{I} \right) \quad (\text{A.31})$$

и уз коришћење горе наведених дефиниција добијамо:

$$\sqrt{2}(\bar{\tau}_A)_{n+1} (\mathbf{N}_A^p)_{n+1} = \sqrt{2}(\bar{\tau}_A)_{\text{tr}} (\mathbf{N}_A^p)_{\text{tr}} - \sqrt{2}(\mu_A)_{n+1} \Delta t(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} (\mathbf{N}_A^p)_{n+1} \quad (\text{A.32})$$

одакле долазимо до релације за ефективни напон смицања микромеханизма А на крају временског корака:

$$(\bar{\tau}_A)_{n+1} = (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}} - (\mu_A)_{n+1} \Delta t(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1} \quad (\text{A.33})$$

уз почетну претпоставку да важи:

$$(\mathbf{N}_A^p)_{n+1} = (\mathbf{N}_A^p)_{\text{tr}} \quad (\text{A.34})$$

чиме се показује да је пробно стање дефинисано правцем пластичног течења. Инверзијом релације (A.10) долазимо до релације:

$$\bar{\tau}_A = f_P f_{\epsilon_P} \hat{t} \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^P)_{n+1}}{(\lambda_A^P - 1 + \xi)^{C_1}} \right]^{\frac{1}{m_A}} \quad (\text{A.35})$$

што у комбинацији са претходним релацијама даје:

$$\hat{f} = (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}} - (\mu_A)_{n+1} \Delta t (\dot{\gamma}_A^P)_{n+1} - f_P f_{\epsilon_P} \hat{t} \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^P)_{n+1}}{(\lambda_A^P - 1 + \xi)^{C_1}} \right]^{\frac{1}{m_A}} \quad (\text{A.36})$$

имплицитну релацију за брзину пластичне деформације $\dot{\gamma}_A^P$. Ради имплементације модела у ABAQUS/Standard(UMAT)/ПАК потребно је израчунати алгоритамски конзистентни материјални Јакобијан. Овде, у теорији великих деформација можемо извршити одређене упрошћавајуће апроксимације, па се углавном фокусирамо на израчунавање:

$$C = \frac{\partial(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}}} \quad (\text{A.37})$$

Полазећи од раније дефинисаних релација:

$$\text{tr}(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1} = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{\text{tr}} - \sqrt{2} (\mu_A)_{n+1} \Delta t (\dot{\gamma}_A^P)_{n+1} (\mathbf{N}_A^P)_{\text{tr}} = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{\text{tr}} + \sqrt{2} ((\bar{\tau}_A)_{n+1} - (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}}) (\mathbf{N}_A^P)_{\text{tr}} \quad (\text{A.38})$$

уз коришћење $(\bar{\tau}_A)_{n+1} - (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}} = \Delta t (\mu_A)_{n+1} (\dot{\gamma}_A^P)_{n+1}$ и примену индексне нотације добијамо:

$$C_{ijkl} = \frac{\partial((\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1})_{ij}}{\partial((\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}})_{kl}} + \sqrt{2} ((\bar{\tau}_A)_{n+1} - (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}}) \frac{\partial((\mathbf{N}_A^P)_{\text{tr}})_{ij}}{\partial((\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}})_{kl}} + \sqrt{2} \left(\frac{\partial((\bar{\tau}_A)_{n+1})_{ij}}{\partial((\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}})_{kl}} - \frac{\partial((\bar{\tau}_A)_{\text{tr}})_{ij}}{\partial((\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}})_{kl}} \right) ((\mathbf{N}_A^P)_{\text{tr}})_{ij} \quad (\text{A.39})$$

где $\frac{\partial((\boldsymbol{\sigma}_A^e)_{n+1})_{ij}}{\partial((\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}})_{kl}}$ представља стандардни еластични тензор четвртог реда. Даље:

$$\frac{\partial(\bar{\tau}_A)_{\text{tr}}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{\text{tr}}} = 2 (\mu_A)_{n+1} (\mathbf{N}_A^P)_{\text{tr}} \quad (\text{A.40})$$

Даљим разматрањем раније дефинисане имплицитне релације:

$$\hat{f} = (\bar{\tau}_A)_{\text{tr}} - \mu_A \Delta t (\dot{\gamma}_A^P)_{n+1} - f_P f_{\epsilon_P} \hat{t} \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^P)_{n+1}}{(\lambda_A^P - 1 + \xi)^{C_1}} \right]^{\frac{1}{m_A}} \quad (\text{A.41})$$

$$\frac{\partial f}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} = \frac{\partial(\bar{\tau}_A)_{tr}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} - \Delta t \mu_A \frac{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} - \frac{\partial f_{ep}}{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}} \frac{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} f_P \hat{\tau} \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{(\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1}} \right]^{\frac{1}{m_A}} -$$

$$- f_P f_{ep} \hat{\tau} \frac{1}{m_A} \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{(\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1}} \right]^{\frac{1}{m_A} - 1} \left[\frac{1}{(\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1}} \right] \frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}}$$
(A.42)

Увођењем константи ради лакшег означавања:

$$B = \left[\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{(\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1}} \right]$$
(A.43)

$$D = \left[\frac{1}{(\lambda_A^p - 1 + \xi)^{C_1}} \right]$$
(A.44)

може се доћи до релације:

$$\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} = \frac{\frac{\partial(\bar{\tau}_A)_{tr}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}}}{\Delta t \mu_A + \frac{\partial f_{ep}}{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}} f_P \hat{\tau} B^{\frac{1}{m_A}} + f_{ep} f_P \hat{\tau} \frac{1}{m_A} B^{\frac{1}{m_A} - 1} D}$$
(A.45)

$$\frac{(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} = \frac{2(\mu_A)_{n+1}}{\Delta t \mu_A + \frac{\partial f_{ep}}{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}} f_P \hat{\tau} B^{\frac{1}{m_A}} + f_{ep} f_P \hat{\tau} \frac{1}{m_A} B^{\frac{1}{m_A} - 1} D}$$
(A.46)

Даљим груписањем, могуће је одредити поједине елементе једначине на следећи начин:

$$(\bar{\tau}_A)_{n+1} = (\bar{\tau}_A)_{tr} - \Delta t (\mu_A)_{n+1} (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}$$
(A.47)

$$\frac{\partial(\bar{\tau}_A)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{n+1}} = \frac{\partial(\bar{\tau}_A)_{tr}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{tr}} - \Delta t (\mu_A)_{n+1} \frac{\partial(\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}}{\partial(\mathbf{E}_A^e)_{n+1}}$$
(A.48)

Након приказаних трансформација, коначни облик матрице Јакобијана, датог једначином (A.34) је:

$$C_{ijkl} = \tilde{C}_{ijkl} + 2(\mu_A)_{n+1} \left(1 - \frac{(\bar{\tau}_A)_{n+1}}{(\bar{\tau}_A)_{tr}} - A \right)$$
(A.49)

где је:

$$A = \frac{2(\mu_A)_{n+1}}{\Delta t(\mu_A)_{n+1} + \frac{\partial f_{\text{cp}}}{\partial (\dot{\gamma}_A^p)_{n+1}} f_p \hat{\tau} B^{\frac{1}{m_A}} + f_{\text{cp}} f_p \hat{\tau} \frac{1}{m_A} B^{\frac{1}{m_A}-1} D} \quad (\text{A.50})$$

$$\tilde{C} = 2(\mu_A)_{n+1} \left(\frac{(\bar{\tau}_A)_{n+1}}{(\bar{\tau}_A)_{\text{tr}}} \right) \left(\mathbf{I}^s - \frac{1}{3} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \right) + \mathbf{K} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \quad (\text{A.51})$$

и:

$$I_{ijkl}^s = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (\text{A.52})$$

Биографија кандидата

Вукашин Славковић рођен је 05.08.1983. у Крагујевцу. Завршио је основну школу “Мирко Јовановић” и Прву крагујевачку гимназију. Након тога 2002. уписује Машински факултет у Крагујевцу, данашњи Факултет инжењерских наука. Студије машинства завршава 2009. године на смеру Примењена механика и аутоматско управљање са просечном оценом 9.45. Већ током студија био је укључен у сарадњу са проф. др Мирославом Живковићем и Ненадом Грујовићем. Током 2006. и 2007. боравио је на ТУ Брауншвајг где је одслушао један семестар на студијама машинства. По завршетку студија у оквиру тима проф. Живковића ангажован је на националном пројекту TR32036 прво као истраживач приправник а затим као истраживач сарадник. У исто време ангажован је на националном пројекту ИИИ41007 проф. Ненада Филиповића. Од 2019. је запослен као асистент на Факултету инжењерских наука. Током рада као сарадник у настави и асистент држао је наставу из више фундаменталних предмета на основном делу студија (Механика 1 и 3, Рачунарски алати, Отпорност материјала) као и специјализованих предмета на вишим годинама студија (Линеарна анализа, Програмски језици, Брза израда прототипова, Програмирање мобилних апликација, Инжењеринг ткива). У оквиру рада на факултету био је ангажован на више међународних пројеката Темпус, ДААД, ФП7, Хоризонт2020. У оквиру ДААД пројекта 2012. и 2013. године са колегама са ТУ Брауншвајг радио је на развоју програма РАК Multiphysics за решавање спрегнутих термо-механичких проблема. У својим истраживањима користи нумеричке и експерименталне методе за карактеризацију и моделирање материјала. Докторске студије уписао је 2015. године и под менторством проф.др Ненада Грујовића започиње истраживање на пољу паметних материјала са својством памћења облика, попут ПЛА и фотополимера који се користе у новим адитивним технологијама и биомедицини. Из овог истраживања настала је идеја за тему докторске дисертације “Развој и примена материјалног модела полимерних материјала са својством памћења облика”. Кандидат је завршио све планом предвиђене обавезе и положио све испите на докторским студијама. Тему докторске дисертације пријавио је 12.12.2016. године на катедри за Примењену механику и аутоматско управљање. Тема је одобрена 12.04.2017. одлуком Већа за техничко-технолошке науке IV-04-379/13. У оквиру истраживања објавио је преко 20 научних радова на међународним конференцијама и врхунским међународним часописима (категорије M21 и M21a).

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Вукашин Славковић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

Развој и примена материјалног модела полимерних материјала са својством памћења облика

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 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,
- да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Крагујевцу, 29.11.2021. године,


потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Вукашин Славковић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

Развој и примена материјалног модела полимерних материјала са својством памћења облика

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу, 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, 29.11.2021. 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/>