



Универзитет у Београду

Машински факултет

Катедра за производно машинство

**Микро обрада и
карактеризација**

**Семинарски рад
-Микро мреже-**

Оцена пројектног задатка:	Предметни наставник: проф. др Божица Бојовић			
	Група: 2			
Потпис наставника:	РБ	Презиме и име:	Бр.инд.	Потпис:
	1.	Јоковић Валентина	1120/20	
	2.	Лукић Тијана	1115/20	
	3.	Јовановић Александра	1157/20	
	4.	Николић Тамара	1177/20	
	5.	Вучинић Никола	1178/20	

Школска година: 2021/2022

Садржај:

1. Увод.....	3
2. Конструисање микро мреже и својства.....	4
3. Избор материјала.....	6
4. Процеси 3D штампања	7
4.1 Микро-стереолитографија	8
4.2 Фото-очврсла смола	8
4.3 Никловање микро решеткасте структуре.....	9
5. Штампана структура различитих величина решетки	10
6. Безелектрично никловање микро решеткасте структуре.....	12
7. Утицај притиска на различите структуре микро решетки	14
8. Компресивни отказ различитих структура микро решетки	17
9. Моделирање микро мреже	20
10. Припрема и израда микро мреже DLP методом применом софтверског пакета ChiTuBox	23
11. Мерење и контрола	28
12. Закључак.....	33
13. Литература.....	34

Списак слика:

Слика 1: Модел (а) топологије једне ћелије (б) обликоване тако да формирају решетке мреже [2]	4
Слика 2. Систем за штампање дигиталне светлости DLP [3].....	8
Слика 3. (а) Поглед одозго и (б) бочни поглед на јединичну ћелију решетки [3].....	9
Слика 4: Поглед одозго на структуре микро решетки са дужином јединичне ћелије (L) од (а) 150 μm ; (б) 130 μm ; (с) 100 μm [3]	10
Слика 5: Шематска илустрација о утицају тамног очвршћавања на штампану димензију квадратног пресека [3]	11
Слика 6: Поглед одозго на микро-решеткасте структуре обложене електроликом након претходног третмана (а) потапање у угљеничне наноцеве; (б) потапање у графен; (с) прскање алуминијума; (д) активирање паладијум хлорида [3].....	12
Слика 7: Трагови утовара-истовара микро-решеткастих структура са дужином јединичне ћелије L од (а) 150 μm ; (б) 130 μm ; (с) 100 μm [3].....	14
Слика 8: Поређење трагова оптерећења-неоптерећења микро решеткастих структура са различитим дужинама јединичних ћелија [3].....	15
Слика 9: Поређење трагова оптерећења и неоптерећења 130 μm микро решеткасте структуре са различитим третманима облагања [3]	16

Слика 10: Односи компресијског оптерећења и померања до лома структура микро решетке са различитим дужинама јединичних ћелија [3].....	17
Слика 11: Изглед лома површине услед притиска [3]	18
Слика 12: Однос компресијског оптерећења и померања до отказа 130 μ m микро решеткасте структуре са различитим третманима облагања [3].....	19
Слика 18: Главни интерфејс програма ChiTuBox	23
Слика 19: Увезен 3D модел микро мреже.....	24
Слика 20: Избор машине	24
Слика 21: Подешавање параметара за израду.....	25
Слика 22: Формирана подршка модела	26
Слика 23: Ротација модела за 45 степени у односу на све три осе координатног система.....	26
Слика 25	27
Слика 24	27
Слика 26	27
Слика 26: Микроскоп Mustool G600.....	28
Слика 27: Формирање слике	29
Слика 28: Еталон 0,6 mm.....	30
Слика 30: Микро мрежа и еталон 0,6 mm.....	31
Слика 32: Софтвер за контролу – мерење 1.....	31
Слика 33: Софтвер за контролу – мерење 2.....	32
Слика 34: Софтвер за контролу – мерење 3.....	32

Списак табела:

Табела 1: Одштампан дизајн и стварне димензије решеткасте структуре за 3 величине јединичне ћелије [3].....	10
Табела 2: Промене димензија након никловања без електронике коришћењем различитих предтретмана [3].....	13
Табела 3: % елемента детектован анализом спектроскопске дисперзије енергије [3].....	13
Табела 4: Компресивна крутост решеткастих структура са различитим величинама јединичних ћелија [3]	14
Табела 5: Чврстоћа на притисак након никловања без електронике коришћењем различитих предтретмана [3].....	16
Табела 6: Оптерећење на притисак и померање микро решеткастих структура са дужином јединичне ћелије од 130 μ m са различитим никлованим третманима [3].....	19
Табела 7: Процеси штампања и њихове карактеристике	33

1. Увод

Технолошке иновације у области адитивне производње нам омогућавају да производимо различите конструкције са све већим спектром материјала. Недавно је дошло до велико интересовање за меко 3D штампање јер тип материјала меког филамента проширује опсег флексибилних 3D штампаних објеката.

Различити произвођачи су на тржиште представили материјале са различитим нивоима флексибилности, механичким перформансама и квалитетима. Међутим, ови материјали су специфични. Процес руковања меким филаментима може се разликовати од оног са тврдим филаментним материјалом. Упркос прилагођавању режима меког штампања, квалитет меких 3D штампаних објеката је обично нижи у поређењу са сличним крутим 3D објектима. [1]

Нове технологије 3D штампања омогућавају израду сложених структура мрежа за различите медицинске примене. Развој мрежа високих перформанси помоћу 3D штампања је изазов због бројних компромиса, утицај производње на перформансе делова и процес експерименталне валидације. [2]

Показало се да решеткасти материјали са јединичним ћелијама које се редовно понављају поседују супериорна механичка својства у односу на пенасту структуру. Њихова својства се могу прилагодити не само врстом и величином решетки које чине јединичне ћелије, већ и димензијама појединачних подупирача у решеткама. Као резултат тога, механичка својства решеткастих материјала су много флексибилнија за прилагођавање и оптимизацију од пена. Решетке се могу конструисати у много различитих облика. Рана експериментална истраживања су користила ливење, деформационо обликовање перфорираног лима и спајање претходно исечених решеткастих елемената за производњу решеткастих структура. Њихова производња овим традиционалним техникама производње је компликована, скупа, а оствариве конструкције решетки су ограничене. [3]

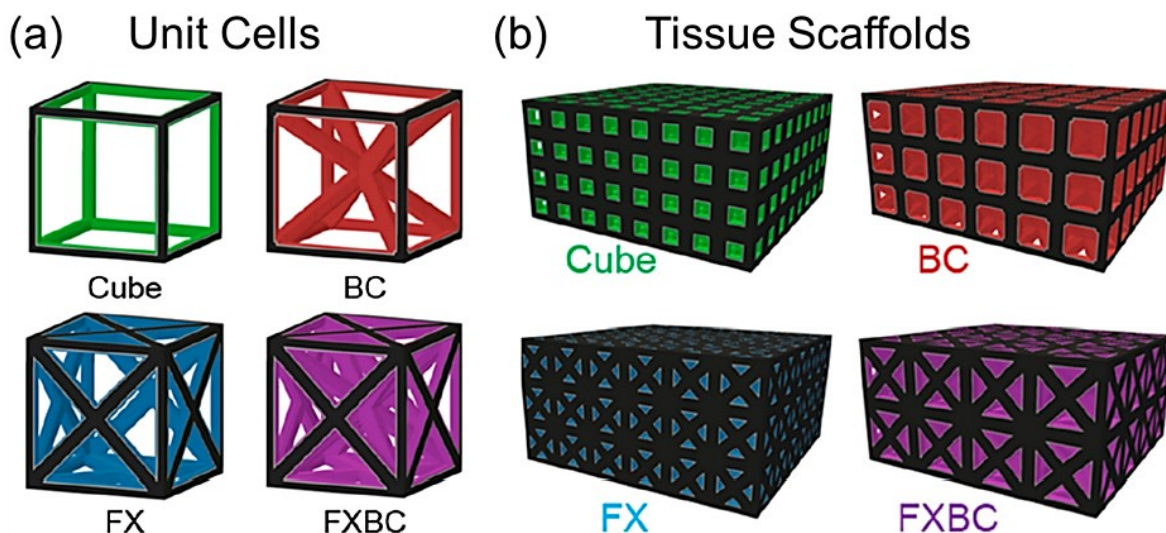
2. Конструисање микро мреже и својства

Конструисање мрежа захтева повезивање структурних својстава укључујући величину пора, порозност и крутост са механичким и биолошким функцијама. Конфигурација топологије мреже за 3D штампање обично укључује узорковање јединичних ћелија за формирање решетке са локалним и глобалним стратегијама оптимизације.

Први корак у моделирању мреже је одређивање стратегије за конфигурисање структурне топологије мреже. У контексту инжењерског моделирања за оптимизацију, топологија се односи на оптимизовани распоред материјала структуре унутар дате запремине на основу ограничења, граничних услова и оптерећења. За мреже, конфигурисана топологија мора да обезбеди мрежу пора које омогућавају сејање ћелија и протоко хранљивих материја. Уобичајене топологије укључују пене и решетке. Пене којима доминира савијање имају тенденцију да имају нижу крутост по густини од решетке конструисаних од греда да би формирале структуре налик на решетке којима доминира истезање.

Напредак у 3D штампању омогућава производњу сложених решетке заснованих на греди са прилагођеним постављањем греда за оптимизоване перформансе. Већи ефективни модул еластичности структура којима доминира истезање омогућава постизање циљне крутости мреже при нижој густини него што је иначе могуће, чиме се обезбеђује већа порозна запремина за хранљиве материје и раст ткива. Греде усклађене са смером оптерећења генерално повећавају ефективне модуле еластичности конструкције, што значи мање деформације под оптерећењем. За решеткасте материјале, ефективни модул еластичности је заснован на његовом одговору на напон/деформацију.

Релативни модул еластичности се налази дељењем ефективног модула еластичности са модулом еластичности основног материјала који се користи за конструкцију решетке. Стога је релативни модул еластичности увек мањи од јединице и зависи од релативне густине (тј. порозности) решетке. Додавање дијагоналних греда генерално повећава ефективни модул смицања. [2]



Слика 1: Модел (а) топологије једне ћелије (б) обликоване тако да формирају решетке мреже [2]

Најједноставнија топологија на слици 1а је јединица коцке са гредама које су ортогонално оријентисане према сваком углу. BC („Body-centric”) јединична ћелија је коцка са додатним гредама од сваког угла јединичне ћелије према центру структуре. Јединична ћелија FKS („Face-crossed”) има греде од сваког угла јединичне ћелије до центра сваке од лица јединичне ћелије. FKSBC структура укључује оба сета додатних греда.

Утврђено је да ове јединичне ћелије засноване на коцки раде једнако или боље од алтернативних типова јединичних ћелија када се узму у обзир механички, нутритивни и биолошки фактори. Када је свака топологија јединичне ћелије обликована тако да формира мреже са контролисаном порозношћу и величином греда на слици 1б, FKSBC јединичне ћелије захтевају веће укупне јединичне ћелије у поређењу са коцкастим мрежама које се састоје од много мањих јединичних ћелија. Ове разлике у јединичним ћелијама обезбеђују различите геометрије и величине пора широм мреже које утичу на стопе раста ткива и заслужују даљу истрагу како би се пронашли повољни компромиси међу осталим својствима скеле која су повезана са функционалношћу. [2]

Порозност се односи на однос запремине празнине и укупне запремине скеле. Већа порозност обезбеђује већи волумен празнине за попуњавање ткива и проток хранљивих материја, али резултира мањом структурном густином са смањеним механичким својствима. Величина пора се односи на величину локалних шупљина у мрежи. Веће поре обезбеђују већи волумен за транспорт хранљивих материја, док мање поре обезбеђују већу површину и мање запремине за брже пуњење ткива.

Величина пора се дефинише на више начина у зависности од контекста истраживања.

Величина пора се често дефинише као најмања сфера која може да стане унутар шупљине или најмања равна празнина у коју круг може да стане. Недавне студије су дефинисале величину пора квадратног корена равне празнине, који контролише поређења између пора различитог облика.

Уобичајено испитивана механичка својства укључују ефективне модуле еластичности и смицања који се односе на количину угиба коју подноси решетка када је оптерећена дуж осе или помоћу силе смицања редом.

Ово су скалабилна својства материјала, што значи да за дату конструкцију јединичне ћелије, мрежа са узорком са малим или великим бројем истих јединичних ћелија треба да задржи исте ефективне модуле еластичности и смицања. Ове порозности се такође теоретски задржавају ако се величина јединичне ћелије поново скалира док се порозност одржава константном, што се постиже пропорционалном променом пречника снопа са величином јединичне ћелије. [4]

3. Избор материјала

Основни материјали који се користе за мреже коштаног ткива укључују керамику, метале и полимере. Материјали су често биоразградиви, али у случају неких метала мрежа је трајно фиксирана. Биоразградиви материјали морају да се растворе у телу брзином која омогућава раст костију и пружа механичку подршку за замену скеле. Брзина деградације зависи од избора материјала и начина на који је конструисан да формира решетку. Већа количина пропорционалне површине доводи до брже деградације. Најчешће коришћена керамика су три-калцијум фосфат и хидроксиапатит, полимери укључују поликапролактон, полимлечну киселину и метакрилну киселину, док је титанијум најчешћи метал за конвенционалну производњу скела. Керамика и полимери генерално имају ближе модуле еластичности трабекуларној кости након прилагођавања порозности решетки у поређењу са титанијумом који је много већи. Недавна достигнућа у скелама од магнезијума обезбеђују боље подударане са модулом еластичности кости и представљају биоразградиву металну алтернативу титанијуму. Међутим, магнезијум би потенцијално могао да изазове проблеме са имплантатима који се пребрзо разграђују и формирају гасне шупљине. Усклађивање крутости кости подстиче раст ткива и избегава заштиту од стреса што резултира слабијим растом костију када је крутост скеле много већа од околне кости. [2]

Меки материјали за 3D штампање имају низ карактеристика које их чине одличним избором за широк спектар употреба у различитим областима у зависности од хемијске конзистенције, што утиче на њихова својства. Као што смо раније споменули, тренутни постојећи меки материјали за 3D штампање се углавном називају TPE и TPU, који су направљени од различитих термопластичних мешавина. Хемијска конзистенција ових мешавина игра важну улогу у нивоу флексибилности материјала. Постоје различите врсте мешавина различитих хемијских конзистенција које се могу груписати у четири главне категорије: меки, средње меки, средње тврди и тврди материјали. [1]

Процеси 3D штампања за мреже од ткива били су успешни за керамику, полимере, метале и комбинације материјала. Одговарајуће скеле коштаног ткива се конструишу 3D штампањем користећи све ове материјале за производњу скела са порама у распону од 200 μ m до 1mm и порозност од 50% или више. Један од највећих изазова је постизање биокомпатибилности за скеле које захтевају очвршћавање ултраљубичастим светлом, пошто су фотополимери генерално токсични. Обезбеђивање почетка потпуног очвршћавања праћеног урањањем у етанол резултирало је побољшаном биокомпатибилношћу фотоочврслих материјала. Истраживање препоручује трослојни приступ заједничког коришћења одобрених материјала, одговарајућих производних параметара и техника накнадне обраде за оптималне перформансе. Обезбеђивање биокомпатибилности отвориће нова врата за коришћење процеса штампања укључујући стереолитографију и Polyjet штампање где је прелиминарна компатибилност ћелијске културе демонстрирана за сложене решетке. [4]

4. Процеси 3D штампања

Процеси 3D штампања за производњу решетки укључују екструзију, коришћење смоле и технологије на бази праха. Сваки процес пружа различите могућности за карактеристике штампања и резолуцију са приступом различитим материјалима. Израда микро решетки није могућа методама као што су глодање, бушење, рендисање итд. већ се оне добијају искључиво процесима 3D штампе.

Процеси засновани на екструзији функционишу тако што се материјал провлачи кроз млазницу која се може загрејати да би се растопио материјал који се стврдне када се једном постави и формира структуру. Моделирање фузионог таложења је уобичајен процес екструзије за производњу ћелијских решеткастих структура различитих топологија. Процес је коришћен за прављење решетки са ортогоналним и дијагоналним гредама пречника 1,5mm коришћењем PLA (полилактична киселина или полимлечне киселине). Моделирање таложења фузионе полимлечне киселине је коришћено за производњу скела за ткиво са пречником канала од 250 μ m до 500 μ m користећи интегрисани процес конструисања који је резултирао растом ткива. Процеси екструзије имају предност због своје широке доступности, лакоће употребе и великог избора материјала, али су ограничени у смислу резолуције штампе.

Процеси очвршћавања смоле укључују стереолитографију, двофотонску полимеризацију и бризгање/штампање (Polyjet) и делују умрежавањем течних смола за формирање слојевитих чврстих структура.

Стереолитографија се изводи коришћењем директног ласерског писања и коришћена је за прототип хијерархијских скела и биокompatibilне решетке са микро резолуцијом.

Двофотонска полимеризација омогућава израду структура са резолуцијом наноразмера и примењена је у скелама са подесивом крутошћу за остеогени раст.

Бризгање/штампање (Polyjet) материјала функционише тако што очвршћава течност нанесену на површину која омогућава постављање више материјала и потпорних материјала кроз конструисану скелу за сложене геометрије. Делови штампани Polyjet методом имају пречнике греда реда 100 μ m. Све у свему, процеси очвршћавања смолом пружају делове високе резолуције са сложеним карактеристикама, али имају ограничен избор материјала и често користе токсичне фотополимере за умрежавање материјала током процеса очвршћавања.

Процеси засновани на праху користе слој праха (метал, полимер, восак, керамика) који се спаја помоћу ласера, топлоте или везива на начин слој по слој да би се створиле структуре које су подржане неискоришћеним прахом током процеса штампања. Сваки процес на бази праха има различите могућности и смернице за исправан избор процеса који укључује разматрање обрађеног материјала, сложеност делова и карактеристике конструкција. На пример, бризгање везива омогућава употребу више материјала у конструкцији делова, али доводи до грубљих делова и смањених детаља у поређењу са штампањем помоћу енергије.

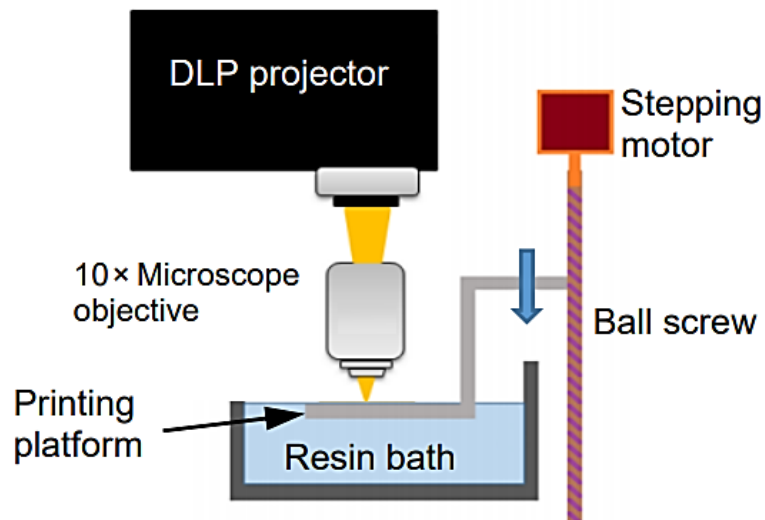
Ласерско синтеровање се често користи за производњу титанијумских мрежа и применљиво је за различите метале, укључујући нерђајући челик. Решетке од нерђајућег челика могу се конструисати са гредама од приближно 200 μ m који формирају ортогоналне и дијагоналне раскрснице. Процеси засновани на праху генерално захтевају већа улагања од екструдирања и процеса на бази смоле, док обезбеђују упоредиве могућности за скеле и омогућавају штампање разних метала погодних за решетке високе чврстоће. [2]

4.1 Микро-стереолитографија

Комерцијални DLP пројектор се користи за пројектовање на покретној платформи за штампање. Платформа се креће вертикално и покреће је корачни мотор. Пројектор има огледало и резолуцију од 1920x1080 pixels. Да би се смањила величина пројектоване слике, сочиво пројектора је преокренуто и постављено тако да пројектује слику кроз микроскопски објектив.

Добијена слика из објектива је измерена 1,69x0,95 mm², дајући резолуцију од 0,88 μm/pixel на платформи за штампање. Слика је била фокусирана на површину резервоара са течном смолом.

Платформа се прво налазила одмах испод површине течности. Након сваког излагања, слој смоле је отврднут са пројектованим узорком. Платформа је затим спуштена у резервоар са смолом за одређену количину (дебљину) следећег слоја. Висина слоја може бити 5-10 μm. Процес је поновљен да би се изградила тродимензионална структура која се састоји од гомиле слојева са узорком који чине назначену структуру микро-решетке. Након штампања, неочврсна смола се испере са структуре коришћењем етанола. Израђују се 3D микроструктуре од биоразградивих и биокompatibilних материјала. [3]

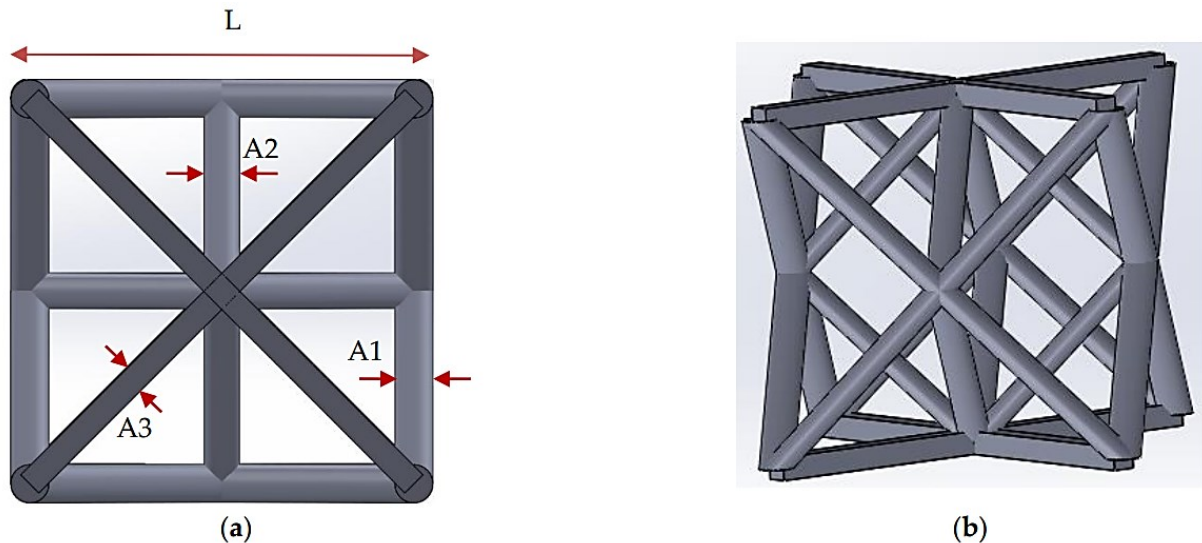


Слика 2. Систем за штампање дигиталне светлости DLP [3]

4.2 Фото-очврсла смола

Смола је оптимизирана за очвршћавање помоћу ДЛП пројектора. Штампање са малом дебљином слоја захтева много времена док са великом дебљином слоја ће се тешко формирати коси елементи у решеткастој конструкцији. Штавише, продирање пројектоване светлости у смолу може довести до очвршћавања на дубинама испод предвиђеног површинског слоја за очвршћавање, што резултира нежељеним материјалом у празном простору решетке. Неопходан је компромис у дебљини слоја да би се решили горе наведени проблеми да би се ограничила дубина очвршћавања може се контролисати време експозиције као и додавање одговарајућих блокатора светлости смоли.

Испитивани су бројни блокатори ултраљубичастог и плавог светла и установљено је да је Sudan I дао најзадовољавајући резултат. [3]



Слика 3. (а) Поглед одозго и (б) бочни поглед на јединичну ћелију решетке [3]

4.3 Никловање микро решеткасте структуре

С обзиром да се никл без електролита неће постављати директно на површину полимера, потребна је претходна обрада пре премазивање танког проводног слоја. Упоредне су четири различите методе претходног третмана:

1. потапање у воденој суспензији са распршених 0,3% угљеничних наноцеви (CNT) у трајању од 3 мин;
2. потапање у воденој суспензији са распршених 0,3% графена у трајању од 3 мин;
3. умакање у активан раствор паладијум хлорида у трајању од 1 дана;
4. премазивање танког слоја алуминијума прскањем.

Метода 3 је конвенционални предтретман за наношење на пластичне компоненте. То је прилично дуготрајно и зато се покушавају сврсисходније методе 1 и 2 са лако доступним проводним нано материјалима.

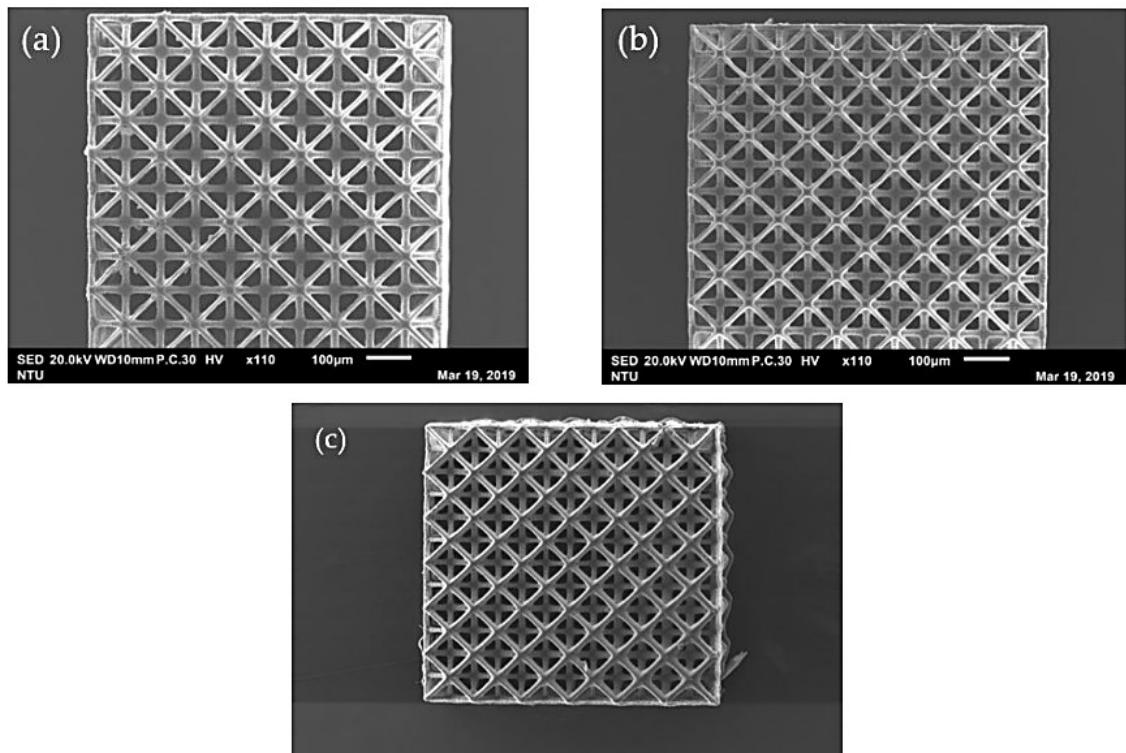
Познато је да распршивање поуздано облаже веома танак слој метала на површини компоненте и зато се такође користи у методи 4 за поређење. Након претходног третмана, вишак материјала се испере и структура се осуши пре него што се урони у комерцијалну формулу за никловање без електролита која садржи никл сулфат и хипофосфит.

Да би се обезбедило добро продирање раствора за облагање у структуру, смеша се ставља у ултразвучно купатило у трајању од 3 мин. Затим се непрекидно меша и одржава на 90°C на магнетној мешалици током целог процеса облагања.

Простор између решеткастих елемената у решеткастој структури са дужином јединичне ћелије од 100µm је премало да би се извршила ефективна обрада и 130 µm решетка се користи за облагање. Пошто су ефекти предтретмана различити, структуре из различитих предтретмана се натапају у раствор за облагање различито време како би се постигла дебљина оплата од 3-5µm. [3]

5. Штампана структура различитих величина решетке

Слика 4 приказује поглед одозго на микро-решеткасте структуре штампане са дужинама јединичних ћелија 150, 130 и 100 μm . Табела 1 приказује димензије дужине јединичне ћелије и ширине кључних решеткастих елемената ових решетки мерено помоћу скенирајућег електронског микроскопа (СЕМ). [3]



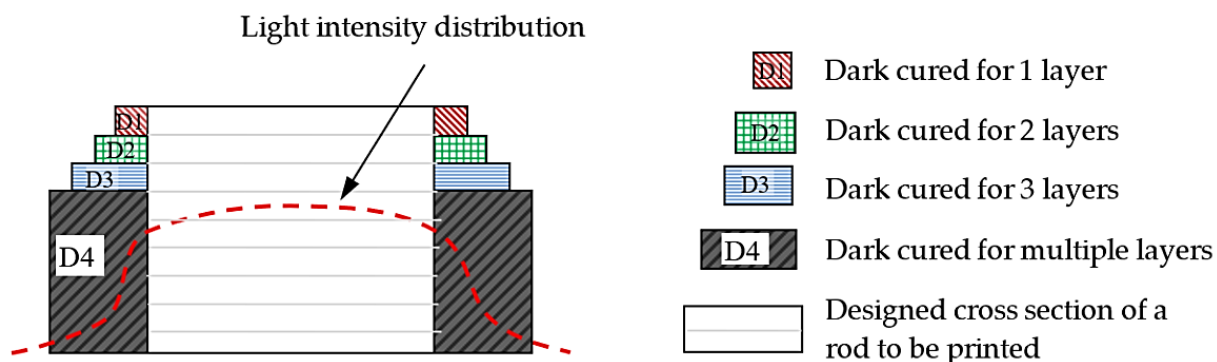
Слика 4: Поглед одозго на структуре микро решетке са дужином јединичне ћелије (L) од (a) 150 μm ; (b) 130 μm ; (c) 100 μm [3]

	150 μm		130 μm		100 μm	
	Стварне димензије	Измерене димензије	Стварне димензије	Измерене димензије	Стварне димензије	Измерене димензије
L (μm)	150	160,8	130	135,4	100	105,3
A1 (μm)	15	18,5	13	17,9	10	12,5
A2 (μm)	15	17	13	17,0	8	10,3
A3 μm ()	10	13,1	8	11,5	6	9,5

Табела 1: Одштампан дизајн и стварне димензије решеткасте структуре за 3 величине јединичне ћелије [3]

Све измерене димензије су веће од пројектованих. Један од разлога за ово је фино подешавање у фокалној равни за штампање као резултат пројектоване слике која је нешто већа од оне на цртежу концтрукције. Други разлог је појава „очвршћавања у мраку“. Ово је даље шематски илустровано на слици 5.

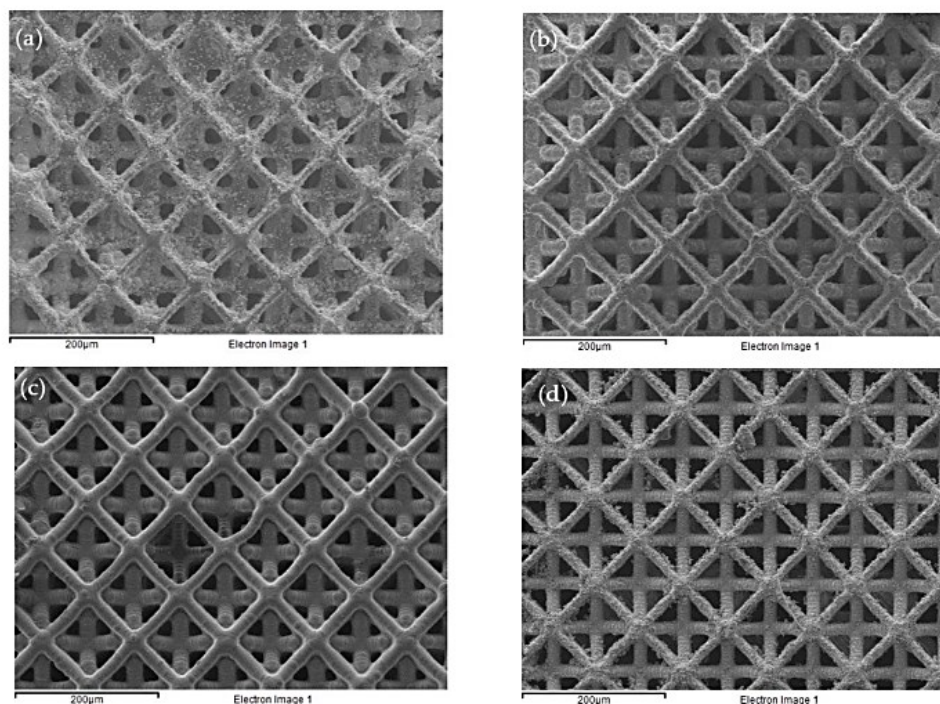
Претпоставимо средњи бели квадрат на слици 5 је пројектовани попречни пресек штапа који се формира слагањем више слојева одоздо према горе. Ширина штапа се састоји од броја пиксела. Иако сваки пиксел слике одговара микро огледалу на DMD-у које се може независно укључити или искључити, светлост која се рефлектује од сваког микро огледала је Гаусова расподела са интензитетом који се шири далеко изван пиксела. Када број светлих пиксела груписаних заједно, резултујућа дистрибуција интензитета светлости може изгледати као испрекидана линија на слици 5. Суперпонирани интензитет на неким тамним пикселима поред ивице штапа може бити довољно висок да очврсне смолу (као што је D1 на слици 5), што доводи до дела ученог повећања ширине приказаног у табели 1. Иако је дубина очвршћавања предвиђена да буде изабрана дебљина слоја за штампање, светлост ипак може да продире на веће дубине са опадајућим интензитетом. Поновљено осветљење са slabим интензитетом светлости одговорно за тамно очвршћавање, може да акумулира довољно енергије да се оствари полимеризација на дубинама испод тренутног штампарског слоја. На слици 5, D2–D4 представљају слојеве са прогресивно више акумулације ове енергије и тако је степен очвршћавања већи у дубљим слојевима. Последњи ефекат може бити разлог што елемент квадратног попречног пресека (слика 3, ширина A3) се појављује округло на SEM микрографијама (нпр. слика 4с). [3]



Слика 5: Шематска илустрација о утицају тамног очвршћавања на штампану димензију квадратног пресека [3]

6. Безелектрично никловање микро решеткасте структуре

Слика 6 показује ефекат никловања без електролита након четири различита претходна третмана. Табела 2 упоређује измерене ширине решеткастих елемената пре и после облагања док табела 3 наводи атомски % елемента детектован анализом енергетске дисперзивне спектроскопије (EDS) на обложеној структури. Чини се да претретман са CNT-ом омогућава опсежну појаву облагања (Слика 6а). Међутим, ширина решеткастог елемента се повећала само за 3 μ m након 1h облагања (таб 2). EDS анализа указује на појаву 17,5% никла на последњем слоју структуре микро решетке приказаном на слици 6а. Ово сугерише да оплата има непотпуну покривеност решеткастог елемента чак и на спољашњем слоју. Табела 2 показује да је дебљина слоја никла око једне шестине полимерне решетке, тако да се очекује да ће количина никла на исеченом отвореном пресеку бити једна шестина од оне на спољашњем слоју. EDS анализа унутрашњости даје само 1,6% никла. Ово сугерише да CNT или решење за никловање тешко улази у унутрашњост. Прекомерни таложени материјал се види на слици 6а се може приписати високом односу ширине и висине CNT-а који се лако заплићу један са другим и простиру се преко два блиско размакнута решеткаста елемента у близини споја, индукујући тамо никловање. [3]



Слика 6: Поглед одозго на микро-решеткасте структуре обложене електроликом након претходног третмана (а) потапање у угљеничне наноцеви; (b) потапање у графен; (c) прскање алуминијума; (d) активирање паладијум хлорида [3]

Предтретман					
	Пре наношења	Потапање угљеничних наноцеви	Потапање графена	Прскање алуминијумом	Умакање у паладијум хлорид
		Време наношења 1h	Време наношења 1h	Време наношења 0,5h	Време наношења 3,5h
A1 (μm)	17,9	21,29	23,07	23,6	21,2
A2 (μm)	17,0	20,3	22,2	22,8	20,4
A3 (μm)	11,5	14,6	19,8	19,8	15,8

Табела 2: Промене димензија након никловања без електронике коришћењем различитих предтретмана [3]

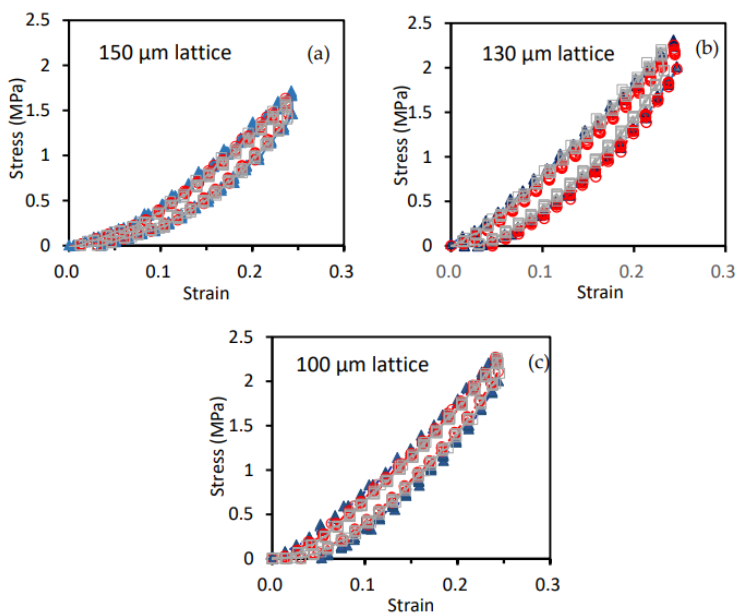
Предтретман								
Елементи	Потапање угљеничних наноцеви		Потапање графена		Прскање алуминијумом		Умакање у паладијум хлорид	
	Врх	Унутрашњост	Врх	Унутрашњост	Врх	Унутрашњост	Врх	Унутрашњост
Угљеник	57,08	71,79	33,42	72,54	34,21	70,68	43,32	72,63
Кисеоник	21,36	26,21	3,76	23,15	13,12	28,77	5,17	23,73
Фосфор	4,07	0,44	10,13	0,89	9,83	-	11,12	0,7
Никл	17,48	1,56	52,7	3,42	42,84	0,56	40,38	2,93

Табела 3: % елемента детектован анализом спектроскопске дисперзије енергије [3]

Предтретман графеном (Слика 6b) и прскање алуминијумом (Слика 6c) дају много глађу површину. Наношење је такође брже са овим третманима. Табела 2 показује да су ширине решетке порасле за 5–8 μm док је трајање облагања 1h са графенским премазом и 0,5h са алуминијумским прскањем. % никла на спољашњим слојевима је, респективно, 53% и 43%, што је значајно више него код CNT премаза. Атомски % никла у унутрашњости је поново несразмерно низак и износи 3,4% односно 0,56%, за кућишта обложена графеном и алуминијумом. Изузетно низак ниво никла у последњем случају вероватно је последица чињенице да је решеткаста структура представљала многе препреке како би се спречило да распршени атоми алуминијума уђу у унутрашњост. Умерено обложена унутрашњост се стога тешко може обложити. Никловање након претходног третмана паладијум хлоридом (Слика 6d) је најспорији од четири и требало је 3,5h да се дода 3–4 μm . Садржај никла је 40 % на спољашњем слоју и 3% у унутрашњости. Обложена површина има упоредиву глаткоћу као кућиште третирано графеном. У сва четири случаја, покривеност никлом на најудаљенијим слојевима није 100%. Предтретман графеном и паладијум хлоридом има боље укупне перформансе превлаке од CNT и алуминијумског прскања. Оплата уопште тешко улази у унутрашњост. [3]

7. Утицај притиска на различите структуре микро решетке

Особине при притиску при три поновљена оптерећења-неоптерећења структура микрорешетке са различитим величинама јединичних ћелија до око 20% деформације приказано је на слици 7. Почетна крутост је релативно ниска, али се повећава након одређене количине деформације. Када је решетка стиснута, савијање косих чланова може прихватити почетну деформацију, што доводи до ниске почетне крутости. Даља компресија ће на крају почети да растеже хоризонталне елементе, што доводи до повећане крутости. Након потпуног престанка дејства оптерећења, структурама је требало неколико секунди да се врате на нулту деформацију. Ово се може приписати вискоеластичном понашању полимера. Чињеница да су трагови померања оптерећења пратили исте хистерезне петље при поновљеном оптерећењу-неоптерећењу сугерише да је структура остала еластична без приметних оштећења. Слика 7 црта заједно трагове оптерећења и померања структура микро-решетке са различитим величинама јединичних ћелија. Табела 4 наводи крутости израчунате након деформације од 10% ових структура. Крутост се стално повећава са 8,8 на 11,1МПа како се величина јединичне ћелије смањује са 150 на 100 μm . Ово се може приписати повећаном броју јединичних ћелија и решеткасти елементи да подносе оптерећење унутар исте запремине како се смањује величина ћелије. [3]

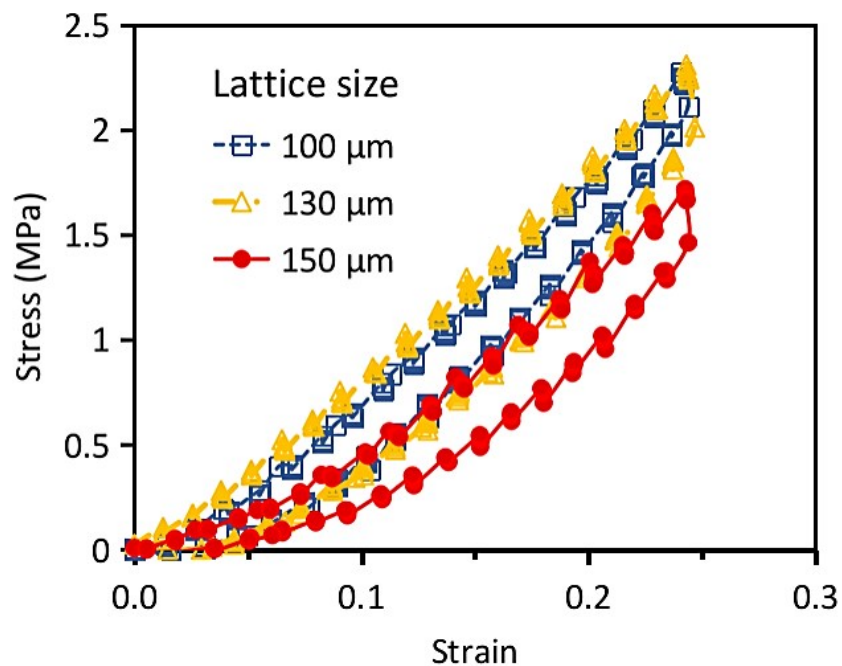


Слика 7: Трагови утовара-истовара микро-решеткастих структура са дужином јединичне ћелије L од (a) 150 μm ; (b) 130 μm ; (c) 100 μm [3]

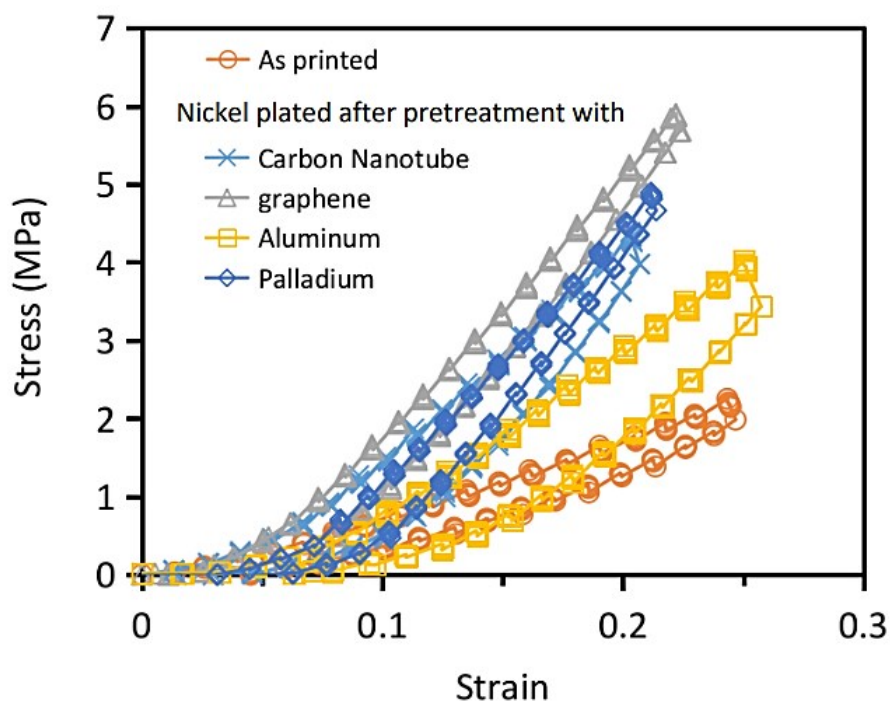
150 μm	130 μm	100 μm
8,8МПа	9,5МПа	11,1МПа

Табела 4: Компресивна крутост решеткастих структура са различитим величинама јединичних ћелија [3]

Све никловане структуре имају већу крутост од нениклованих структура (Слика 8). Штавише, као и необложена конструкција, трагови оптерећења и померања су пратили исте хистерезне петље при поновљеном оптерећењу-неоптерећењу, што указује да су структуре остале еластичне без приметних оштећења до деформације од 20%. Различити предтретман пре облагања довео је до различитих квалитета површинског облагања и различитих количина никла на унутрашњости структуре, као што је раније истакнуто. Табела 5 упоређује крутости израчунате након деформације од 10% ових структура. Обрађена графеном конструкција је испољила највећу крутост од 34,2 МПа, што је 3,6 пута више од неникловане. Како метални никл има знатно већи Јангов модул и снагу од очврсле смоле, већа покривеност никловане превлаке ће помоћи да се побољша крутост обложених структура. Крутост различито претходно обрађених структура је у редоследу: третиран графеном > активиран паладијумом > третиран CNT > алуминијум распршен. Ова наредба је иста као и количина никла у унутрашњости (табела 3), што такође одражава покривеност никловањем. [3]



Слика 8: Поређење трагова оптерећења-неоптерећења микро решеткастих структура са различитим дужинама јединичних ћелија [3]



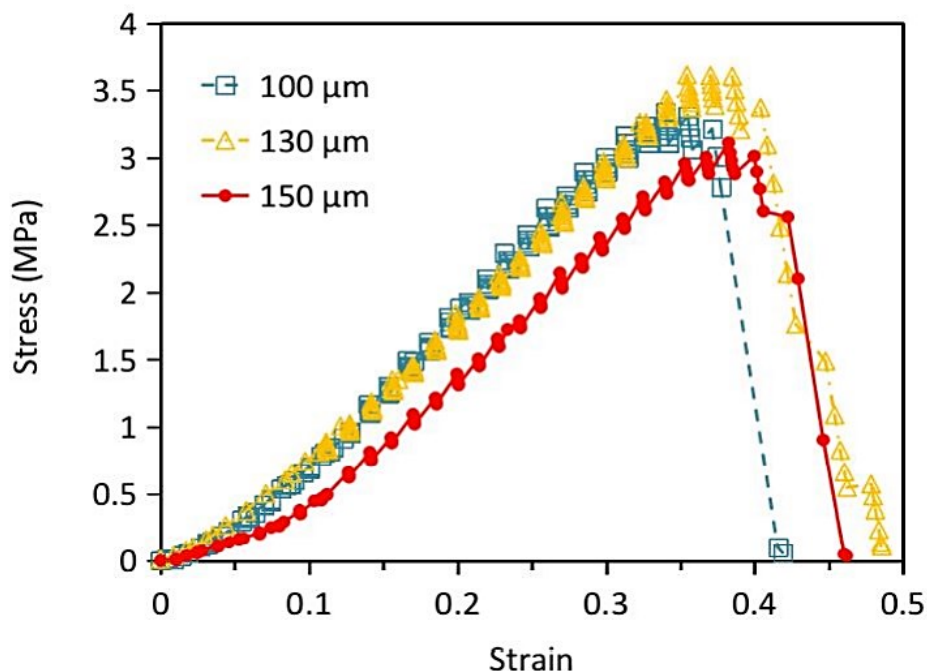
Слика 9: Поређење трагова оптерећења и неоптерећења 130 μm микро решеткасте структуре са различитим третманима облагања [3]

Предтретман				
Одштампано	Потапање угљеничних наноцеви	Потапање графена	Прскање алуминијумом	Умакање у паладијум хлорид
9,5 МПа	27,8 МПа	34,2 МПа	21,6 МПа	32,6 МПа

Табела 5: Чврстоћа на притисак након никловања без електронике коришћењем различитих предтретмана [3]

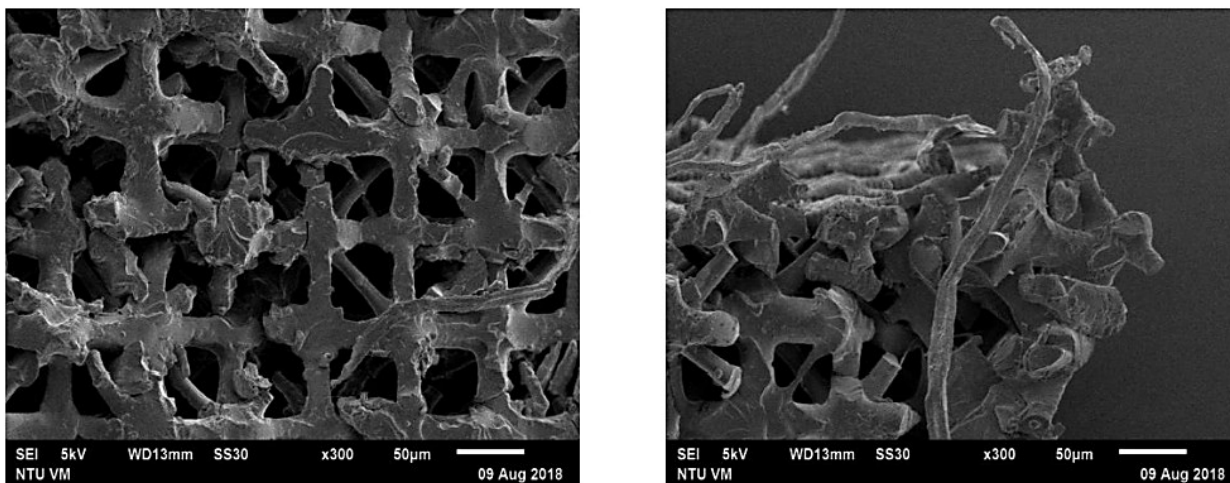
8. Компресивни отказ различитих структура микро решетке

Слика 10 приказује трагове компресивног оптерећења и померања до лома одштампаних структура микро решетке са различитим величинама јединичних ћелија. Након првобитно ниже крутости за првих 0,1mm компресије, крутост се повећала и задржала отприлике константну вредност све док се не приближи максималном оптерећењу. Стрмо повећање крутости пре квара услед збијања, које се обично примећује у ћелијским структурама, није се догодило у тренутним случајевима. У ствари, праћење кроз оптички микроскоп показује то током тестова компресије није дошло до збијања решетке. Конструкције су отказале извијањем и савијањем, што је довело до наглог пада оптерећења након максималног оптерећења. Овај начин квара настаје вероватно због веома танког односа ширине и висине компресијских узорака произведених због ограничења тренутне поставке. Ако се израђују конструкције са повољнијим односом ширине и висине, очекује се да ће оптерећења лома постати знатно већа јер ће доћи до збијања конструкција. Ипак, тренутни резултати теста помажу да се баци мало светла на релативне снаге различитих третмана. Оптерећење квара 130 μm јединичне ћелије је нешто већа од оне од 150 μm док је упоредиво са 100 μm структура. Претпоставља се да су то због истих разлога који утичу на редослед крутости као што је раније објашњено. [3]



Слика 10: Односи компресијског оптерећења и померања до лома структура микро решетке са различитим дужинама јединичних ћелија [3]

Типичне површине лома компресивних оштећених структура микро решетке (Слика 11) јасно показују да нема збијања и да је дошло до лома на спојевима решетке. [3]



Слика 11: Изглед лома површине услед притиска [3]

Никловање је значајно повећало отпорност на лом $130\mu\text{m}$ структуре као што је видљиво на слици 12. Одговарајућа напрезања при отказивању су такође проширена на знатно веће помаке. Снаге и деформације лома наведени су у табели 6.

У најбољем случају претходног третмана графена, снага лома је повећана за 5,3 пута. У најгорем случају прскања алуминијумом, он је повећан за 2,4 пута. Опет, редослед оптерећења квара за различите предтретмане је исти као и количина садржаја никла у унутрашњости за тај третман као што је наведено у табели.3.

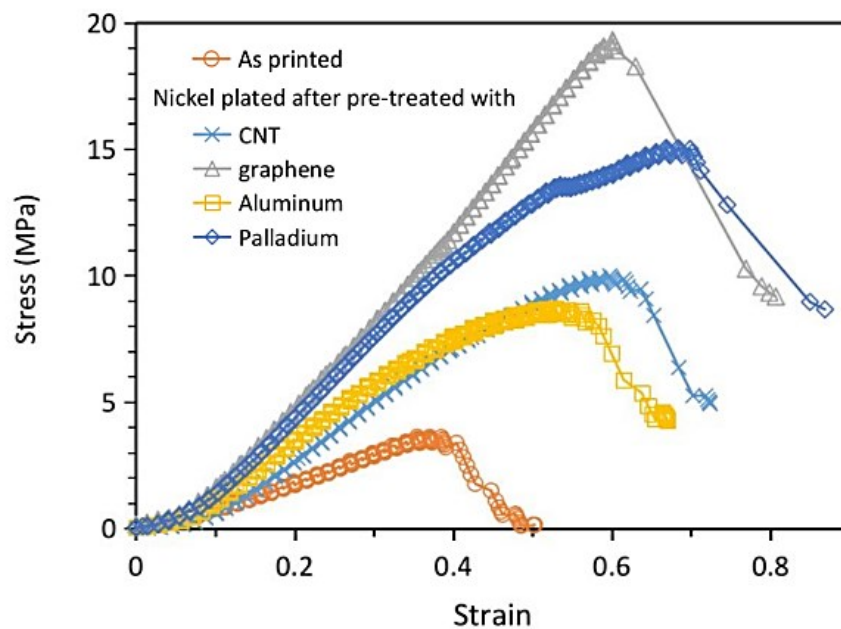
Ово потврђује горе наведено објашњење да никл има већу чврстоћу од смоле и да већа покривеност превлаком доводи до веће чврстоће у метализованој структури решетке. Вреди напоменути да из релативног односа материјала унутрашњост конструкције вероватно више доприноси испољавању крутости и чврстоће. Садашњи резултати показују да чак и врло лагана и вероватно непотпуна никлована облога у унутрашњости већ има значајан повољан ефекат на крутост и чврстоћу конструкције.

Очекује се да ће темељније превлачење довести до много бољег побољшања механичких својстава. Директно поређење крутости и чврстоће са тренутним резултатима можда нема смисла јер су материјали смоле и дизајн решетке различит. Међутим, занимљиво је напоменути да су пријавили повећање крутости и чврстоће за 1,29 и 1,38 пута након никловања.

Ова повећања су знатно мања од оних уочених у тренутном случају. Могући разлог је њихова велика јединична ћелија решетке ($7,5\text{mm}$ дужине) и подупирачи (пречник 1mm) ограничавају површину и доводе до много мањег односа никла и смоле, тако да је никл много мање допринео повећању крутости и чврстоће. [3]

Предтретман					
Снага лома MPa	Без никловања	Потапање угљеничних наноцеви	Потапање графена	Прскање алуминијумом	Умакање у паладијум хлорид
	3,63	9,91	19,31	8,58	15,05
	0,45	0,63	0,64	0,57	0,69

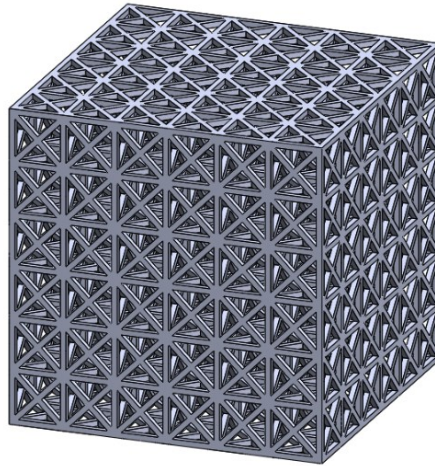
Табела 6: Оптерећење на притисак и померање микро решеткастих структура са дужином јединичне ћелије од 130 μ m са различитим никлованим третманима [3]



Слика 12: Однос компресијског оптерећења и померања до отказа 130 μ m микро решеткасте структуре са различитим третманима облагања [3]

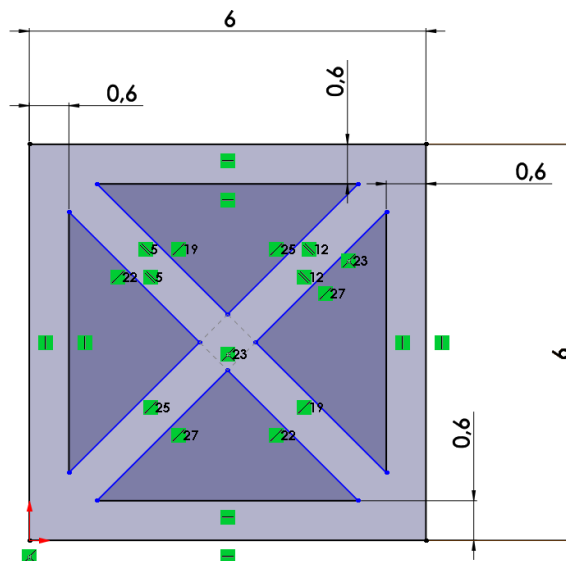
9. Моделирање микро мреже

Један од задатака нашег семинарског рада јесте моделирање микро мреже у неком од CAD (енгл. *Computer-Aided Design*) софтверских пакета. Модел (Слика 13) је направљен у SolidWorks-у. Поступак детаљног моделирања биће описан у наставку.



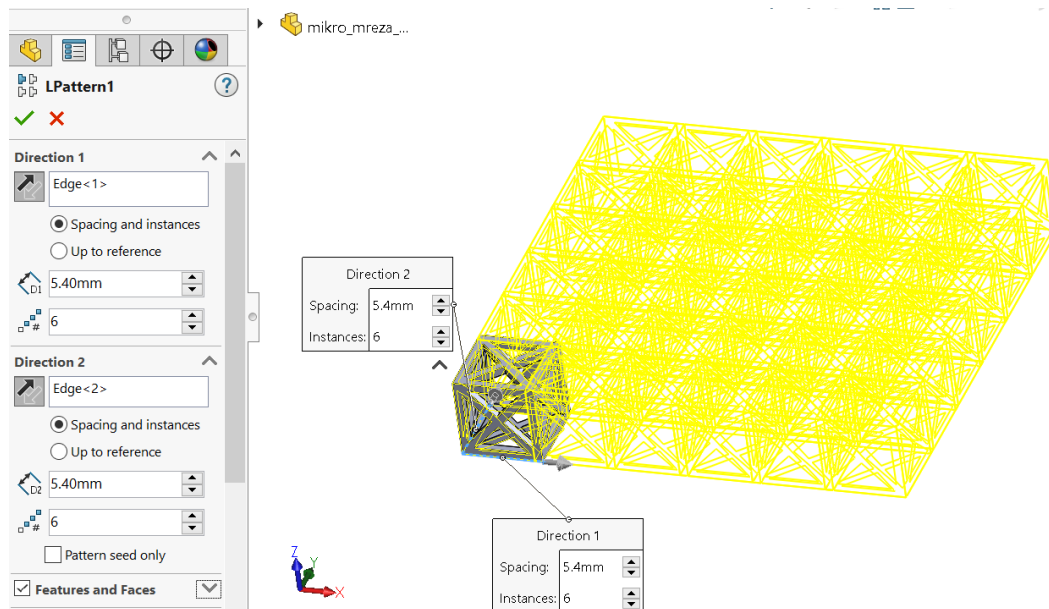
Слика 13: SolidWorks модел микро мреже

Најпре смо приступили моделирању коцке која представља основу за прављење микро мреже. За цртање контуре, употребљена је функција “**Sketch**” у оквиру Оху равни. Коцка је димензије 6mm, док дебљина ‘зида’ износи 0,6mm (Слика 14). До основног елемента пуне запремине, долази се се помоћу функције “**Extruded Boss/Base**”.



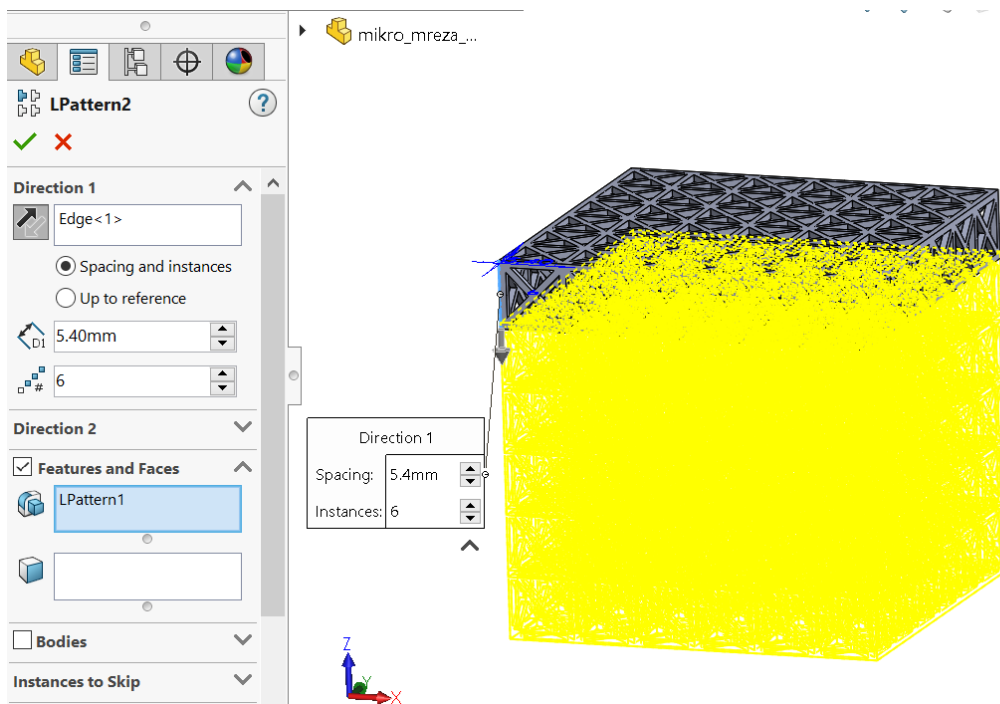
Слика 14: Геометрија основног елемента микро мреже

Након тога, употребом функције “**Linear Pattern**” понављамо дати елемент жељени број пута. Ова функција извршена је два пута , у x и у правцу (Слика 15).



Слика 15: Параметри функције “Linear Pattern” (x и y оса)

Аналогно претходном кораку, коришћењем исте функције (Слика 16.) – врши се понављање датих елемената по z оси како би добили коначни CAD модел.

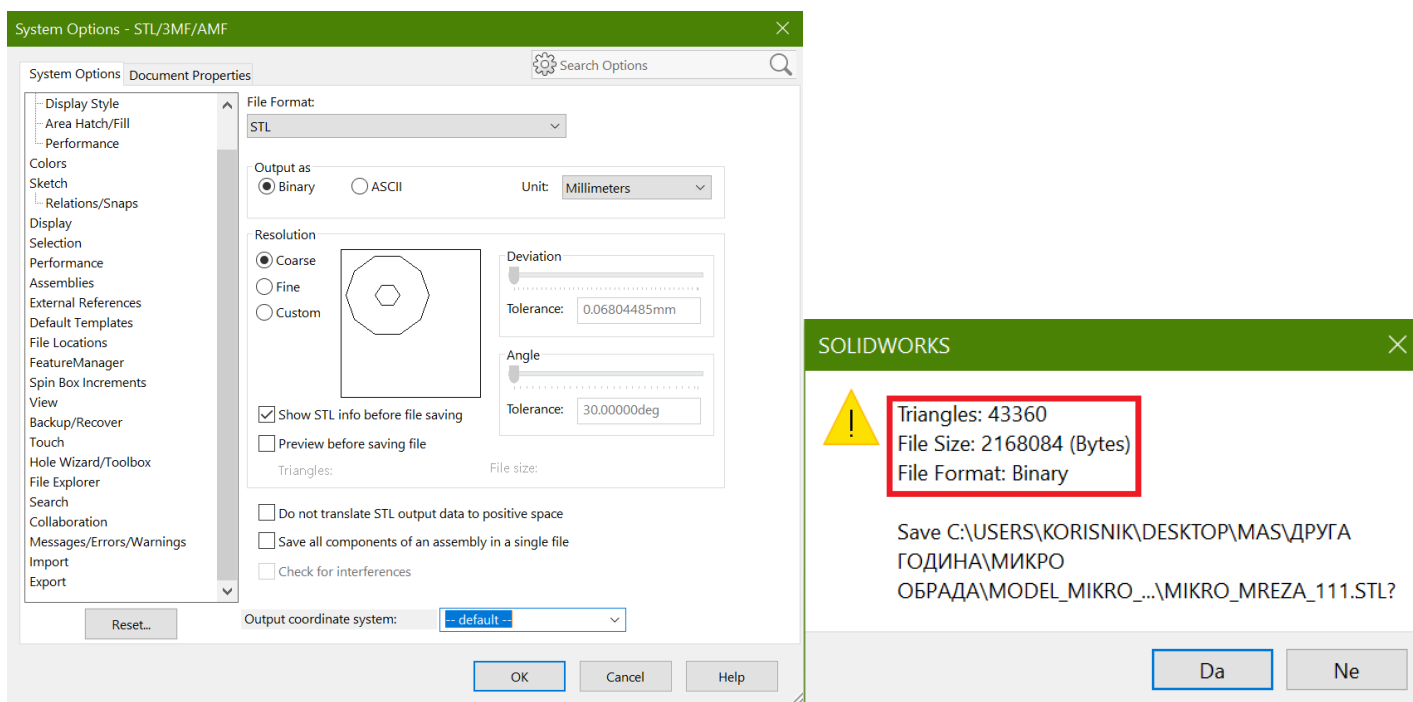


Слика 16: Параметри функције “Linear Pattern” (z оса)

Конечна димензија микро мреже износи $a=33\text{mm}$

Овим кораком, завршено је моделирање микро мреже, при чему је потребно дати модел сачувати у STL формату. STL формат представља апроксимацију површине модела помоћу троуглова одређених позиција и оријентација. Апроксимација површине модела ће бити утолико боља, уколико су ови троуглови што мањи, али на рачун повећања величине фајлова. STL формат као такав, представља улаз у софтвер који ће касније генерисати G код за управљање машином алатком за моделирање фузионим таложењем.

Експорт STL фајлова је веома једноставан. Када имамо 3D модел отворен у SolidWorks софтверу, идемо на опцију чувања модела уз избор .stl формата (File > Save As > .stl формат са dropdown листе).



Слика 17: Подешавање квалитета STL формата и резултат чувања

У оквиру овог прозора (Слика 17.), могуће је да изаберемо какав тип STL формата желимо (**Binary** или **ASCII**). Binary формат даће мање фајлове, тако да се обично он препоручује.

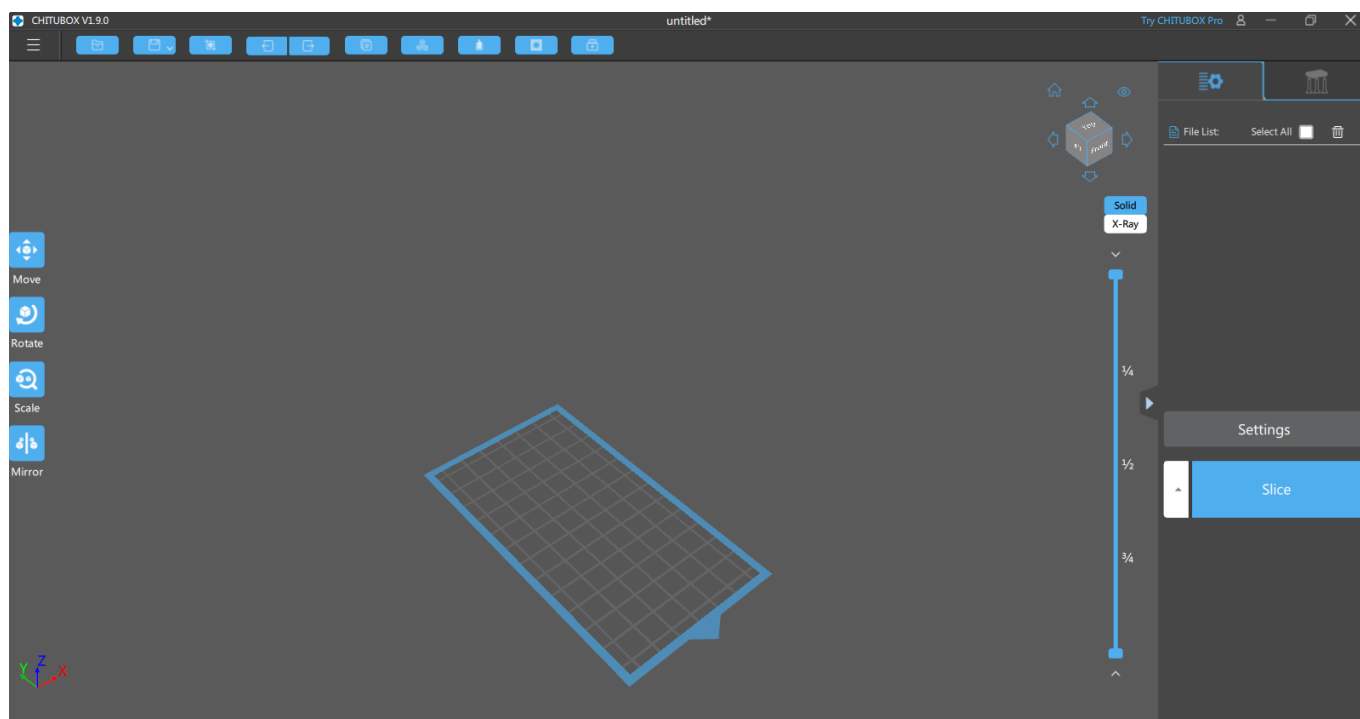
Затим имамо **подешавање резолуције** са две основне опције: грубо и фино, као и custom опцију.

Такође, имамо могућност да контролишемо и **девијацију и углове троугла** током .stl конверзије, где је девијација изражена кроз линеарну димензију и односи се на максимално одступање .stl фајла у односу на почетни оригинални 3D CAD модел. Дефинисање угла односи се на углове између суседних троуглова површине модела

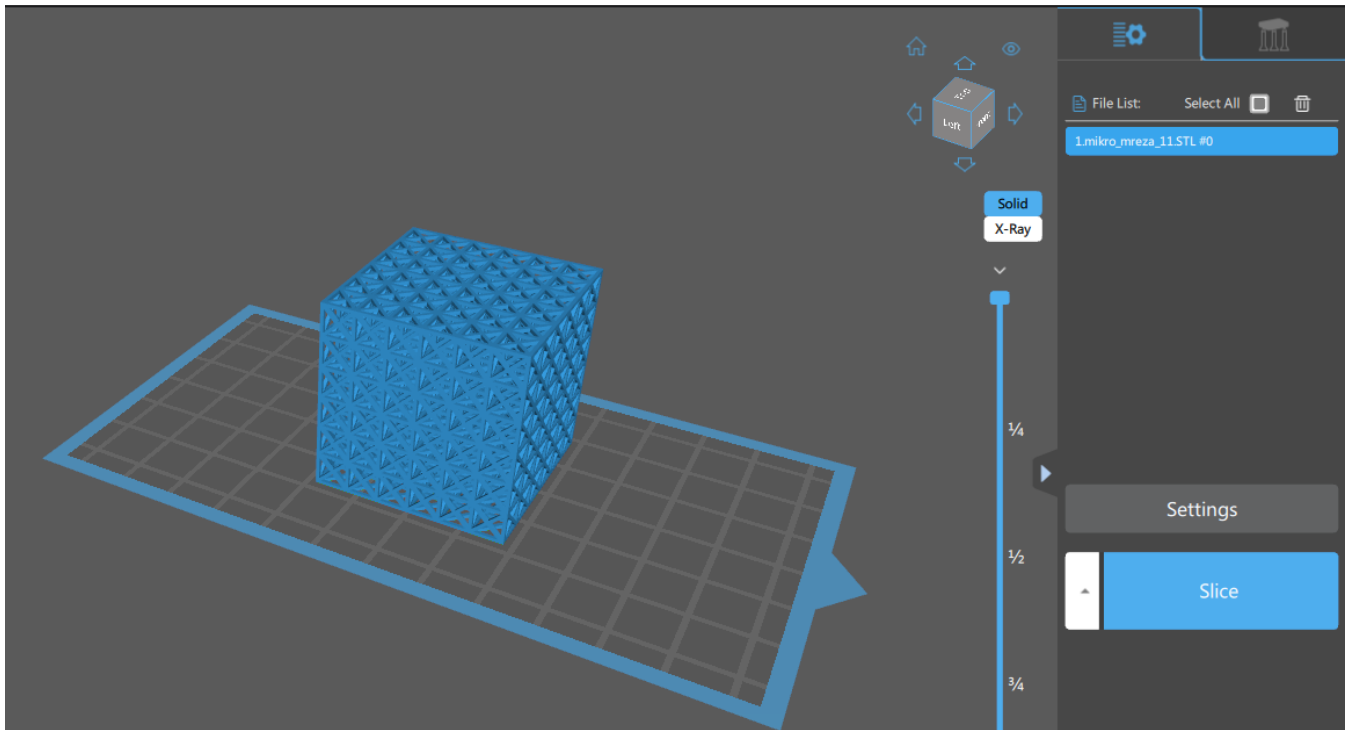
10. Припреma и израда микро mreže DLP методом применом софтверског пакета ChiTuBox

Након моделирања у SolidWorks-у, следећи корак је припрема и израда микро mreže DLP методом у оквиру софтверског пакета за извођење 3D штампе ChiTuBox, који је изабран због једноставности интерфејса. CAD модел микро mreže је неопходно превести у формат који је најчешће типа prt, obj, step, fbx, 3ds итд. За коришћење наведеног програмског пакета, модел је преведен у .STL екстензију, који представља стандардни извезен фајл и за штампање DLP методом.

При покретању програма, појављује се главни интерфејс (слика 18) где се могу уочити горња трака алата, картица за постављање подршке, опција slice (дугме за сечење), заједно са неким често коришћеним алатима попут алата за позиционирање (транспирање, ротирање, увећавање) и уређивање. Када се увезе модел, појавиће се на листи модела са десне стране (слика 19). Кликом на модел, он ће се сам поставити на плочу за израду.

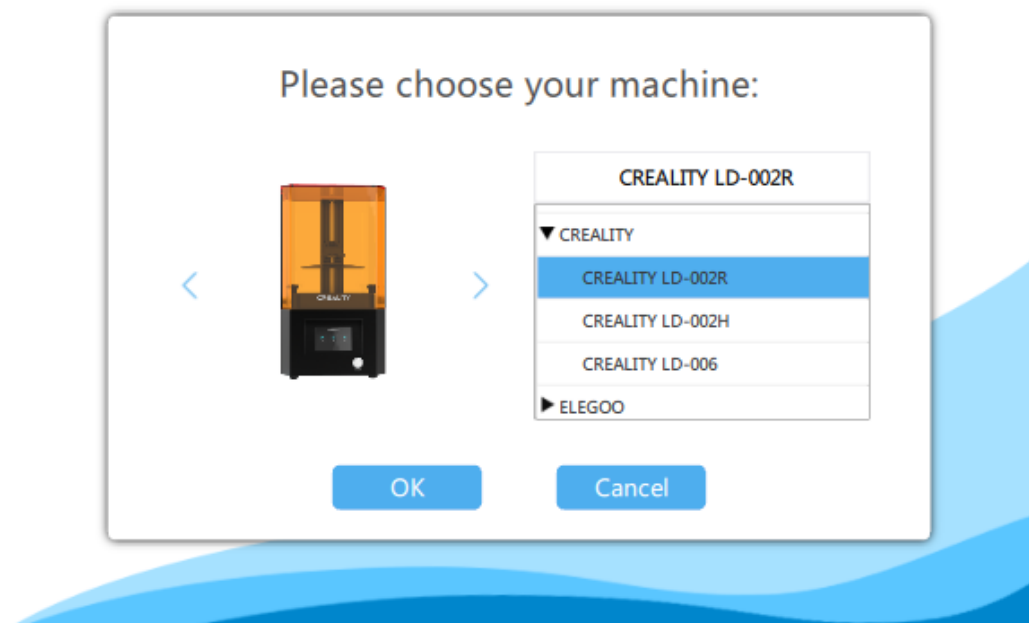


Слика 18: Главни интерфејс програма ChiTuBox



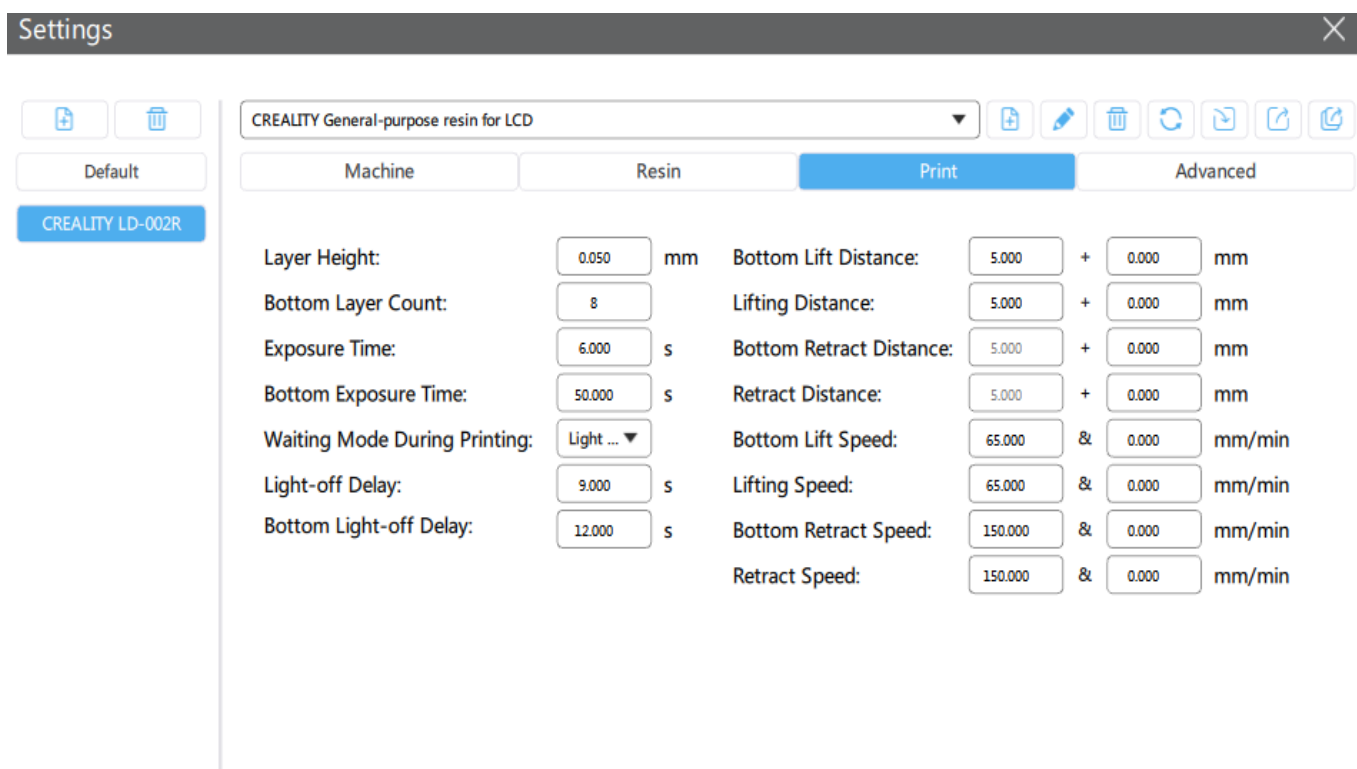
Слика 19: Увезен 3D модел микро мреже

Након увожења модела у програм, неопходно је изабрати машину на којој ће се вршити израда мреже, која је у нашем случају Creality LD-002R (слика 20).



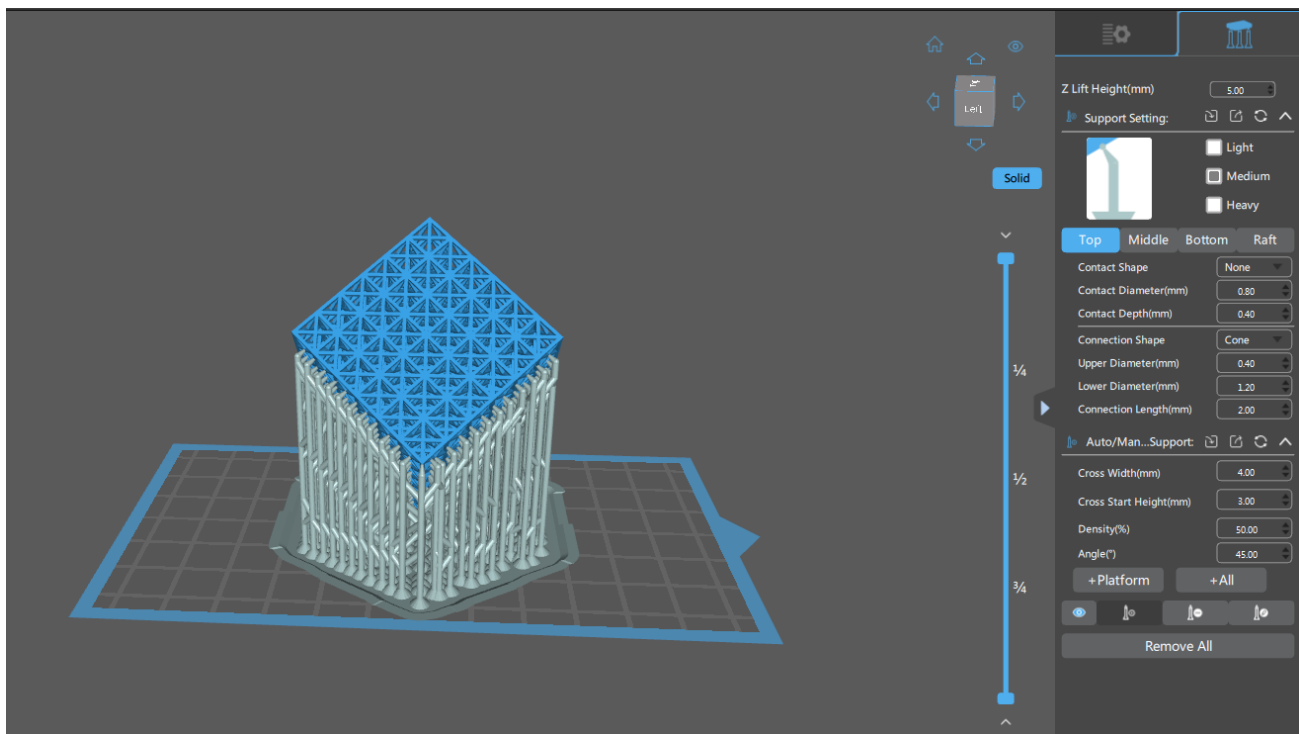
Слика 20: Избор машине

Припрема модела за израду обухвата варирање одређених параметара. Покретањем картице Settings > Print, отвара се прозор са параметрима које је потребно подесити попут тачне висине сваког очврслог слоја (Layer Height), времена изгалању светлости, односно времена експозиције (Exposure time), брзине којом се плоча креће при подизању од смоле између слојева (Lifting Speed), параметра укупног времена за које је UV искључена између слојева, што обезбеђује правилан распоред смоле по новим слојевима (Light-off Delay). На слици 21 су приказани параметри који су подешавани за израду наше микро мреже.



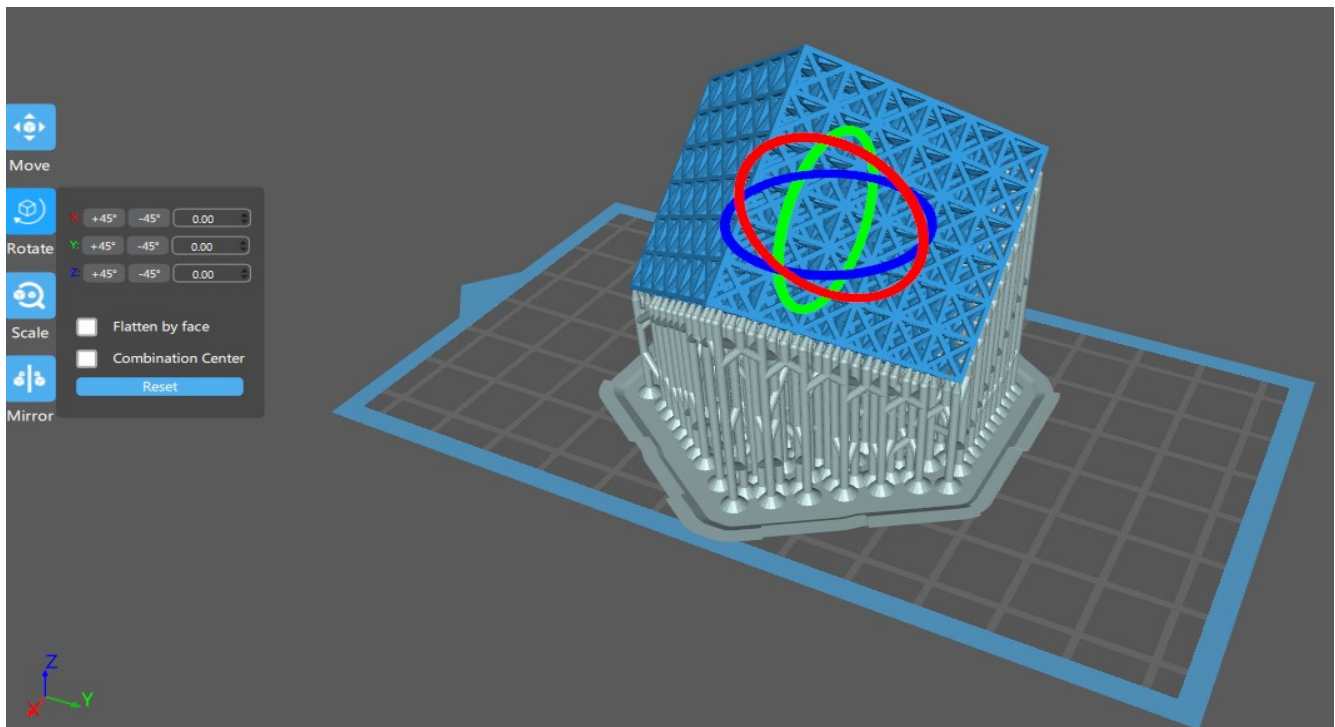
Слика 21: Подешавање параметара за израду

Следећи корак је постављање подршке, односно потпоре, при чему мора да се води рачуна о врху подршке која омогућава везу између исте и модела микро мреже, па је зато од велике важности што боље подесити параметре врха (contact depth, upper diameter and lower diameter). Вредност за contact depth треба да буде већа, како би се остварио довољан контакт између подршке и дела. Уколико је вредност наведеног параметра много велика, при накнадној обради може доћи до настанка трагова оштећења, а ако је вредност премала, неће се остварити погодни контакт између дела и подршке. Подешавањем параметра upper diameter се одређује јачина ослонца, а уз помоћ параметра lower diameter се одређује доњи пречник подршке. Густину подршке је могуће поставити на Light, Medium, Heavy, при чему се у овом случају бира Medium густина мреже. На слици 22. је приказан модел са формираном подршком.



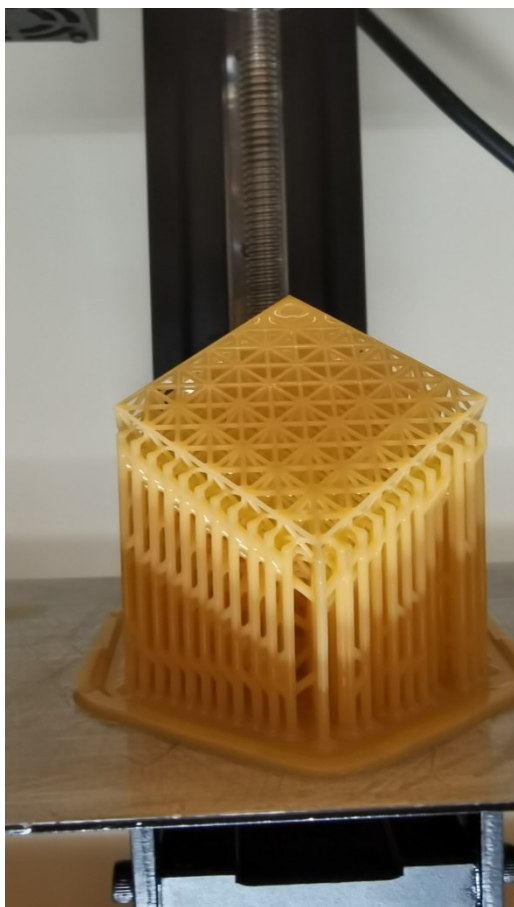
Слика 22: Формирана подршка модела

Да би се остварио што бољи квалитет штампе, потребно је извршити оријентацију дела у односу на осе координатног система модела, због процеса узастопног сечења и штампања дела у смеру Z осе. У нашем случају, модел је заротиран за 45 степени у односу на све три осе (слика 23). Након тога, покреће се команда 'Slice' уз помоћ које се припрема модел за штампу.

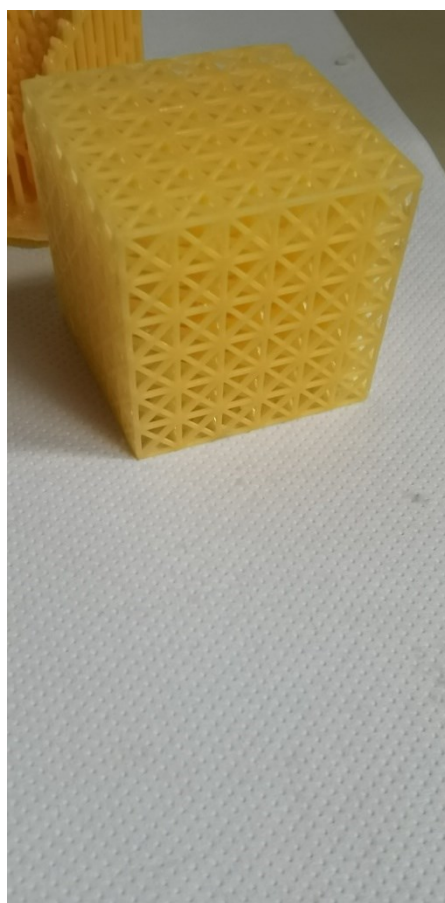


Слика 23: Ротација модела за 45 степени у односу на све три осе координатног система

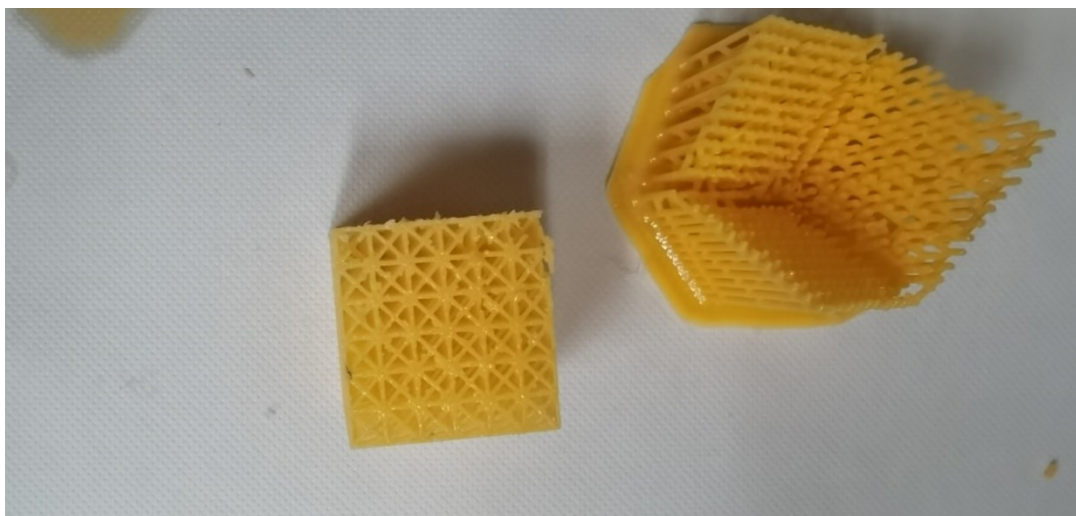
На сликама 24, 25 и 26 је приказана микро мрежа након израде:



Слика 24



Слика 25



Слика 26

11. Мерење и контрола

На основу израђене микро мреже применом DLP методе приступа се мерењу и контроли њене структуре, и то оних мера структуре које су мање од 1 mm.

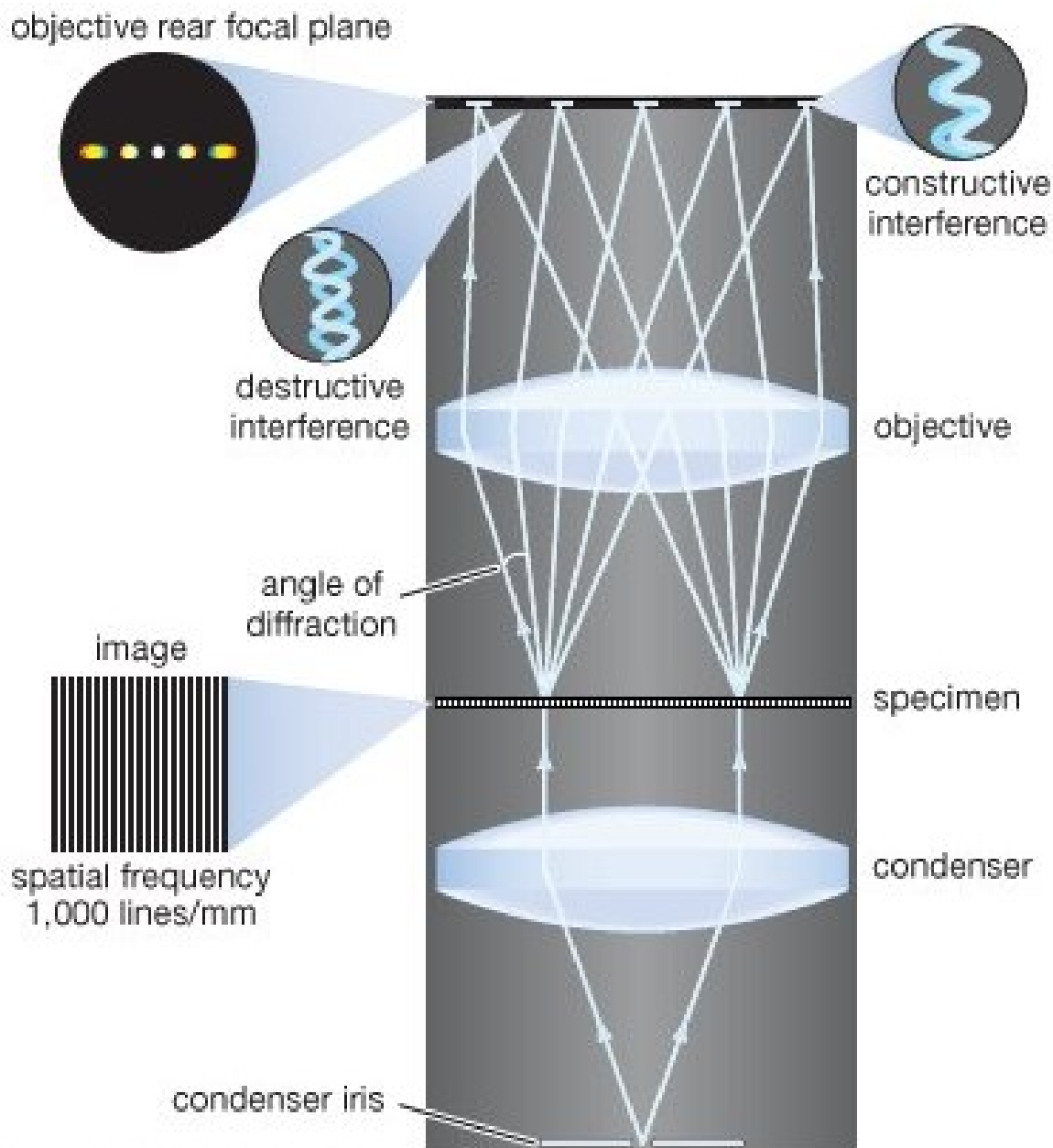
Мерење је извршено захваљујући оптичким микроскопом Mustool G600 Digital (Слика 26). Овај модел микроскопа користи стаклена сочива за добијање слика и зумирање структуре површине посматраног објекта. Микроскоп Mustool G600 Digital увеличава 600 пута са дистнцом од објекта од 15 mm и на њему се налази уређај за навигацију са LED екраном величине 4,3 in и резолуције 1080 px, као и камера од 3,6 мегапиксела, а за складиштење снимљених фотографија користи се MicroSD меморијска картица.



Слика 26: Микроскоп Mustool G600

Тастери који се налазе на микроскопу служе за укључивање/искључивање микроскопа, кретање кроз мени и његово подешавање, као и тастер ОК за потврду подешавања и генерисање слика које се складиште на меморијску картицу, чије се место за прикључење налази са задње стране микроскопа, тј. LED екрана.

Формирање слике је омогућено на основу микроскопских камера, и то тако да објектив прикупља широк спектар зракова са сваке тачке посматране структуре објекта и приказује тај зрак на предњој жижној равни окулара (Слика 27). У одсуству аберације геометријски зраци формирају тачкасту слику сваке тачке објекта, а у присуству аберације свака тачка је представљена нејасном тачком.



Слика 27: Формирање слике

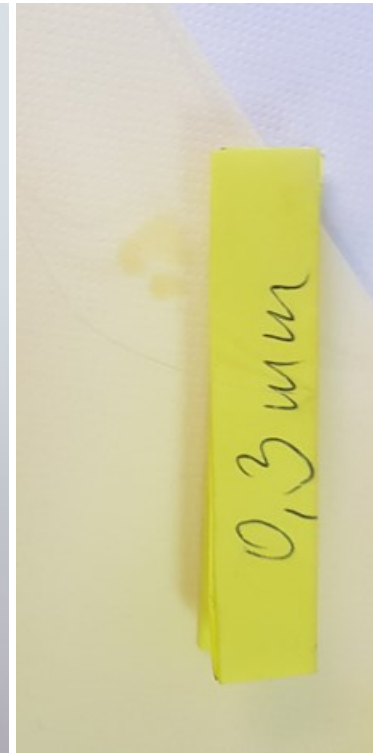
Окулар је дизајниран да снима зраке на погодној удаљености и за преглед слике. Светлост слике је одређена величином отвора сочива и отвором зенице ока. Жижну даљину и резултујуће увећање објекта треба изабрати тако да се постигне жељена резолуција објекта у величини погодној за гледање кроз окулар.

Само формирање слике је компликовано због појаве дифракције (за мање детаље на структури објекта је шири угао дифракције) и сметњи које се дешавају у систему за снимање са захтевом да се користи извор светлости који је снимљен у жижној равни.

Коришћена су два еталона од 0,6 mm (Слика 28) и од 0,3 mm (Слика 29), на основу којих је вршена контрола мера структуре мреже.



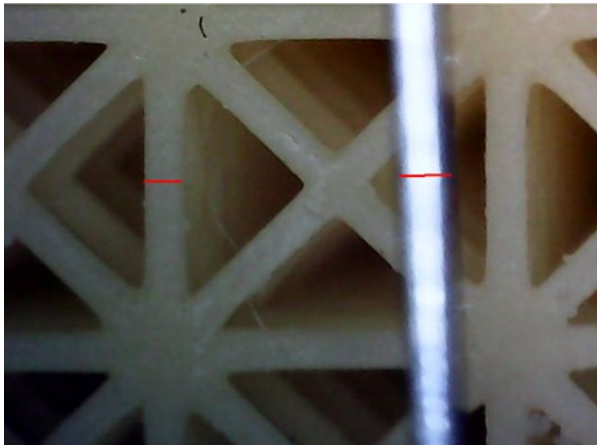
Слика 28: Еталон 0,6 mm



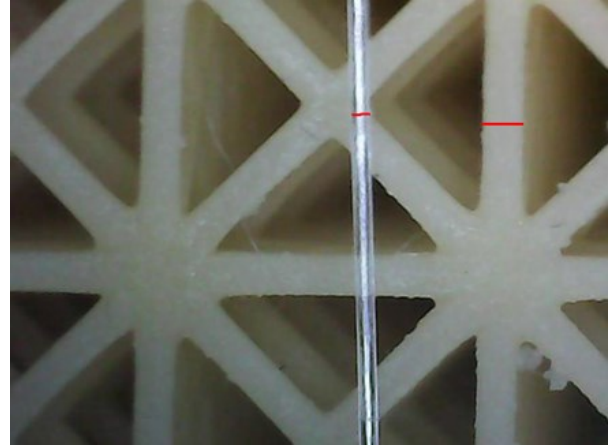
Слика 29: Еталон 0,3 mm

Микроскопским камерама је снимљена структура микро мреже и еталона (Слика 30 и Слика 31).

Снимљене слике микро мреже на микроскопу се преносе на рачунар, и у специјалном развијеном програму се утврђује одступање мерене величине од номиналних вредности задатих у програмском пакету SolidWorks. Разлика између добијеног резултата мерења и тачне (номиналне) вредности мерене величине добија се грешка мерења.



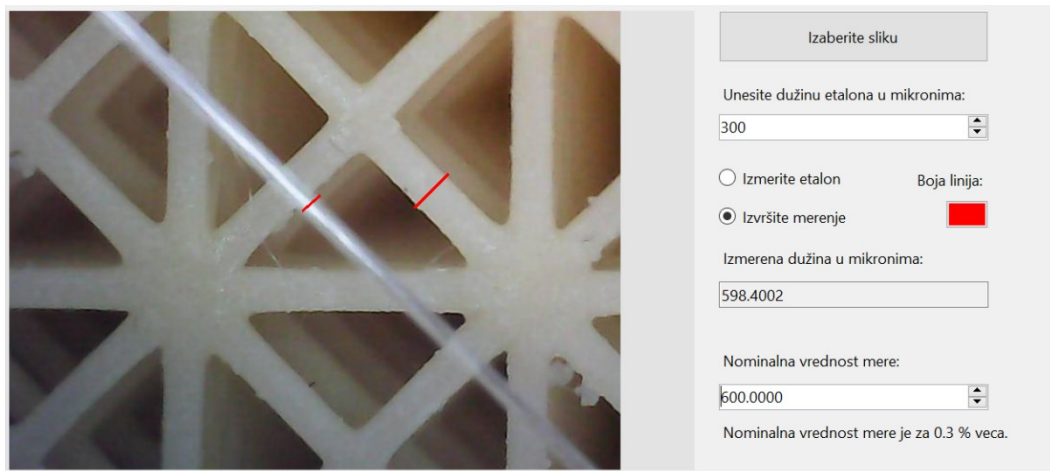
Слика 30: Микро мрежа и еталон 0,6 mm



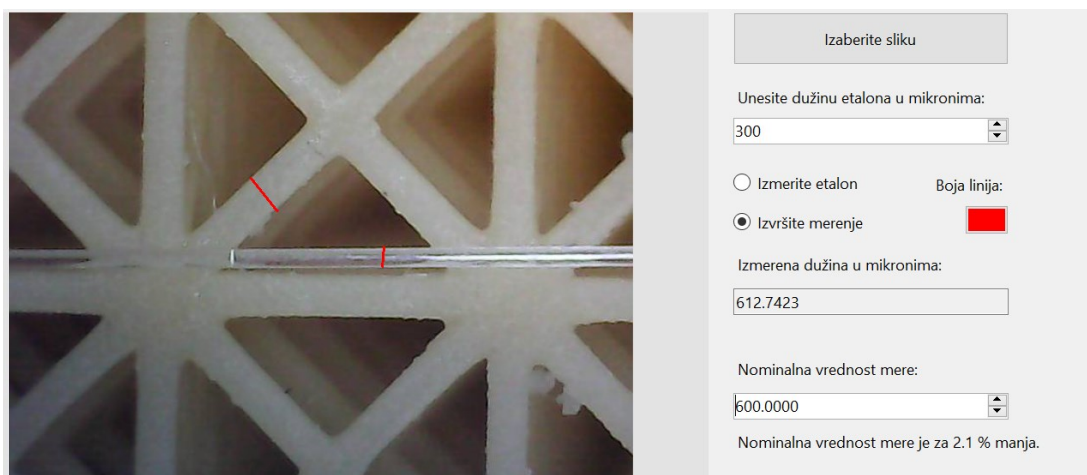
Слика 31: Микро мрежа и еталон 0,3 mm

Поступак контроле мерног објекта, тј. микро мреже у специјалном развијеном софтверу:

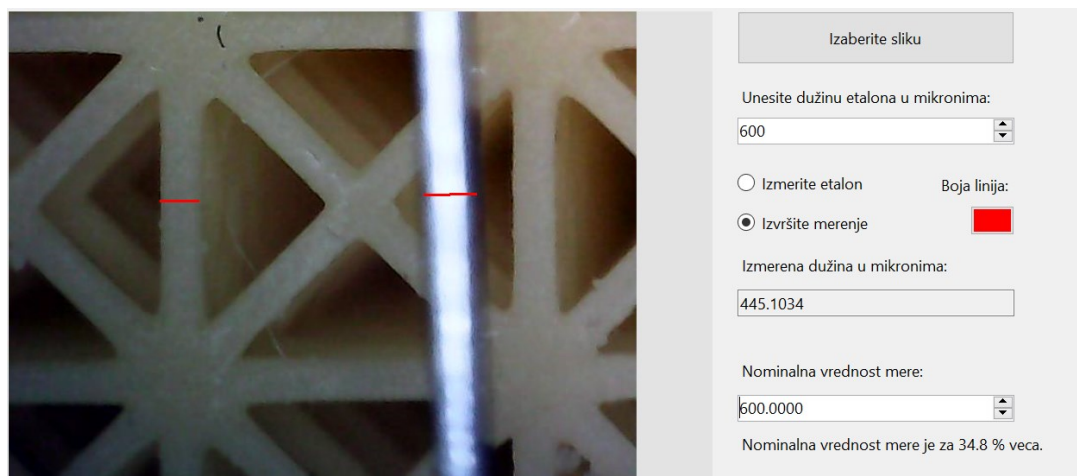
1. Уноси се слика из одговарајућег фолдера.
2. Уноси се дужина еталона у микронима – 300 микрона (Слика 32 и Слика 33) и 600 микрона (Слика 34).
3. Уноси се номинална вредност у микронима жељене структуре, у нашем случају то су кракови микро мреже (зидови) – 600 микрона.
4. Извршавање мерења (црвене лније на сликама 32, 33 и 34): повлаче се две црвене линије, једна је за ширину еталона, а друга за ширину зидова микро мреже.
5. Притиском на Enter на тастатури рачунара се добија измерена дужина у микронима и номинална вредност мере у процентима када је већа или мања.



Слика 32: Софтвер за контролу – мерење 1.



Слика 33: Софтвер за контролу – мерење 2.



Слика 34: Софтвер за контролу – мерење 3.

12. Закључак

Микро мреже имају најширу примену у медицини. Конструкције микро решетке су ограничене потребом да се задржи порозност и величине пора које су корисне за раст ткива. Хранљиве материје се у почетку транспортују кроз мреже путем протока течности. Неке од примена микро мрежа су биолошки раст ткива, зарастање прелома, регенерација хрскавице, васкуларизација...

У овом раду је показано да се смањењем величине ћелије са 150 μm на 100 μm повећала притисна крутост са 8,8 на 11,1 МПа. Никловање добијене штампане структуре је упадљиво повећало његову крутост и отпорност на отказ. Претходно третирање графеном или активирање палладијум хлоридом омогућава много боље накнадно никловање него третман са CNT-ом или прскање алуминијумом.

С обзиром да се микро мреже израђују различитим процесима 3D штампања, сваки од процеса има своје карактеристике што се тиче материјала, величине израђеног дела, дебљине слоја итд.

Преглед поменутих процеса у досадашњем тексту, као и њихове карактеристике су дате у табели 7.

Иницијални поступак израде микро мреже је пројектовање CAD модела у програмском пакету SolidWorks, и ту су задате номиналне мере кракова (зидова). На основу конверзије модела (микро мреже) у STL формат могућа је његова даља израда. Структура микро мреже израђена је DLP методом (адитивна технологија), чији су режими обраде дефинисани за STL модел у софтверском пакету ChiTuBox. Након израде микро мреже приступа се поступку мерења и контроле микронских мера на оптичком микроскопу. Закључено је да стварна мера зидова, за изабрани део мерене структуре, одступа од номиналне мере од 600 микрона.

	Процес штампања	Материјал	Величина израђеног дела (μm)
Процес заснован на екструзији	Екструзија	PLA, поликапролактон и хидроксиапатит	250-500 μm
Процеси очвршћавања смоле	Микро стереолитографија	Биокомпатибилни и биоразградиви материјали	5-10 μm (висина слоја) 150 μm
	Polyjet	Композитни материјали	100 μm
Процеси на бази праха	Ласерско синтеровање	Титанијум, различити метали, нерђајући челик	200 μm

Табела 7: Процеси штампања и њихове карактеристике

13. Литература

- [1] Kanygul Chynybekova and Soo-Mi Cho: *Flexible Patterns for Soft 3D Printed Fabrications*
- [2] Paul F. Egan: *Integrated Design Approaches for 3D Printed Tissue Scaffolds: Review and Outlook*
- [3] Chow Shing Shin and Yu Chia Chang: *Fabrication and Compressive Behavior of a Micro-Lattice Composite by High Resolution DLP Stereolithography*
- [4] <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/15/2355/htm>