

# Ispitivanje livljivosti materijala ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> KOD kalupa izrađenih aditivnom tehnologijom

---

**Grčić, Matija**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:032912>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODIJEL  
*Specijalistični diplomski stručni studij Strojарstva*

Matija Grčić

**ISPITIVANJE LIVLJIVOSTI  
MATERIJALA  $ZnAl_4Cu_3$  KOD  
KALUPA IZRAĐENIH  
ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

Diplomski rad

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
*STROJARSKI ODIJEL*  
*Specijalistični diplomski stručni studij Strojarsva*

Matija Grčić

**ISPITIVANJE LIVLJIVOSTI  
MATERIJALA  $ZnAl_4Cu_3$  KOD  
KALUPA IZRAĐENIH  
ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

Diplomski rad

Mentor:  
mag.ing.str. Josip Groš

Karlovac, 2015.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički studij: Strojarsva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 20.10.2015

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Matija Grčić**

Matični broj: 0248017409

Naslov: **ISPITIVANJE LIVLJIVOSTI MATERIJALA  $ZnAl_4Cu_3$  KOD KALUPA IZRAĐENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

Opis zadatka:

Suvremeni trend razvoja novih strojeva i uređaja u svrhu dobivanja gotovih dijelova u što kraćem vremenskom roku dovodi do razvoja aditivnih tehnologija. Metalni praškasti materijali na tržištu su i dalje relativno skupi. U radu se treba spojiti dvije tehnologije za dobivanje manje serije gotovih proizvoda.

Student treba u radu objasniti:

- Objasniti tehnologiju lijevanja u jednokratne kalupe
- Objasniti aditivnu tehnologiju 3D tiska
- Napraviti pred testiranja lijevanja  $ZnAl_4Cu_3$  u kalup načinjen 3D tiskom
- Izrada modificiranog kalupa

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

02.09.2015

12.10.2015

20.10.2015

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Josip Groš mag.ing.stroj.

dipl.ing.Marijan Brozović

## **PREDGOVOR**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se Mentoru mag.ing.str. Josipu Groš, tvornici Pes d.o.o te tvornici Croatia Pumpe Nova d.o.o.

Matija Grčić

## SAŽETAK

Diplomski rad ispituje livljivosti materijala  $ZnAl_4Cu_3$  u kalupe načinjene aditivnom tehnologijom. Konstrukcija i dizajn kalupa razvija se pomoću programskog paketa Catia V5. Kalupi su načinjeni pomoću trodimenzionalnog printera Zprint 450 firme ZCorporation, smješten u Laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. Lijeva se materijal Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u Tvrтки Pes d.o.o. Termički premazi cirkon-dioksida ( $ZrO_2$ ) vrše se u tvornici Croatia Pumpe Nova d.o.o. Nakon provedenih ispitivanja livljivosti na kalupima načinjenim aditivnom tehnologijom na uređaju Zprint 450, ispitiva se i broj ciklusa koji kalup može izdržati, temperature istoga, težina odljevka u odnosu na idealni te kvaliteta površine.

Ključne riječi:

- lijevanje, livljivost, aditivne tehnologije, trodimenzionalni tisak, 3D printer, Zprint 450,  $ZnAl_4Cu_3$ ,  $ZrO_2$

## SUMMARY

Graduation thesis contains castability testing, through three experiments on molds made with additive technology. Construction and design of molds are developed using Catia V5 software package. Molds were printed using three-dimensional printer Zprinter 450 from Zcorporation, located in the lab of University of Applied Sciences in Karlovac. Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) is material for casting in company Pes d.o.o. Thermal coatings of zirconium oxide ( $ZrO_2$ ) are performed at the factory Croatia Pumpe Nova d.o.o. After conducted castability tests of printed molds, there are also the tests of the number of cycles that the mold can withstand, temperature, the casting weight comparing to ideal weight and surface quality.

Key words:

- molding, castability, additive technology, three-dimensional printing, 3D printer, Zprint 450,  $ZnAl_4Cu_3$ ,  $ZrO_2$

**SADRŽAJ**

1. UVOD.....	1
1.1. Postupak kod lijevanja.....	1
1.2. Skrućivanje .....	2
1.3. Livljivost.....	2
1.4. Vrste lijevanja .....	2
1.4.1. Lijevanje u jednokratne kalupe .....	2
1.4.2. Lijevanje u stalne kalupe .....	3
2. KONSTRUKCIJA KALUPA .....	3
3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA.....	5
3.1. 3DP tehnologija.....	5
3.2. Princip rada .....	7
3.3. Svojstva ZPrinter-a 450 .....	9
4. MATERIJAL ( $ZnAl_4Cu_3$ ).....	10
5. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 1 .....	13
5.1. Konstrukcija i dizajn kalupa 1 .....	13
5.1.1. Dizajn donjeg dijela kalupa 1.....	13
5.1.2. Dizajn gornjeg dijela kalupa 1 .....	17
5.2. Izrada kalupa 1 .....	20
5.3. Lijevanje litine u kalup 1 .....	21
5.4. Rezultati lijevanja litine u kalup 1 .....	23
6. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 2.....	23
6.1. Konstrukcija i dizajn kalupa 2 .....	24
6.1.1. Dizajn donjeg dijela kalupa 2.....	24
6.1.2. Dizajn gornjeg desnog dijela kalupa 2 .....	28
6.1.3. Dizajn gornjeg lijevog dijela kalupa 2.....	31
6.2. Izrada kalupa 2 .....	33
6.3. Lijevanje litine u kalup 2 .....	36
6.3.1. Prvo lijevanje .....	36
6.3.2. Drugo lijevanje.....	39
6.3.3. Treće lijevanje.....	42
6.4. Rezultati lijevanja litine u kalup 2 .....	44
7. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 3.....	44
7.1. Priprema kalupa 3.....	44
7.2. Lijevanje litine u kalup 3 .....	46
7.2.1. Prvo lijevanje .....	46
7.2.2. Drugo lijevanje.....	48
7.2.3. Treće lijevanje.....	50
7.2.4. Četvrto lijevanje .....	52
7.3. Rezultati lijevanja litine u kalup 3 .....	54
8. ZAKLJUČAK .....	55
9. PRILOZI .....	56
10. LITERATURA.....	57

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Prostorni prikaz kalupa u tri dijela.....	3
Slika 2.	Presjek kanala Arhimedove spirale kalupa .....	4
Slika 3.	Presjek uljevnog dijela kalupa.....	4
Slika 4.	Primjeri isprintanih objekata .....	5
Slika 5.	ZPrinter 450.....	6
Slika 6.	Polaganje praha na tiskovnu platofrmu.....	7
Slika 7.	Otklanjanje viška prašine nakon printanja .....	8
Slika 8.	Materijal Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ).....	10
Slika 9.	Taljenje legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ).....	11
Slika 10.	Odstranjivanje oslobođenih oksida sa površine taline.....	11
Slika 11.	Kalup 1 .....	13
Slika 12.	Odabir izrade novog „Part-a“ u Catia-i V5 .....	14
Slika 13.	Opcija „Sketch“ za početak skiciranja.....	14
Slika 14.	Konstruiranje kvadrata 50x50mm .....	14
Slika 15.	Opcija „Pad“ za izradu prizme .....	15
Slika 16.	Opcija „Slot“ za izradu Arhimedove spirale .....	15
Slika 17.	Opcija „Draft“ za izradu konusa.....	16
Slika 18.	Opcija „Pocket“ za izradu provrta i bočnog utora na kalupu.....	16
Slika 19.	Opcija „Pocket“ za izradu utora za matice M5 .....	17
Slika 20.	Opcija „Hole“ za izradu utora za glavu vijka.....	17
Slika 21.	Opcija „Rectangular Pattern“ za izradu preostalih utora .....	18
Slika 22.	Konstruiranje uljevnog sustava .....	18
Slika 23.	Opcija „Groove“ za izradu uljevnog sustava .....	19
Slika 24.	Gornji dio kalupa 1 .....	19
Slika 25.	Priprema printera za izradu kalupa 1 .....	20
Slika 26.	Isprintani gornji i donji dio kalupa 1 .....	20
Slika 27.	Zagrijavanje kalupa na lijevačkoj peći .....	21
Slika 28.	Ulijevanje litine Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u kalup 1 .....	21
Slika 29.	Otvaranje Kalupa 1 nakon skrućivanja litine .....	22
Slika 30.	Nepravilnosti na odljevku nastale zbog oslobođenih para iz kalupa 1 .....	22
Slika 31.	Kalup 2.....	23
Slika 32.	Konstruiranje kvadrata 100x100mm .....	24
Slika 33.	Opcija „Pad“ za izradu prizme .....	24
Slika 34.	Opcija „Spiral“ za izradu Arhimedove spirale.....	25
Slika 35.	Opcija „Slot“ za izrezivanje Arhimedove spirale iz prizme .....	25
Slika 36.	Opcija „Draft“ za izradu konusa.....	26
Slika 37.	Opcija „Pocket“ za izradu provrta i bočnog utora na kalupu 2 .....	26
Slika 38.	Opcija „Pocket“ za izradu utora za matice M5 .....	27
Slika 39.	Izrada radijusa na bridovima donjeg dijela kalupa 2 .....	27
Slika 40.	Izrada kanala za izlaz oslobođene pare tijekom procesa lijevanja .....	28
Slika 41.	Opcija „Pad“ za prizme gornjeg desnog dijela kalupa 2.....	28
Slika 42.	Konstruiranje uljevnog sustava opcijom „Groove“.....	29
Slika 43.	Izrada radijusa pomoću opcije „Edge fillet“ .....	29
Slika 44.	Rezanje cijelog gornjeg kalupa na desni dio kalupa 2.....	30
Slika 45.	Izrada utora za lakše spajanje ne gornjem desnom dijelu kalupa 2.....	30
Slika 46.	Gornji desni dio kalupa 2 .....	31



Slika 47.	Ubacivanje postojećeg „Body-a“ u novi „Part“ .....	31
Slika 48.	Rezanje druge polovice gornjeg kalupa 2 opcijom „Pocket“ .....	32
Slika 49.	Izrada utora za lakše spajanje ne gornjem lijevom dijelu kalupa 2 .....	32
Slika 50.	Gornji lijevi dio kalupa 2 .....	33
Slika 51.	Pozicioniranje dijlova kalupa 2 prije izrade .....	33
Slika 52.	Odabir parametara za printanje .....	34
Slika 53.	Status printera prije početka izrade .....	34
Slika 54.	Izvještaj vremena printanja i količine utrošenog praha .....	35
Slika 55.	Isprintani dijelovi kalupa 2 .....	35
Slika 56.	Sklapanje kalupa 2 .....	36
Slika 57.	Zagrijavanje kalupa 2 na površini lijevačke peći .....	36
Slika 58.	Lijevanje legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u kalup 2 .....	37
Slika 59.	Micanje gornjeg desnog dijela kalupa 2 nakon lijevanja .....	37
Slika 60.	Nepravilnosti na odljevku prvog lijevanja .....	38
Slika 61.	Konstruiranje odljevka prema Kalupu 2 pomoću opcije „Surface design“ .....	38
Slika 62.	Masa odljevka nakon prvog lijevanja .....	39
Slika 63.	Brušenje i sklapanja kalupa 2 prije početka drugog lijevanja .....	39
Slika 64.	Micanje gornjeg lijevog dijela kalupa 2 .....	40
Slika 65.	Otisci vađenja odljevka nakon drugog lijevanja od pomoćnih alata .....	41
Slika 66.	Odljevak nakon drugog lijevanja .....	41
Slika 67.	Masa odljevka nakon drugog lijevanja .....	42
Slika 68.	Smanjenje Kalupa 2 nakon trećeg lijevanja .....	42
Slika 69.	Pucanje Kalupa 2 prilikom vađenja odljevka .....	43
Slika 70.	Kalup 2 nakon vađenja odljevka trećeg lijevanja .....	43
Slika 71.	Brušenje kalupa 3 .....	44
Slika 72.	Zagrijavanje kalupa 3 .....	45
Slika 73.	Kalup 3 nakon pripreme .....	46
Slika 74.	Kalup 3 nakon prvog lijevanja .....	47
Slika 75.	Odljevak nakon prvog lijevanja u kalupu 3 .....	47
Slika 76.	Masa odljevka nakon prvog lijevanja u kalup 3 .....	48
Slika 77.	Odljevak nakon drugog lijevanja u kalup 3 .....	49
Slika 78.	Razlika odljevaka prvog i drugog lijevanja u kalup 3 .....	49
Slika 79.	Masa odljevka nakon drugog lijevanja u kalup 3 .....	50
Slika 80.	Odljevak nakon trećeg lijevanja u kalup 3 .....	50
Slika 81.	Napukline na podnožju Arhimedove spirale kalupa 3 nakon trećeg lijevanja .....	51
Slika 82.	Masa odljevka nakon tećeg lijevanja u kalup 3 .....	51
Slika 83.	Odljevak nakon četvrtog lijevanja u kalup 3 .....	52
Slika 84.	Kalup 3 nakon četvrtog lijevanja .....	52
Slika 85.	Težina konstruirane Arhimedove spirale bez uljevnog dijela .....	53
Slika 86.	Masa odljevka nakon četvrtog lijevanja u kalup 3 .....	53

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Legirajući elementi u materijalu Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ).....	10
Tablica 2. Svojstva materijala Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ).....	12

## 1. UVOD<sup>[1]</sup>

Lijevanje je postupak oblikovanja pri kojemu se rastaljeni metal ulijeva u kalup gdje se hladi i skrućuje te poprima oblik istoga. Proizvod dobiven lijevanjem nazva se odljevak. Alati za lijevanje mogu biti pješčani kalupi za jednokratnu upotrebu i metalni ili kokile kod višekratne upotrebe. Ulijevanje u kalupe može biti gravitacijsko pod djelovanjem sile teže ili tlačno pod povišenim pritiskom radi boljeg popunjavanja kalupne šupljine.

Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku lijevanog željeza ili aluminijskog lijeva. U jedan automobil ugrađeno je više odljevaka. Osim automobilske industrije, odljevci se koriste u strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji te kod lijevanja umjetničkih skulptura.

Prednosti ovog postupka su mogućnosti dobivanja složene geometrije vanjskog i unutarnjeg dijela odljevka uz dimenzijsko točan ili približno točan oblik, velike razlike gabarita odljevka od jednog grama pa do 250 tona te se može lijevati bilo koji metal. Nedostaci lijevanja su ograničenja u mehaničkim svojstvima odnosno često se javlja poroznost do koje dolazi zbog zarobljenog zraka u kalupima, formacijom oksida ili skupljanja prilikom skrućivanja, često nedovoljna dimenzijska točnost i kvaliteta površine, opasnosti u porizvodnji te nepovoljan utjecaj na okoliš.

### ***1.1. Postupak kod lijevanja***

Kalupna šupljina ili vanjska površina odljevka, oblikuje se sabijanjem kalupne mješavine oko modela koji je većih dimenzija od konačnog proizvoda zbog smanjenja volumena tijekom skrućivanja. Kalupna mješavina je vlažna i sadrži vezivo kako bi zadržala oblik. Jezgre se polažu u kalup kako bi tvorile unutarnju geometriju odljevka. Kod lijevanja u pješčane kalupe jezgre se izrađuju od pijeska.

Kanal kroz koji rastaljeni metal teče u kalupnu šupljinu naziva se uljevni sustav. Kod lijevanja usred gravitacijske sile litina spustom stiže do razvodnika, zatim razvodnikom do ušća kroz koje ulazi u kalupnu šupljinu. Na vrhu spusta nalazi se čaška koja umanjuje prskanje i turbulentno strujanje. Spremnik kojim se nadoknađuje promjena volumena tijekom skrućivanja naziva se pojilo te bi ono trebalo biti oblikovano da se litina unutar istoga skrućuje nakon skrućivanja odljevka.

Metalu je potrebno dovesti dovoljnu količinu energije kako bi se rastalio i zagrijao do potrebne temperature pregrijanja. Faktori koji utječu na lijevanje su temperatura ulijevanja u

odnosu na temperaturu taljenja, brzina ulijevanja gdje se kod presporog ulijevanja metal prerano skrućuje i ne popuni kalup odnosno prebrzog ulijevanja gdje dolazi do turbulencija koje ubrzavaju stvaranje oksida i dovode do erozije kalupa.

## ***1.2. Skrućivanje***

Pri punjenju kalupne šupljine litina dolazi u dodir s kalupnim materijalom. Temperatura taljevine u kalupu postepeno opada zbog odvođenja topline kroz stijenke kalupa prema okolini. Kad se dostigne likvidus temperatura, kad je litina stabilna u rastaljenom stanju, započinje skrućivanje odnosno fazna pretvorba iz tekućeg u kruto agregatno stanje. Tijekom skrućivanja, zbog povećanja gustoće pakovanja uslijed ugradnje atoma u kristalnu rešetku, dolazi do diskontinuirane promjene obujma, odnosno smanjena obujma. Zbog smanjenja obujma, a mjestu koje se zadnje skrućuje u odljevku, nastaje usahlina ili šupljina. Da bi se izbjegla prisutnost ove greške u odljevku, mora se kompenzirati manjak taljevine dotokom iste iz vanjskog priljevnog dijela koje se naziva pojilo ili hranitelj.

## ***1.3. Livljivost***

Livljivost je sposobnost litine da popuni kalup prije skrućivanja. Na livljivost utječu temperatura taline, temperatura kalupa, sastav metala, viskoznost, gubici topline na okoliš, specifična toplota taljenja te i samo skrućivanje. Na livljivost utječe sklonost turbolentnom strujanju koje se opisuje Reynoldsovim brojem koji je razlika produkta brzine ulijevanja i hidrauličkog promjera kanala sa viskoznošću taline u nazivniku. Ispitivanje se vrši prema obliku Arhimedove spirale.

## ***1.4. Vrste lijevanja***

Postupak lijevanje se može podijeliti na lijevanje u jednokratne kalupe ili lijevanje u stalne kalupe te unutar njih postoje još dodatne podjele.

### **1.4.1. Lijevanje u jednokratne kalupe**

- Lijevanje u pješčane kalupe ili pješčani lijev
- Školjkasti lijev
- Lijevanje u kalupe s isparljivim modelima
- Precizni ili točni lijev
- Lijevanje u kalupe od gipsa
- Lijevanje u keramičke kalupe
- Vakuumsko kalupljenje pijeska

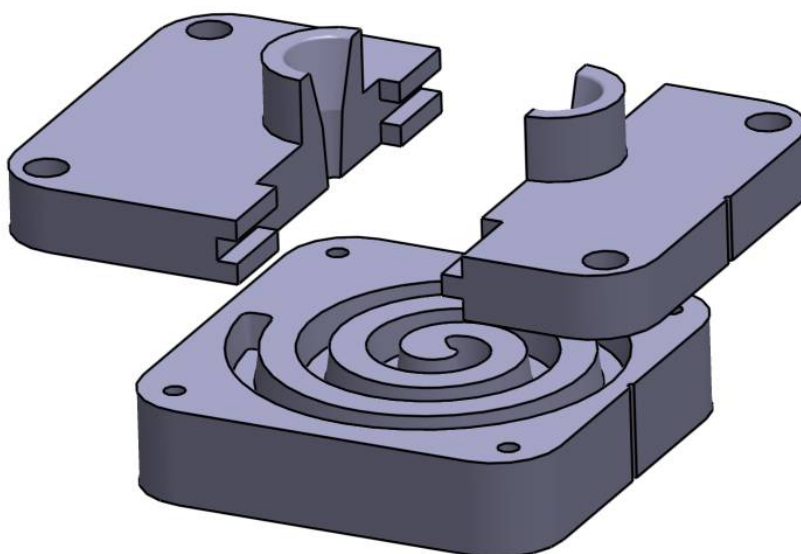
### 1.4.2. Lijevanje u stalne kalupe

- Kokilni lijev
- Tlačni lijev
- Centrifugalni lijev
- Neprekinuti ili kontinuirani lijev

## 2. KONSTRUKCIJA KALUPA

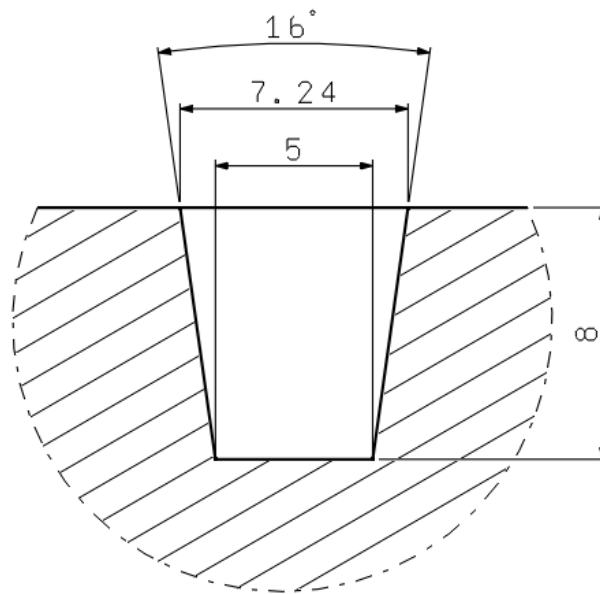
Početak svakog projekta kreće od skica i nacрта tako je i sa izradom kalupa za lijevanje. Prema gotovom proizvodu definira se dizajn kalupa te od koliko dijelova se kalup sastoji ovisno o temperaturama litine koja će se ulijevati pa do odabira materijala samog kalupa. Da bi se takav početak realizirao u danšnje vrijeme koriste se 3D programski paketi poput Solidworks-a, ProEngineer-a, Catia-e te ostalih jezika u kojima prostorno dizajniramo dijelove koji se kasnije izrađuju te dovode do realizacije. U ovom slučaju, za modeliranje samih kalupa koristi se Catia V5 koja sadrži pristupačnu opciju površinskog dizajna odnosno „Surface design“, potreban za što precizniji dizajn.

Za ispitivanje livljivosti koristi se, već prethodno navedeni, oblik Arhimedove spirale te će sami odljevak imati isti, što definira i početak dizajna kalupa. Kalup se sastoji od tri dijela odnosno donji bazni sa oblikom Arhimedove spirale koji će litina popuniti i dva gornja dijela koja skupa tvore uljevni dio kroz koji se litina ulijeva. Gornji dio dizajniran je iz dva dijela zbog lakšeg rastvaranja kalupa te vađenja samog odljevka iz istoga (Slika 1).



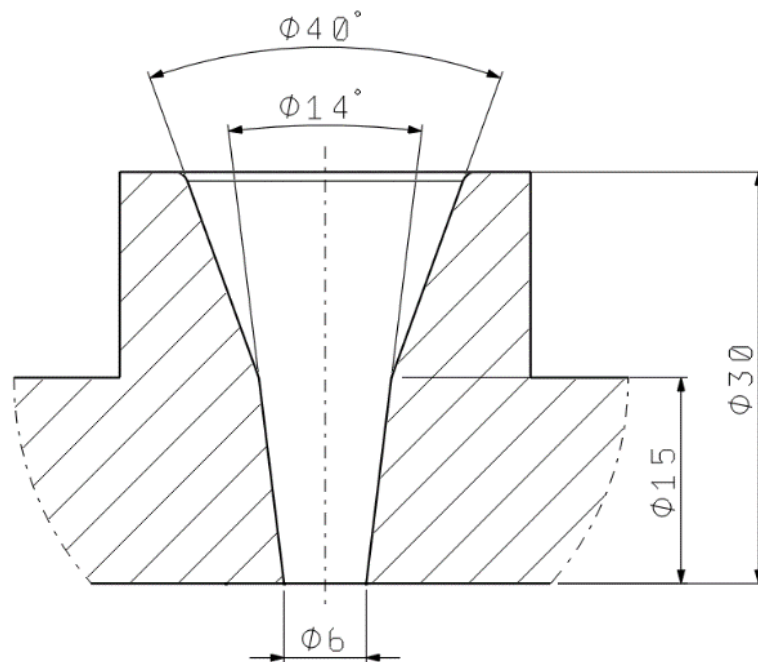
Slika 1. Prostorni prikaz kalupa u tri dijela

Zbog lakšeg vađenja odljevka nakon lijevanja na donjem dijelu kalupa na obliku koji poprima sama litina dizajnira se konus pod određenim kutem ovisno o visini odljevka (Slika 2).



**Slika 2. Presjek kanala Arhimedove spirale kalupa**

Gornji, uljevni dio mora poprimati određene kuteve u odnosu na visinu i donji dio kalupa kako bi litina što preciznije i bolje popunila kalup da ne dolazi do turbulencija litine odnosno kako bi se test livljivosti ispunio (Slika 3).



**Slika 3. Presjek uljevnog dijela kalupa**

### 3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA<sup>[2]</sup>

#### 3.1. 3DP tehnologija

Termin trodimenzionalni tisak odnosi se na grupu tehnologija koje za stvaranje objekata koriste procese bazirane na „ink jet“ tehnici (Slika 4). Prvi 3D tisak razvijen je i licenciran na Massachusetts Institute of Technology (MIT). Prve licence dane su kompanijama Soligen Corporation, Extrude Hone, ZCorporation i drugima.



**Slika 4. Primjeri isprintanih objekata**

Trodimenzionalna printerska tehnologija (3DP) koja je originalno razvijena na Massachusetts Institutu za Tehnologiju 1993. godine čini osnovu procesa izrade prototipa ZCorporation-a. 3DP tehnologija stvara trodimenzionalne fizičke prototipe tako da očvrstne slojeve položenog praha koristeći tekuće vezivo. Korištenjem 3DP tehnologije, ZCorporation je razvio 3D printere koji rade neusporedivo velikom brzinom, uz ekstremno niske troškove te djeluju unutar širokog područja primjene (Slika 5).



**Slika 5. ZPrinter 450**

CAD programski paketi korišteni u strojarstvu su brzo postali standard za gotovo sve procese razvoja proizvoda. Druge industrije, kao što je arhitektonski dizajn, također su prihvatile 3D tehnologije zbog nevjerovatno velikih prednosti koje one pružaju, uključujući poboljšanu vizualizaciju, veću automatizaciju i veću djelotvornost što se tiče troškova i ponovne uporabe 3D podataka za niz kritično važnih aplikacija. Uslijed vrlo raširenog prihvaćanja tehnologija temeljenih na 3D dizajnu, većina industrija već danas stvaraju 3D dizajnerske podatke i mogu proizvesti fizičke modele s 3D printerima iz ZCorporation-a. Softver koji pokreće ZCorporation 3D printere prihvaća sve glavne 3D formate datoteka, uključujući .stl, .wrl, .ply i .sfx datoteke. Uz ove glavne primjene u strojarstvu i arhitektonskom dizajnu, 3D printanje se proširilo i na nova tržišta uključujući medicinu, molekularno i geospacijalno modeliranje. Dodatni izvori podataka uključuju CT/MRI dijagnostičke podatke, bazu podataka o modeliranju proteinskih molekula i digitalizirane 3D podatke za skeniranje.

Kako se dizajniranje i modeliranje s 3D tehnologijama sve više i više širi, razvojni programeri su stvorili velik broj softverskih paketa prilagođenih uporabi u određenim industrijama. Nakon stvaranja „solid datoteke“ iz 3D paketa za modeliranje, korisnik može otvoriti datoteku u ZPrint-u, stolnom sučelju ZCorporatin 3D printera.

Primarna funkcija Zprinta je da reže solid objekt u digitalne poprečne presjeke, slojeve, tvoreći tako dvodimenzionalnu sliku za svaki komad širine 0.1016mm uzduž osi z. Uz sekcioniranje modela, korisnici se također mogu služiti Zprintom i za neke druge opcije proizvodnje, kao što su promatranje, orijentiranje, skaliranje, bojanje i označavanje višestrukih dijelova. Kad korisnik odluči printati rad, Zprint softver šalje dvodimenzionalne



slike poprečnih presjeka prema 3D printeru putem standardne mreže, jednako kao što softver standardnog „ink jet“ printera šalje slike i dokumente prema standardnom printeru.

### **3.2. Princip rada**

Printer stvara model jedan sloj za drugim tako da širi sloj praha, te nanošenjem vezivnog sredstva (boje) na poprečnom presjeku objekta stvara jedan sloj. Sloj otvrdnjuje kemijskom reakcijom praha i veziva. Postupak se ponavlja dok god se svaki sloj ne isprinta, te dok god pojedini dio nije gotov. Prah se ukloni četkanjem ili pomoću lagano komprimiranog zraka u zatvorenoj komori. Nakon čišćenja objekt se mora infiltrirati, jer je nakon tiska dosta krhke građe. Premazuje se određenim premazima (infiltrantima) kako bi očvrstnuo.

ZCorporation 3D printeri koriste standardnu tehnologiju „ink jet“ printanja kako bi stvorili dijelove sloj po sloj polažući tekuće vezivo na tanke slojeve praha. Umjesto postavljanja papira kao podloge pod glavu printera kao kod standardnih „ink jet“ printera, 3D printer pomiče tiskovnu glavu preko podloge od praha na koju printa poprečne presjeke objekta, podatke primljene od ZPrint softvera. Sistem zahtjeva da prah bude točno i ravnomjerno raspoređen preko tiskovne platforme. 3D printeri obavljaju ovaj zadatak koristeći pokretnu polugu za postavljanje papira i platformu, koja se u malim pomacima podiže za svaki sloj. Mehanizam valjka širi prah kojega poluga polaže na tiskovnu platformu (Slika 6).



**Slika 6. Polaganje praha na tiskovnu platformu**

Namjerno se polaže oko 30% praha više po sloju kako bi se osigurao puni sloj gusto zbijenog praha na tiskovnoj platformi. Suvišni prah pada na strminu za prekoračenje kapaciteta, u kontejner za ponovnu uporabu pri slijedećoj konstrukciji. Kad se sloj praha raširi, glava „ink jet“ printera printa poprečni presjek objekta ili donji komad dijela na glatki sloj praha, povezujući ga. Pokretna poluga tada snižava tiskovnu platformu za 0.1016mm i novi se sloj

praha se nanosi na vrh. Tiskovna glava printa vezivo na slijedeći poprečni presjek, koji se veže za već isprintane slojeve objekta. Vrijeme procesa ovisi o visini dijela ili dijelova koji se rade. Tipično, ZCorporation 3D printeri rade sva do četiri sloja na sat, ovisno o odabranoj debljini („finoći“) sloja, zasićenju i tome u koliko se boja printa dio.

Kad se 3D proces printanja završi, neučvršćen prah okružuje i podržava prah u tiskovnoj komori. Korisnik može ukloniti objekt iz komore nakon što je materijal imao dovoljno vremena da se stvrdne do kraja, te vratiti neisprintani neučvršćeni prah u platformu za ponovnu uporabu. Tehnologija ne zahtijeva uporabu čvrstih ili pridodanih potpora tijekom procesa printanja, a sav neiskorišten materijal može se ponovno iskoristiti (Slika 7).



**Slika 7. Otklanjanje viška prašine nakon printanja**

ZCorporation koristi tiskovne glave s rezolucijom od trenutno max. 600 dpi, koncentrirajući se na pristup kapačnja na zahtjev. Ova tehnologija omogućuje simultano printanje višestrukih dijelova, produžujući konačno vrijeme printanja za zanemarivo malu količinu. Kod printanja, i to posebice 3D, točnost modela ovisi o sposobnosti da se ispušta vezivo na točno određenom mjestu u točno određeno vrijeme. ZCorporation primjenjuje dokazanu 2D tehnologiju „ink jet“ printanja u boji na 3D printanje i proizvodi 3D printere s 24bit-nim sposobnostima printanja u boji. Tipično će 2D stolni printer u boji imati printersku glavu s tri kolor kanala, CMY, i drugi za crnu boju, K. Pomoću ovih četiriju tinte, printer kombinira nekoliko točaka u svakom printanom pikselu kroz upotrebu naređenih uzoraka zamučivanja da se stvori dojam mnoštva boja.

Isti princip primjenjuje se na 3D printanje. ZCorporation 3D printeri koriste četiri vrste veziva u boji: cijan, magenta, žuta i prozirna. ZPrint softver prenosi informaciju o boji prema printeru unutar komada datoteke. Upotreba „serijskih“ tiskovnih glava omogućava jeftinu, brzu zamjenu glavne potrošne komponente sistema.

Iako boja može biti bitan komunikacijski alat, mnogi 3D programski paketi ne pružaju jednostavan način proizvodnje 3D datoteka koje uključuju podatke o boji. ZEdit je softver

koji se temelji na Microsoft Windows-ima, te olakšava dodavanje podataka o boji podacima o 3D dijelovima. ZEdit je alat za bojanje dijelova, obilježavanje, stavljanje etiketa, i ucrtavanje tekstura. Korisnici ga također koriste da postave .jpeg ili .tif podatke na 3D objekte.

### **3.3. Svojstva ZPrinter-a 450**

- Dimenzije: 122 x 79 x 140 cm
- Težina uređaja: 193 kg
- Boja: 180 000 jedinstvenih boja
- Rezolucija: 300 x 450 dpi
- Minimalni gradivni element: 0,15mm
- Stupanj automatizacije: napredni, automatsko podešavanje i samoupravljanje, automatizirano ubacivanje, uklanjanje i recikliranje praha, brza zamjena spremnika s vezivom
- Vertikalna brzina izrade: 23 mm/h
- Radni volumen: 203 x 254 x 203 mm
- Debljina sloja: 0,089 – 0,102 mm
- Glave za ispis: 2 (604 nozzle-a)

#### 4. MATERIJAL ( $ZnAl_4Cu_3$ )<sup>[3]</sup>

Za ispitivanje livljivosti u 3D printanim kalupima, koristi se materijal pod trgovačkim imenom Zamak 2 odnosno legura cinka  $ZnAl_4Cu_3$  (Slika 8).



Slika 8. Materijal Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ )

Zamak je akronim od njemačkog naziva za metal od kojih su sastavljene legure cinka, aluminija, magnezija i bakra. Povećani udio bakra povećava čvrstoću legure (Tablica 1), ali i cijenu.

Tablica 1. Legirajući elementi u materijalu Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ )

Kemijski sastav, %	Al	Cu	Mg	Pb	Cd	Sn	Fe	Ni	Si	Zn
MIN	3,8	2,7	0,035	-	-	-	-	-	-	Ostalo
MAX	4,2	3,3	0,06	0,003	0,003	0,001	0,020	0,001	0,02	Ostalo

Legura  $ZnAl_4Cu_3$  ubacuje se u ljevačku peć gdje se tali na  $430^{\circ}C$  (Slika 9).



**Slika 9. Taljenje legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ )**

Prilikom taljenja materijala oslobđaju se oksidi iz istoga koji se nakupljaju na površini taljevine te se moraju odstraniti sa površine (Slika 10).



**Slika 10. Odstranjivanje oslobođenih oksida sa površine taline**



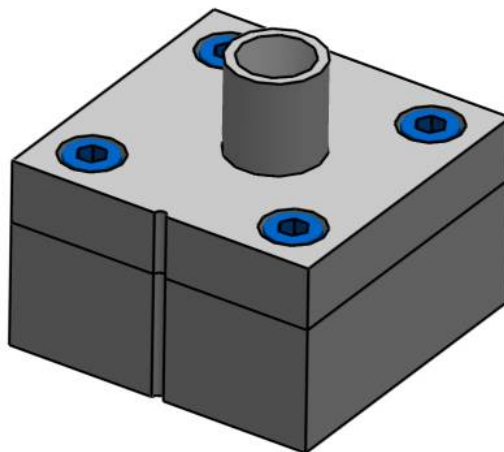
New Jersey Cink tvrtka razvila je Zamak legure 1929. te se nazivaju još i „pot metali“ ili bijeli metal. Koristi se najčešće za lijevanje u pješčane kalupe i kod centrifugalnog lijevanja. Može se galvanizirati, bojati i kromirati. Sastav materijala je takav da tijekom vremena zadržava svoju snagu i čvrstoću bolje od ostalih legura no ona postaje lomljiva, skupa i manje elastična (Tablica 2).

**Tablica 2. Svojstva materijala Zamak 2 (ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>)**

Svojstva	Vrijednosti
Mehanička svojstva	
Vlačna čvrstoća	397 MPa
Granica elastičnosti (0,2% odmak)	361 MPa
Udarna čvrstoća	38 J
Produljenje pri F <sub>max</sub>	3 %
Produljenje nakon loma	6 %
Posmična čvrstoća	317 MPa
Tlačna granica elastičnosti	641 MPa
Dinamička izdržljivost	59 MPa
Tvrdoća	130 po Brinell-u
Modul elastičnosti	96 GPa
Fizička svojstva	
Raspon skrućenja (raspon tališta)	379-390 °C
Gustoća	6,8 kg/dm <sup>3</sup>
Koeficijent toplinskog širenja	27,8 μm/m°C
Toplinska vodljivost	105 W/m-K
Električna otpornost	6,85 μΩ-cm na 20°C
Latentna temperatura	110 J/g
Specifični toplinski kapacitet	419 J/kg°C
Koeficijent trenja	0,08

## 5. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 1

Eksperiment prikazuje konstruiranje prototipa kalupa za ispitivanje livljivosti materijala Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u 3D printanom kalupu pomoću ZPrinter-a 450. Konstrukcija i dizajn se modelira u programskom paketu Catia V5 u dimenzijama 50x50x45mm. Kalup se sastoji od dva dijela, pričvršćen sa vijcima M5x25 i maticama M5 (Slika 11).

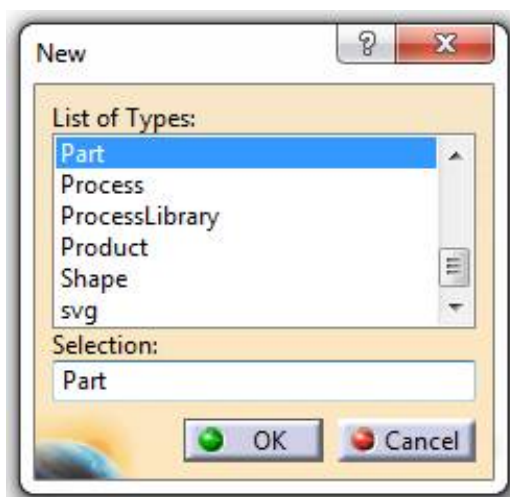


Slika 11. Kalup 1

### 5.1. Konstrukcija i dizajn kalupa 1

#### 5.1.1. Dizajn donjeg dijela kalupa 1

Početak konstruiranja donjeg dijela kalupa počinje u izborniku Catia-e V5 odabirom opcije „New Part“, odnosno izrada nove pozicije (Slika 12).

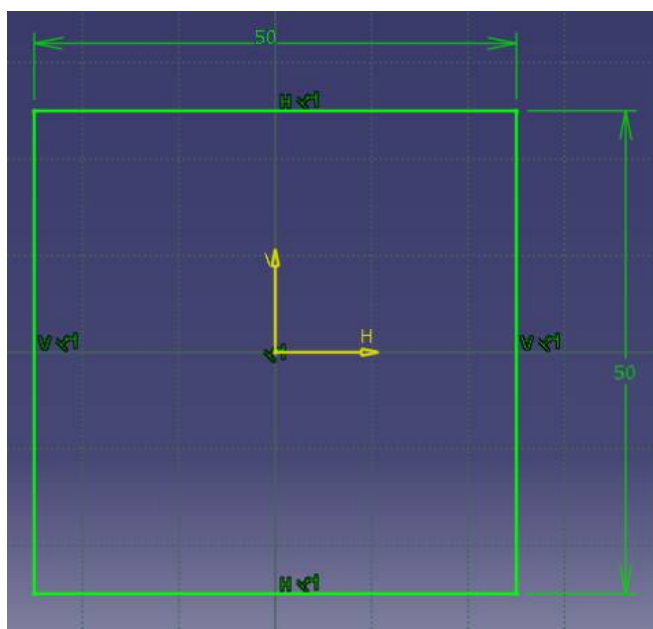


Slika 12. Odabir izrade novog „Part-a“ u Catia-i V5

Otvaranjem prozora za izradu nove pozicije, nalazi se opcija „Sketch“ (Slika 13) u kojoj se konstruira kvadrat 50x50 (Slika 14).



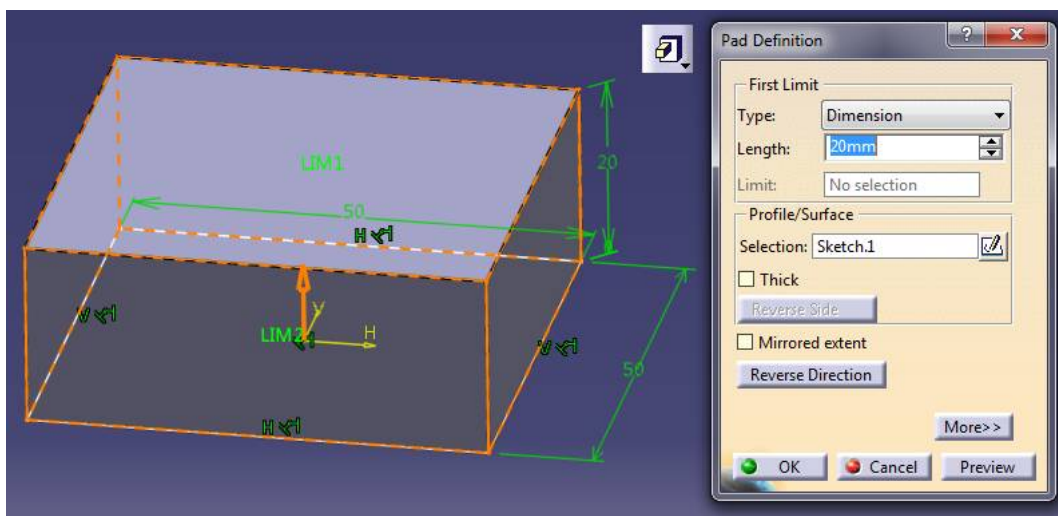
Slika 13. Opcija „Sketch“ za početak skiciranja



Slika 14. Konstruiranje kvadrata 50x50mm

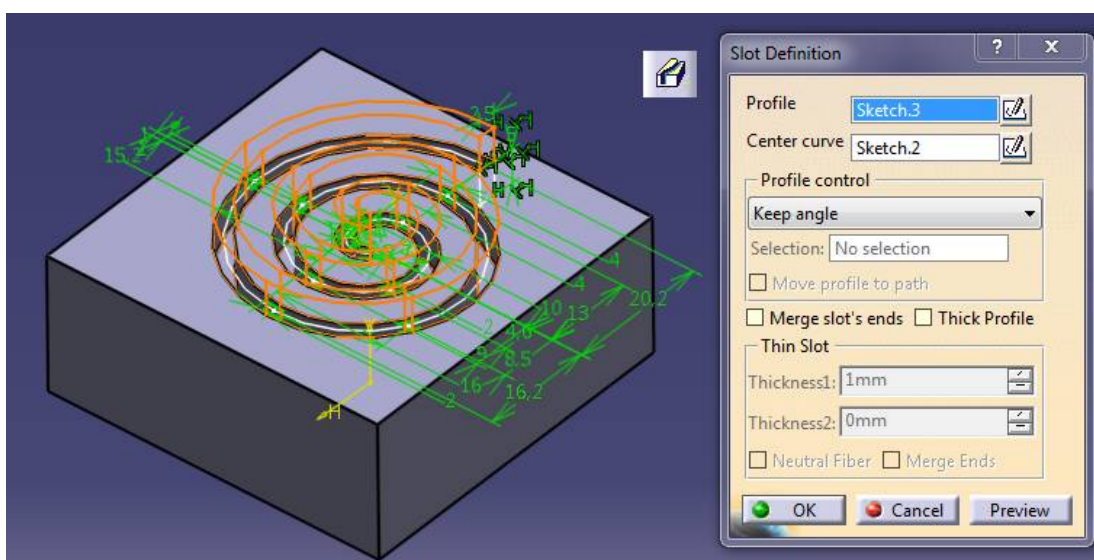
Isti kvadrat se „Extrudira“ odnosno podiže na visinu od 20 mm i time stvara volumen prizme opcijom „Pad“ (Slika 15).





Slika 15. Opcija „Pad“ za izradu prizme

U konstruiranoj prizmi mora se „izrezati“ oblik Arhimedove spirale i to na način da se u zasebnom „Sketchu“ nacrtava Arhimedova spirala, a zasebno kanal čiji će presjek spirala sadržavati te nakon toga se koristi opcija „Slot“ kojom se obilježavaju oba „Sketch-a“ i dobiva se izrezani oblik Arhimedove spirale u prethodno konstruiranoj prizmi (Slika 16).



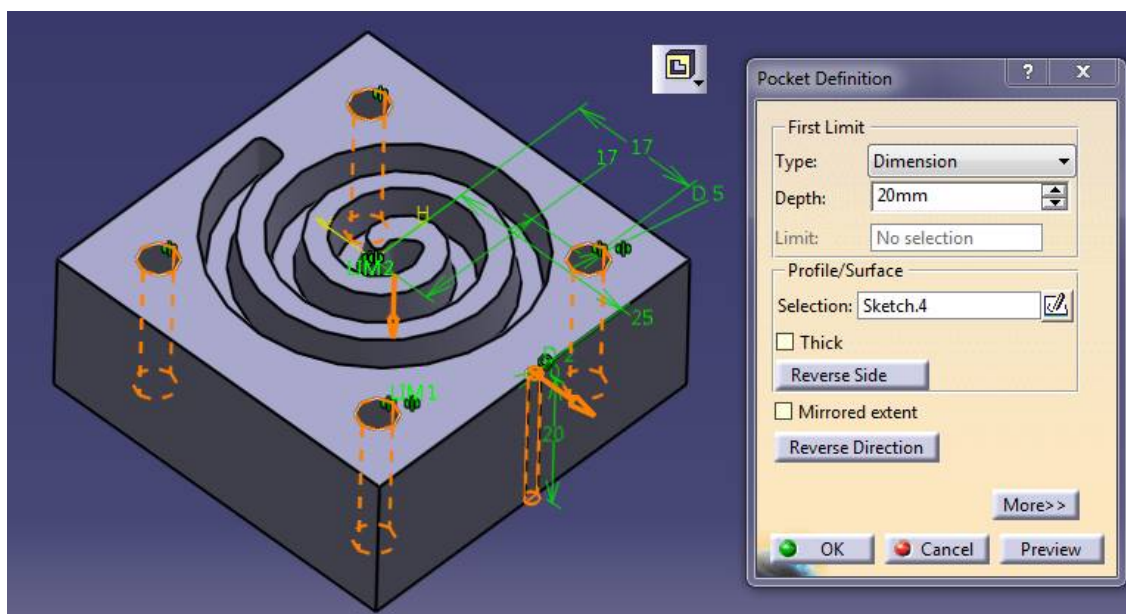
Slika 16. Opcija „Slot“ za izradu Arhimedove spirale

Nadalje se koristi opcija „Draft“ kako bi se izradilo skošenje bočnih bridova kanala od  $10^\circ$ , radi lakšeg vađenja odljevka iz kalupa nakon lijevanja u isti (Slika 17).

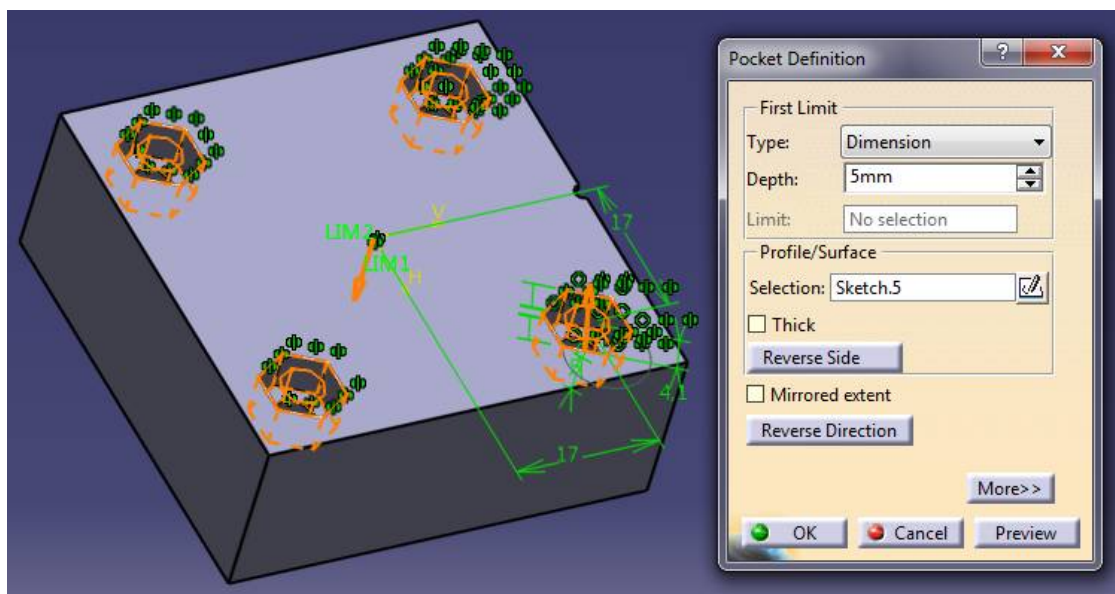


Slika 17. Opcija „Draft“ za izradu konusa

Preostalo je još izraditi provrte za vijke i bočni utor na donjem dijelu kalupa radi kasnije lakše orijentacije prilikom učvršćivanja sa gornjim dijelom kalupa. Provrti i utor izrađuju se pomoću opcije „Pocket“ u kojoj se izrezuje prethodno nacrtani oblik iz „Sketcha“ u prizmi (Slika 18). Sa istom opcijom se izrezuje šesterokutni oblik za matice M5 na dubini od 5 mm, na donjem dijelu kalupa (Slika 19).



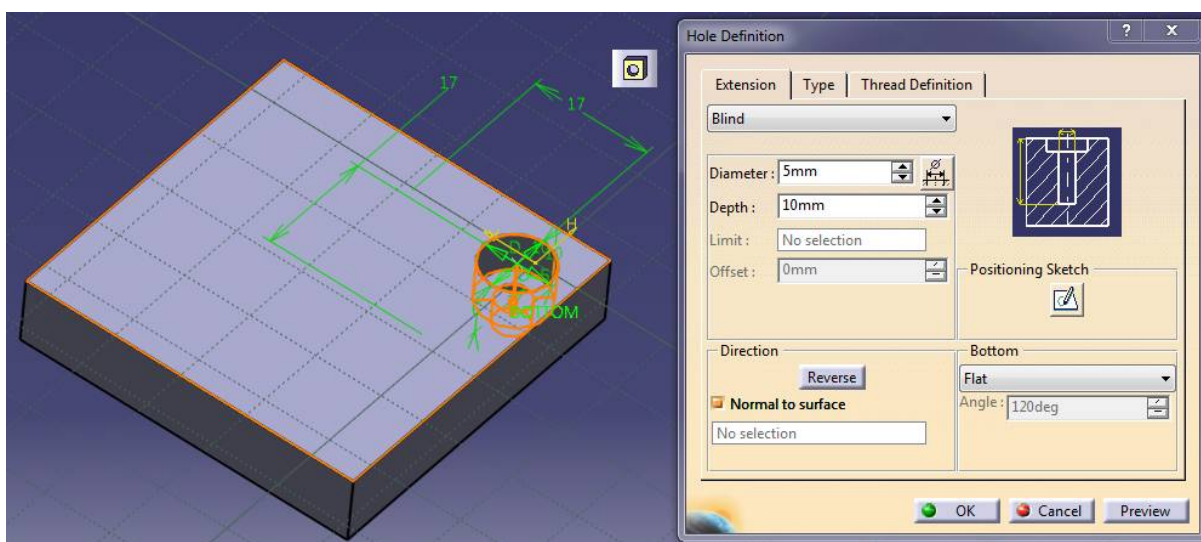
Slika 18. Opcija „Pocket“ za izradu provrta i bočnog utora na kalupu



Slika 19. Opcija „Pocket“ za izradu utora za matice M5

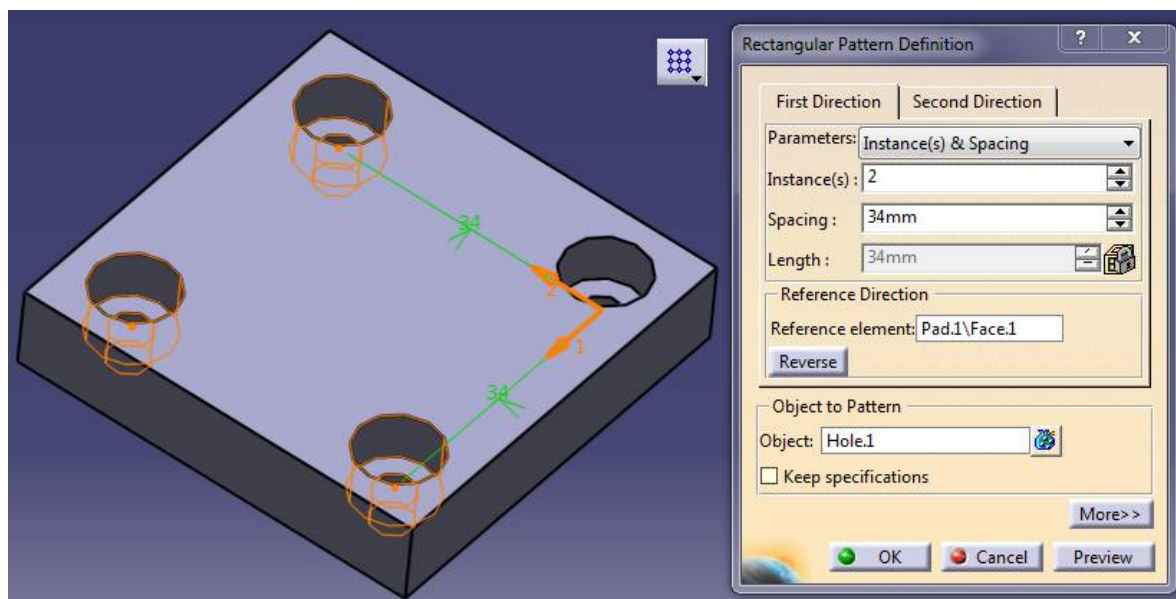
### 5.1.2. Dizajn gornjeg dijela kalupa 1

Ponovo se otvara novi prozor za izradu nove pozicije gdje se opcijom „Sketch“ nacrtava kvadrat 50x50mm koji se podiže u vis za 10 mm opcijom „Pad“. Nadalje se koristi opcija „Hole“ za izradu utora za glavu vijka (Slika 20).



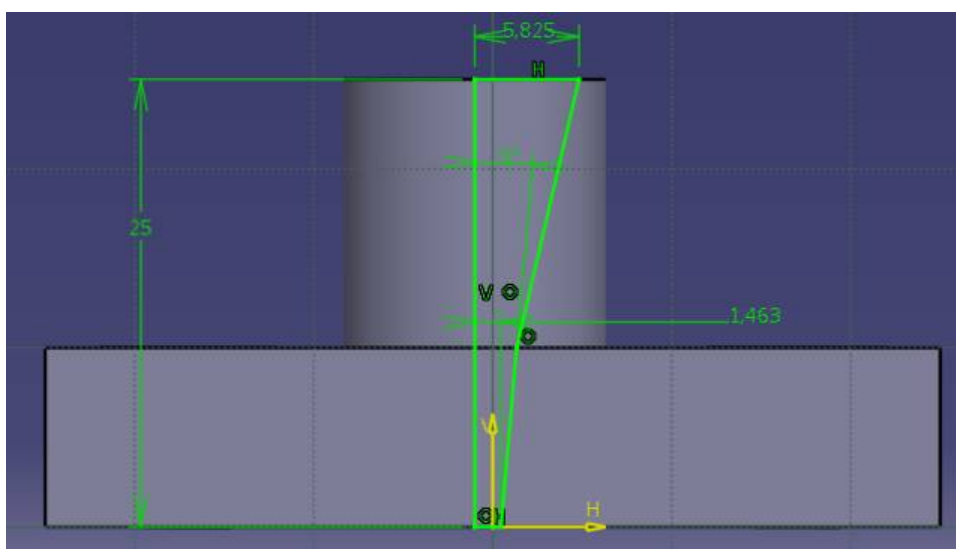
Slika 20. Opcija „Hole“ za izradu utora za glavu vijka

Pošto je potrebno izraditi četiri ista utora, koristi se opcija „Rectangular Pattern“ kojom se raspoređuju preostala tri utora po prizmi u odnosu na prvi utora (Slika 21).



Slika 21. Opcija „Rectangular Pattern“ za izradu preostalih utora

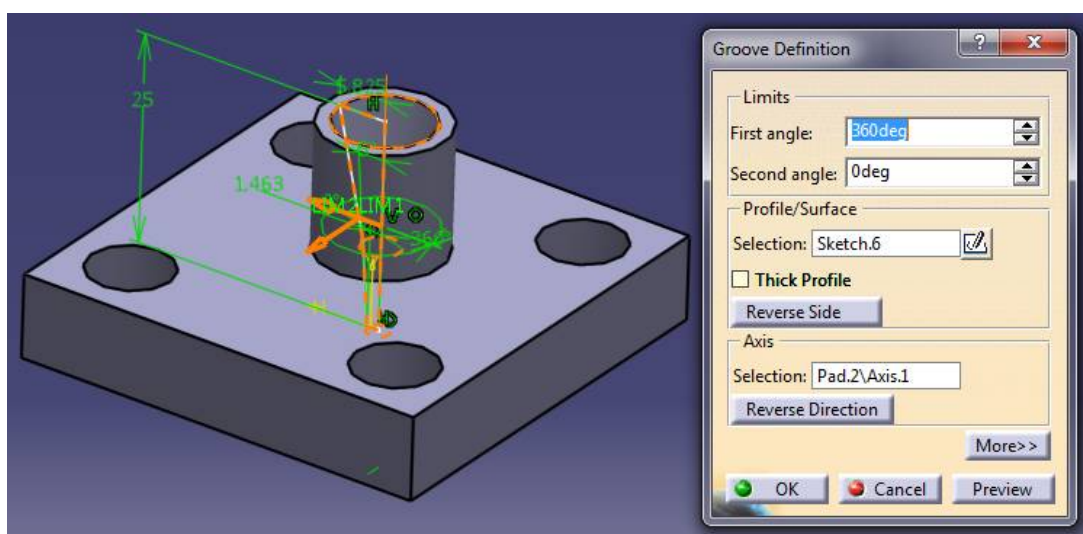
Nadalje se konstruira uljevni sustav na gornjem dijelu kalupa 1 na način da se konstruira valjak na gornjoj površini, promjera 15 mm i visine 15 mm. Nakon dobivenog valjka konstruira se presjek uljavnog sustava pomoću opcije „Sketch“. Donji presjek promjera se prilagođava otvoru na donjem dijelu kalupa kako bi litina što bolje ulazila i popunjavala kalup te samim time ostvaruje se preciznija livljivost (Slika 22).



Slika 22. Konstruiranje uljavnog sustava

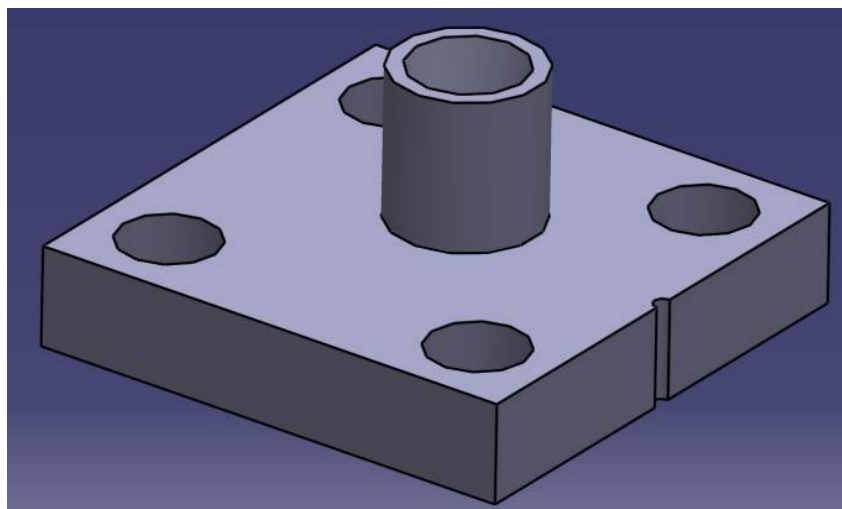
Preostaje još izrezivanje utora za uljevni sustav koji se realizira opcijom „Groove“ gdje se prikazana polovica uljavnog sustava zaokreće oko vertikalne osi za 360° (Slika 23).





Slika 23. Opcija „Groove“ za izradu uljavnog sustava

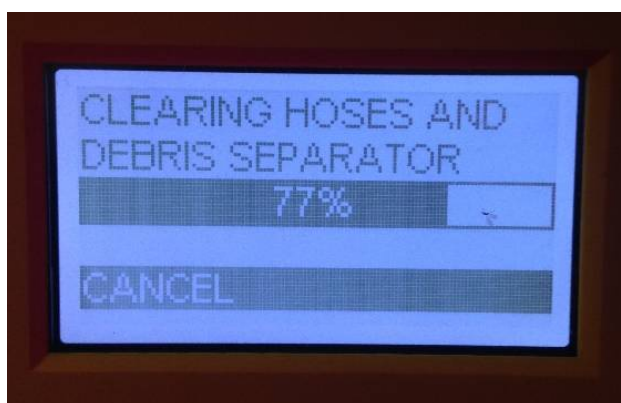
Utor za orijentaciju sklapanja kalupa na bočnom bridu kalupa izrađuje se kao i kod gornjeg dijela kalupa pomoću opcije „Sketch“ i „Pocket“ te se dobiva konačni izgled gornjeg dijela kalupa (Slika 24).



Slika 24. Gornji dio kalupa 1

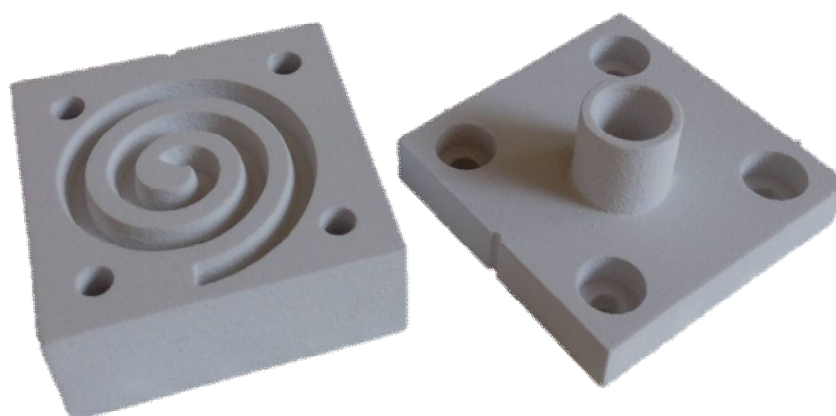
## 5.2. Izrada kalupa 1

Nakon konstruiranja gornjeg i donjeg dijela kalupa 1, zasebno se spremaju u .stl format kako bi program od strane Zprinter-a 450 mogao funkcionalno pokrenuti izradu istih. U programu se podešavaju parametri printanja kao što su boja isprintanih pozicija, koja je u ovom slučaju bijela, te pozicioniranje na platformi na kojoj se printa. Kalup 1 printa se u 257 slojeva praškastog materijala. Nakon svih podešavanja započinje printanje odnosno printer prvo započinje svoje pripreme čišćenja i punjenja platforme [Slika 25].



Slika 25. Priprema printera za izradu kalupa 1

Nakon 47 minuta printanja i 60 minuta hlađenja gdje isprintane pozicije moraju ostati na printanoj platformi, započinje proces usisavanja viška prašine koji odlazi u komoru za praškasti materijal, te ispuhivanje isprintanih pozicija kako bi proces izrade bio izvršen do kraja gotovih dijelova kalupa (Slika 26).



Slika 26. Isprintani gornji i donji dio kalupa 1

### 5.3. Lijevanje litine u kalup 1

Proces lijevanja počinje pripremom kalupa koji se mora zagrijati na određenu temperaturu kako bi osušili kalup i riješili se vlage u istome tako da litina što ravnomjernije popuni kalup i samim time ispuni test livljivosti. Kalup 1 se zagrijava na peći za taljenje na temperaturu od 76°C (Slika 27).



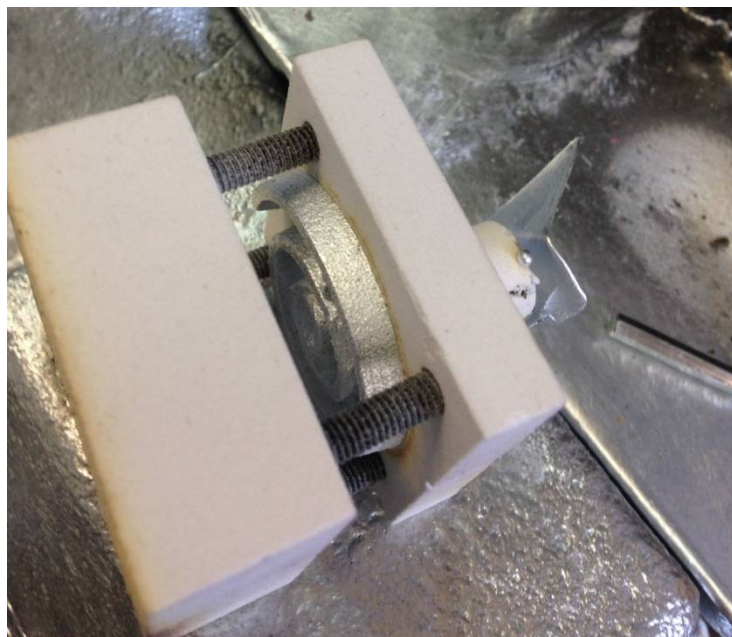
Slika 27. Zagrijavanje kalupa na ljevačkoj peći

Nakon pripreme kalupa započinje proces lijevanja (Slika 28). Prilikom lijevanja prethodno opisane legure  $ZnAl_4Cu_3$  u Kalup 1, može se primjetiti da se kalup nije dovoljno zagrijavao, te da temperatura istoga od 76°C nije bila dovoljno visoka prilikom ulijevanja litine od 430°C u isti jer se oslobađa dio pare iz kalupa koji podiže dio litine iz odljevnog sustava te izlazi van u prostor, što uočavamo već prilikom otvaranja kalupa.



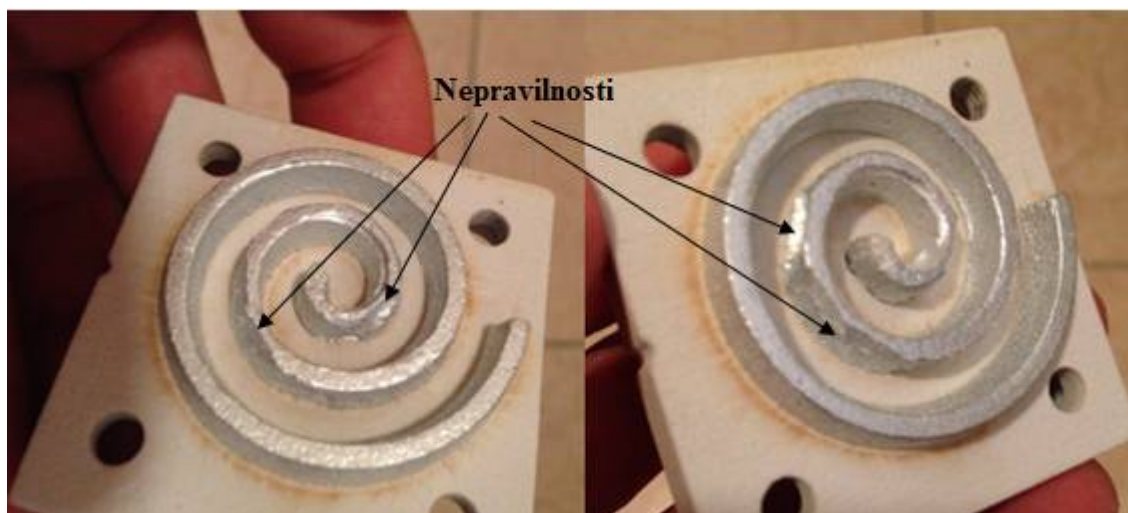
Slika 28. Ulivanje litine Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u kalup 1

Slika 29. prikazuje kalup nakon lijevanja litine i njegovog hlađenja. Kalup se vrlo polako i ravnomjerno otvara pomoću 4 vijka.



**Slika 29. Otvaranje Kalupa 1 nakon skrućivanja litine**

Usljed oslobađanja para stvaraju se usahline na odljevku, te se uočava i bježanje pare po bočnim bridovima na zatamnjnim djelovima na gornjem dijelu kalupa (Slika 30).



**Slika 30. Nepravilnosti na odljevku nastale zbog oslobođenih para iz kalupa 1**

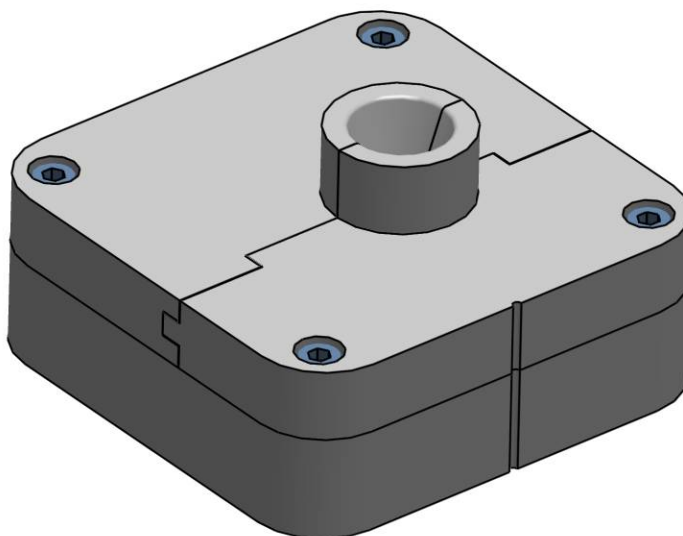


### 5.4. Rezultati lijevanja litine u kalup 1

Kalup 1 nije bio dovoljno zagrijan netom prije ulijevanja litine što je rezultiralo nepravilnostima na odljevku. Uljevni sustav bio je premalen a time i sadržavao mali dio litine koja bi se mogla oduprijeti oslobođenoj pari da izađe van. Kalup 1 trebao je sadržavati kanal na kraju Arhimedove spirale kako bi vruća para mogla kroz isti izlaziti van i time ne oštetiti popunjavanje kalupa. Kalup 1 trebao je biti konstruiran iz tri dijela da se gornji dio kalupa ne razbija prilikom vađenja odljevka te samim time se može ponoviti više ciklusa lijevanja te većih mjera zbog lakšeg lijevanja i ispitivanja. Test livljivosti je zadovoljavajuć jer je litina uspjela popuniti cijelu Arhimedovu spiralu unatoč vrućim parama.

## 6. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 2

Eksperiment 2 prikazuje konstruiranje kalupa 2 za ispitivanje livljivosti materijala Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u 3D printanom kalupu pomoću ZPrinter-a 450. Konstruira se novi kalup većih dimenzija i sa većim uljevnim dijelom zbog lakšeg lijevanja i popunjavanja kalupa. Konstrukcija i dizajn se modelira u programskom paketu Catia V5 u gabaritnim dimenzijama 100x100x52mm. Kalup se sastoji od tri dijela, jednog donjeg i dva gornja zbog mogućnosti ponavljanja ciklusa lijevanja, pričvršćen sa vijcima M5x30 i maticama M5 [Slika 31].

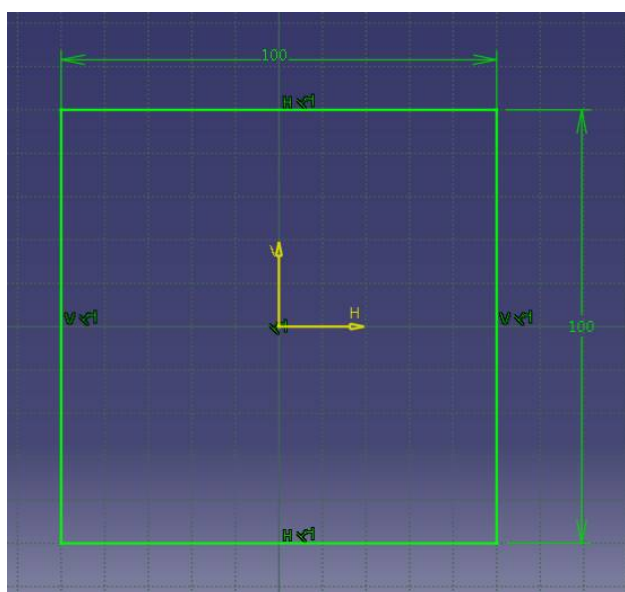


Slika 31. Kalup 2

## 6.1. Konstrukcija i dizajn kalupa 2

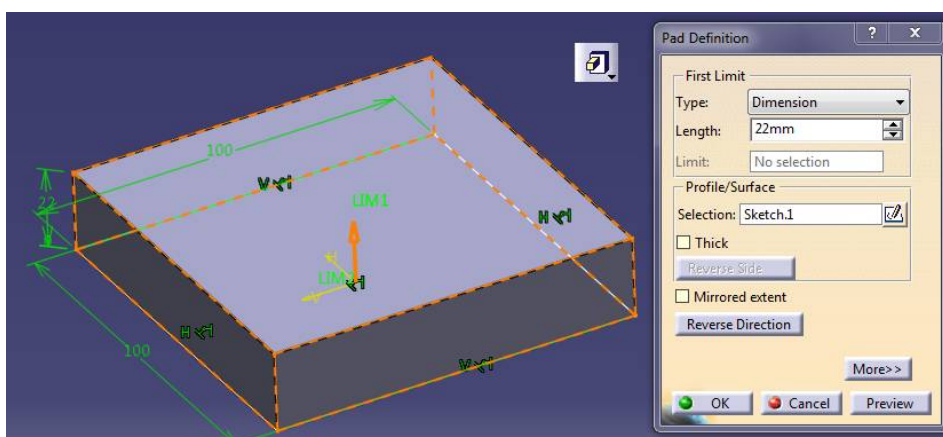
### 6.1.1. Dizajn donjeg dijela kalupa 2

Konstrukcija kalupa 2 počinje isto kao i u eksperimentu 1, kalupa 1, odabirom opcije izrade novog „Part-a“, pronalazi se opcija „Sketch“, pomoću koje se konstruira kvadrat dimenzija 100x100mm (Slika 32).



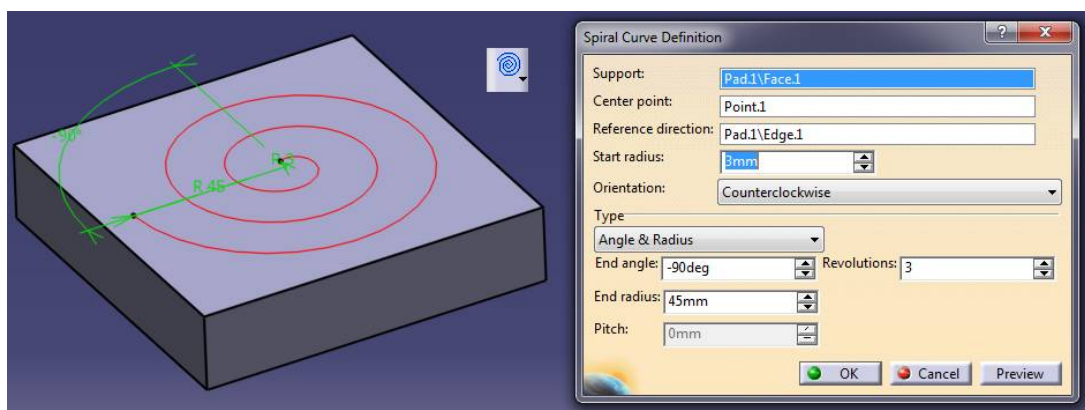
Slika 32. Konstruiranje kvadrata 100x100mm

Isti kvadrat se „Extrudira“ odnosno podiže na visinu od 20 mm i stvara se volumen prizme opcijom „Pad“ (Slika 33).



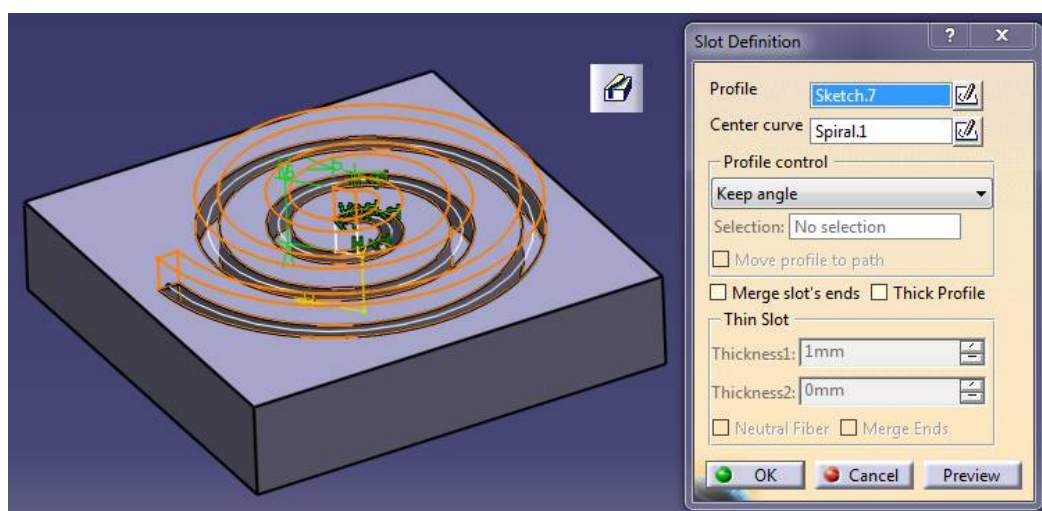
Slika 33. Opcija „Pad“ za izradu prizme

U konstruiranoj prizmi mora se „izrezati“ oblik Arhimedove spirale i to na način da se koristi opciju „Spiral“ za konstruiranje spirala sa početnim radijusom od 3 mm i krajnjim radijusom od 45 mm (Slika 34).



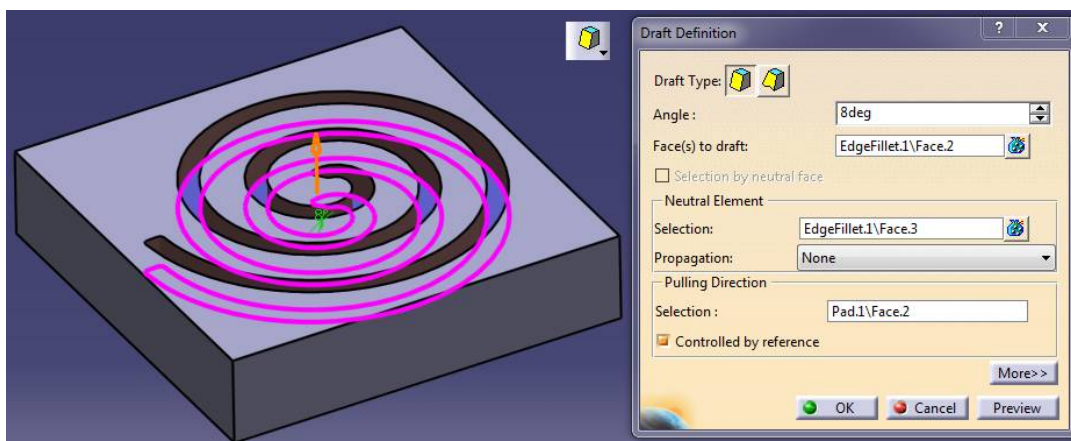
Slika 34. Opcija „Spiral“ za izradu Arhimedove spirale

Nakon toga se koristi opcija „Slot“ gdje se obilježava izrađena spirala te prethodno konstruiran presjek dobivamo izrezani oblik Arhimedove spirale u prethodno konstruiranoj prizmi (Slika 35).



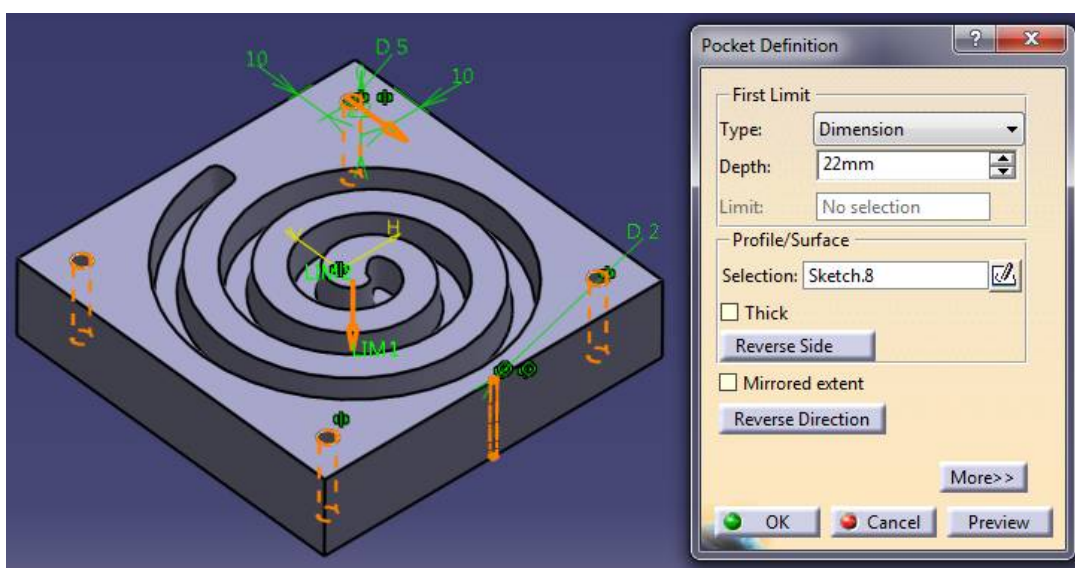
Slika 35. Opcija „Slot“ za izrezivanje Arhimedove spirale iz prizme

Nadalje se koristi opcija „Draft“ kako bi se izradilo skošenje bočnih bridova kanala od  $8^\circ$ , radi lakšeg vađenja odljevka iz kalupa nakon lijevanja u isti (Slika 36).



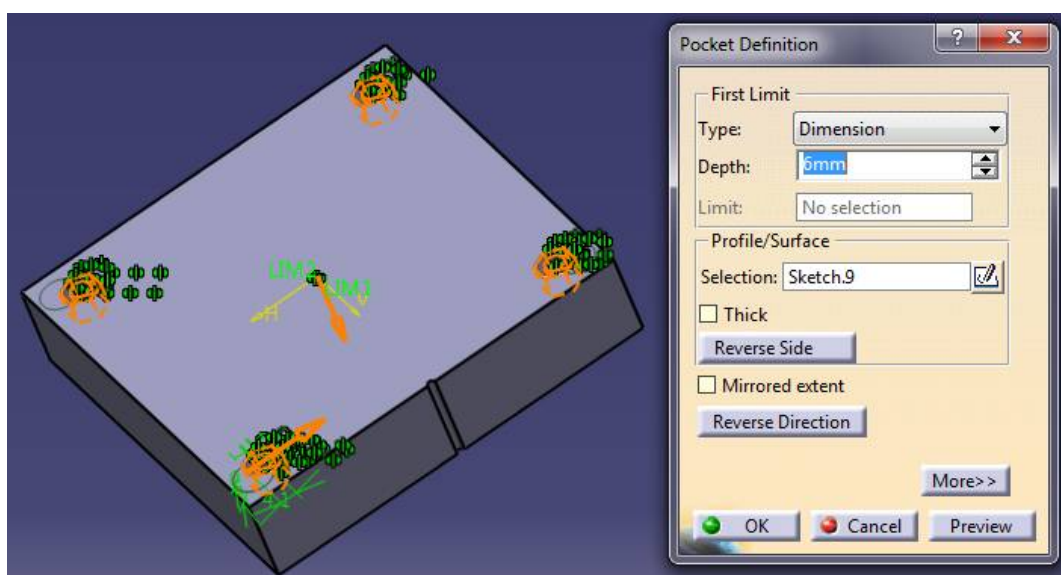
Slika 36. Opcija „Draft“ za izradu konusa

Izrađuju se provrti za vijke i bočni utor na donjem dijelu kalupa radi kasnije lakše orijentacije prilikom učvršćivanja sa gornjim dijelovima kalupa. Provrti i utor izrađuju se pomoću opcije „Pocket“ u kojoj se izrezuju prethodno nacrtani oblik iz „Sketcha“ u prizmi (Slika 37).



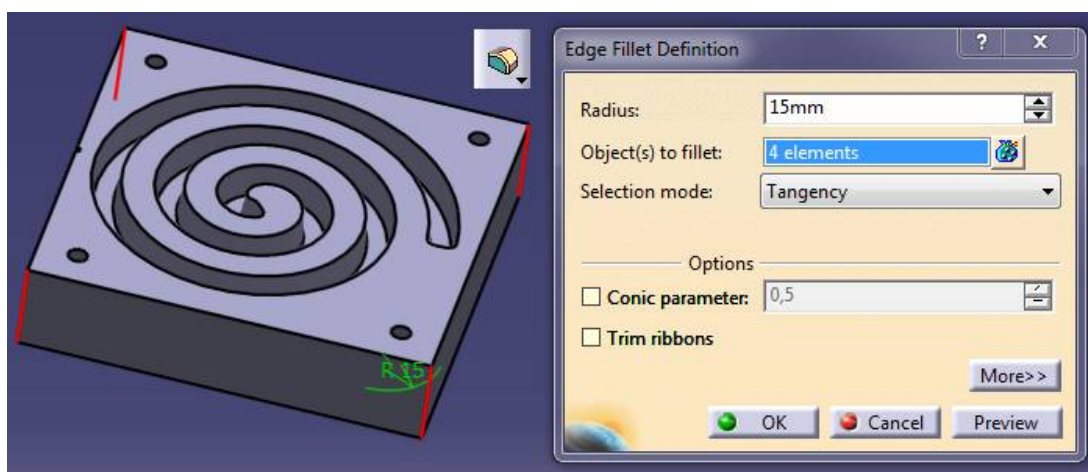
Slika 37. Opcija „Pocket“ za izradu provrta i bočnog utora na kalupu 2

Sa istom opcijom izrezuje se šesterokutni oblik za matice M5 na dubini od 5 mm, na donjem dijelu kalupa (Slika 38).



Slika 38. Opcija „Pocket“ za izradu utora za matice M5

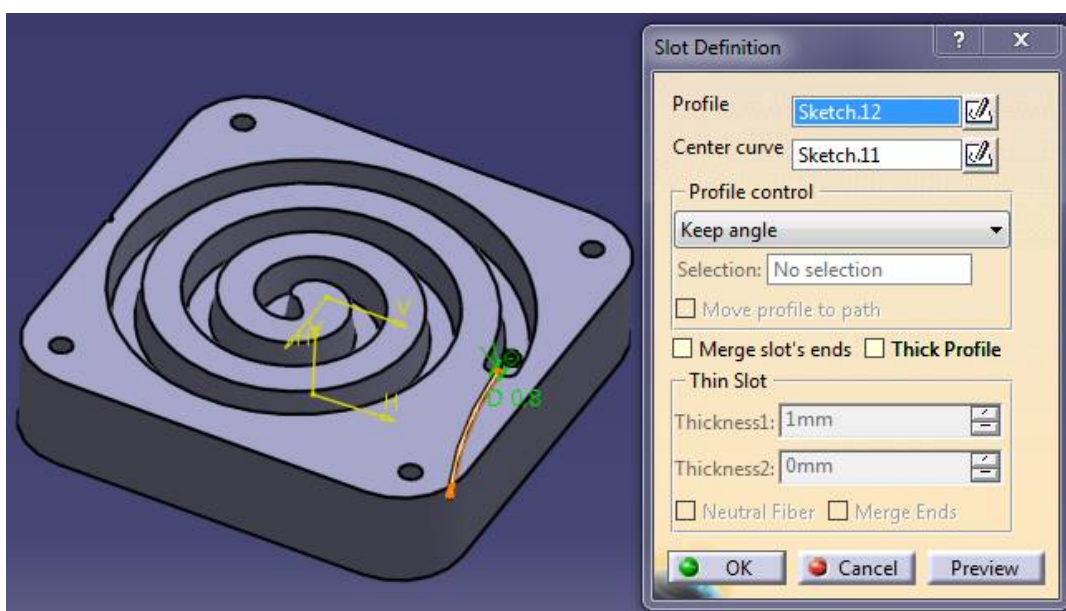
Radi uštede praha tijekom 3D printanja, konstruiraju se radijusi od 15 mm na bridovima kalupa 2 (Slika 39).



Slika 39. Izrada radijusa na bridovima donjeg dijela kalupa 2

Prema saznanjima iz eksperimenta 1 izrađuje se kanal promjera 0,8 mm na način da se izreže oblik kruga konstruiran opcijom „Sktech“ pomoću opcije „Slot“ (Slika 40).

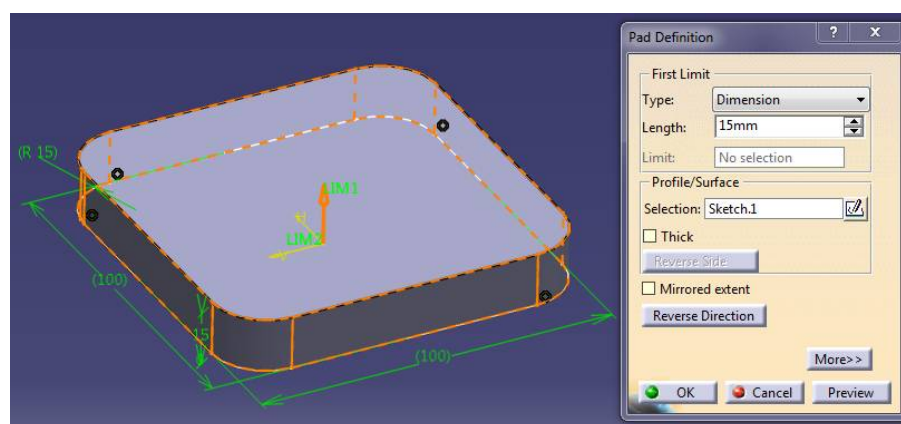




Slika 40. Izrada kanala za izlaz oslobođene pare tijekom procesa lijevanja

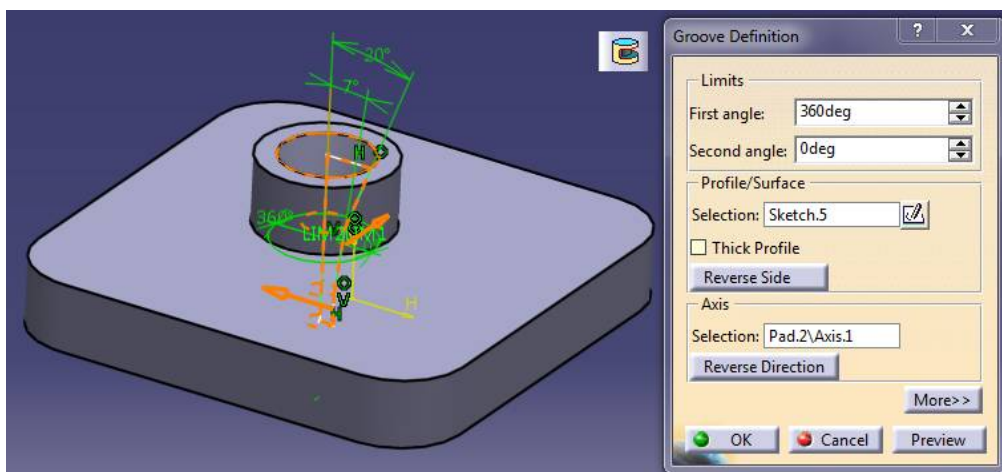
### 6.1.2. Dizajn gornjeg desnog dijela kalupa 2

Ponovo se otvara novi prozor za izradu nove pozicije gdje se opcijom „Sketch“ nacрта kvadrat 100x100 mm koji se podiže u vis za 15 mm opcijom „Pad“ sa već unaprijed konstruiranim radijusima od 15 mm (Slika 41).



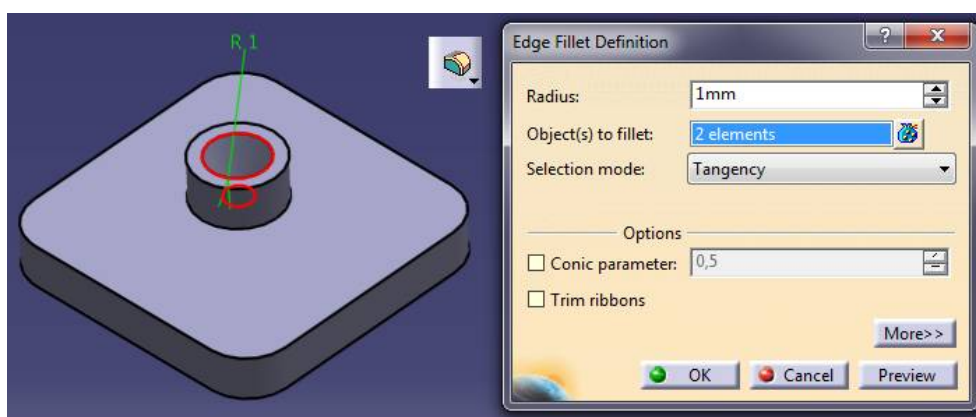
Slika 41. Opcija „Pad“ za prizme gornjeg desnog dijela kalupa 2

Prema uočenoj u eksperimentu 1 konstrira se veći uljevni sustav sa vanjskim promjerom 30 mm i visine 15 mm te se isti izrezuje opcijom „Groove“ sa ukupnim donjim kutem od  $14^\circ$  od baze prizme do visine 15 mm te ukupnim kutom od  $40^\circ$  na području konstruiranog valjka visine 15 mm (Slika 42).



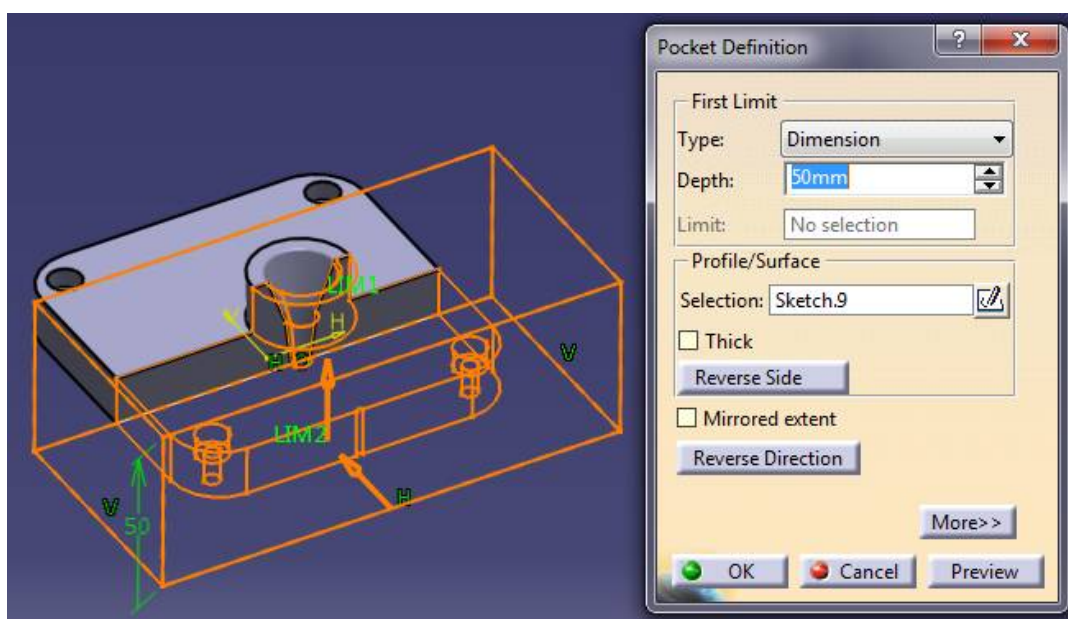
Slika 42. Konstruiranje uljavnog sustava opcijom „Groove“

Radi još lakšeg klizanja litine kroz uljevni sustav a time i popunjavanje donjeg dijela kalupa 2, izrađuju se radijusi na prijelaznim dijelovima samog sustava od 1 mm pomoću opcije „Edge fillet“ (Slika 43).



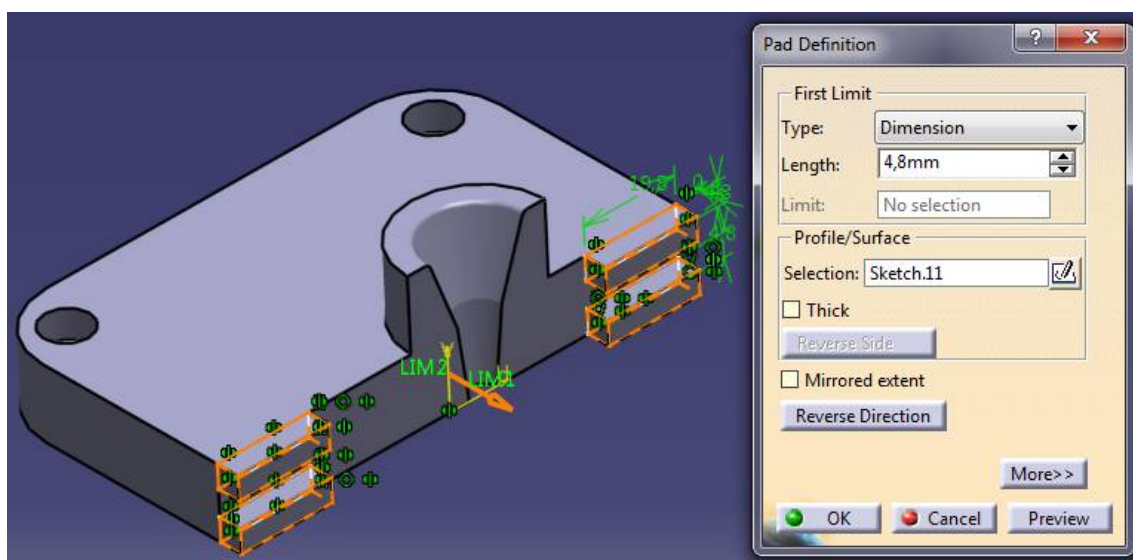
Slika 43. Izrada radijusa pomoću opcije „Edge fillet“

Nadalje se izrađuju utori za vijke kojima se kasnije učvršćuje kalup, te bočni utor radi lakše orijentacije pravilnog postavljanja dijelova kalupa opcijama kao i u eksperimentu 1. Pošto se gornji dio kalupa izrađuje iz dva dijela, ovaj dizajnirani, treba prepoloviti i to prema simetrali uljavnog sustava. Izrezuje se dio na čijoj se strani nalazi utor za lakšu orijentaciju pomoću opcije „Pocket“. Dubina rezanja određuje se proizvoljno jer nam ne utječe na ostale parametre konstrukcije, u ovom slučaju to je 50 mm (Slika 44).



Slika 44. Rezanje cijelog gornjeg kalupa na desni dio kalupa 2

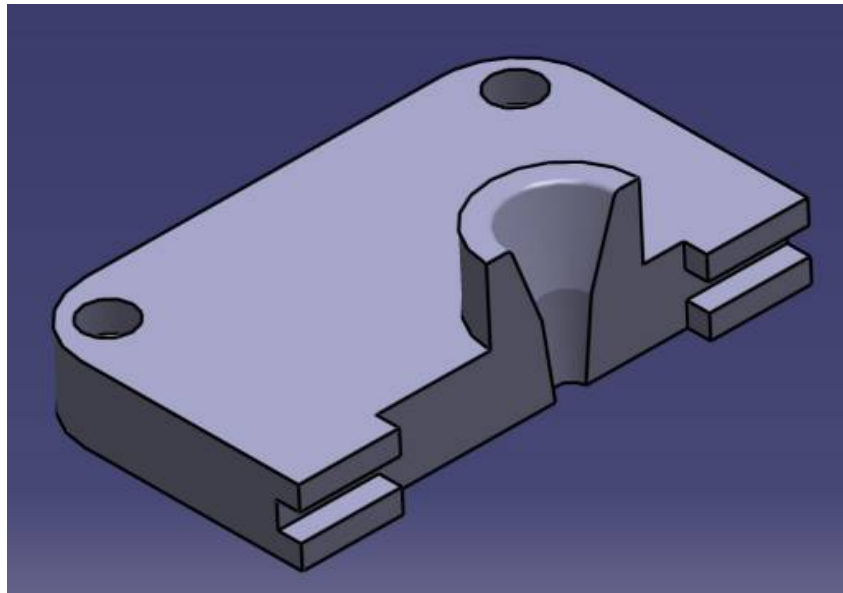
Nakon dobivene gornje desne polovice kalupa 2, izrađuju se kvadrati na krajevima izrezanog brida dimenzija 19,8x4,8 mm koje podižemo opcijom „Pad“ za 4,8 mm (Slika 45), radi lakšeg spajanja sa drugom, lijevom polovicom gornjeg kalupa.



Slika 45. Izrada utora za lakše spajanje na gornjem desnom dijelu kalupa 2

Navadenom operacijom dobiva se završni dizajn gornjeg desnog dijela kalupa 2 (Slika 46).

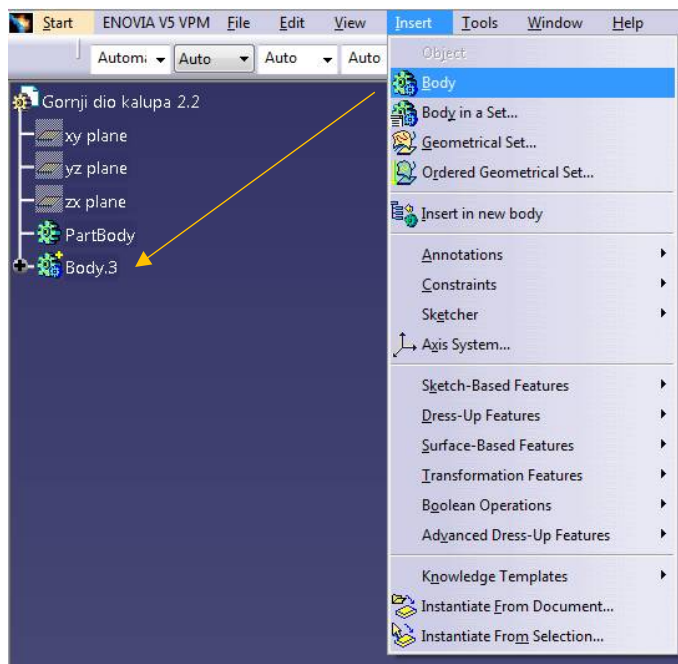




Slika 46. Gornji desni dio kalupa 2

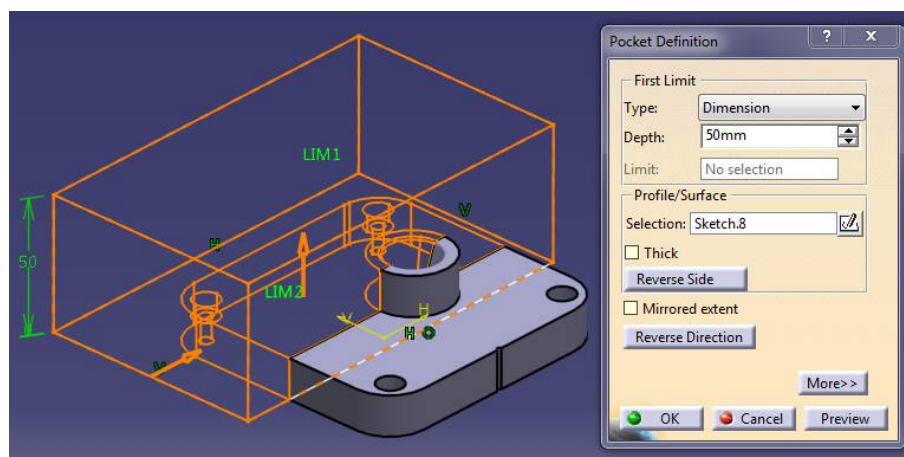
### 6.1.3. Dizajn gornjeg lijevog dijela kalupa 2

Gornji lijevi dio kalupa 2 izrađuje se na način da se desni dio nakon rezanja po simetrali uljevnog sustava (Slika 44) prebaci u novi „Part“ na način da se ubaci cijeli „Body“ nakon posljednje operacije u isti (Slika 47).



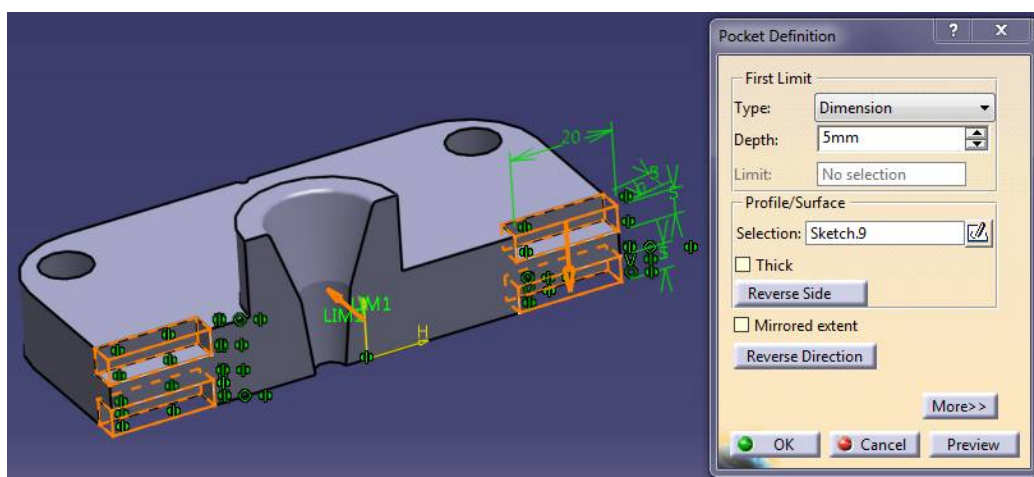
Slika 47. Ubacivanje postojećeg „Body-a“ u novi „Part“

Nadalje, sadržana opcija rezanja gornjeg dijela kalupa 2 u Body-u 3“ iskorištava se na način da se izrezani dio pomiče na drugu postojeću polovicu koja će sada biti izrezana te se dobiva gornji lijevi dio kalupa 2 koji sadrži utor za orijenciju sklapanja kalupa (Slika 48).



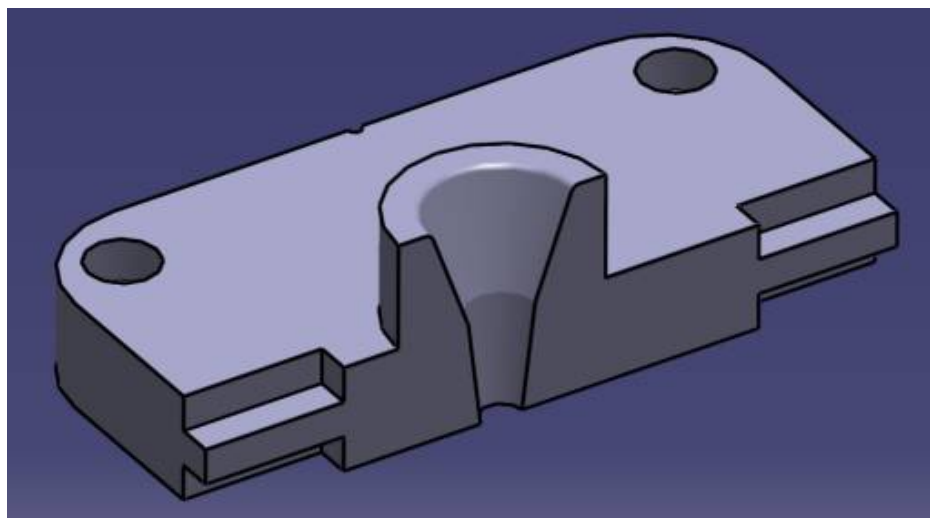
Slika 48. Rezanje druge polovice gornjeg kalupa 2 opcijom „Pocket“

Preostaje još izrada utora radi lakšeg spajanja gornjih dijelova kalupa 2. Izrađuju se prema konstruiranim kvadratima (Slika 45) na gornjem desnom dijelu na način da se sada koristi opcija „Pocket“ gdje se izrezuju 4 kvadrata na podjeljenoj površini gornjeg lijevog dijela kalupa 2 dimenzija 20x5 mm sa vertikalnim razmakom od 5 mm i dubinom rezanja od 5 mm (Slika 49).



Slika 49. Izrada utora za lakše spajanje na gornjem lijevom dijelu kalupa 2

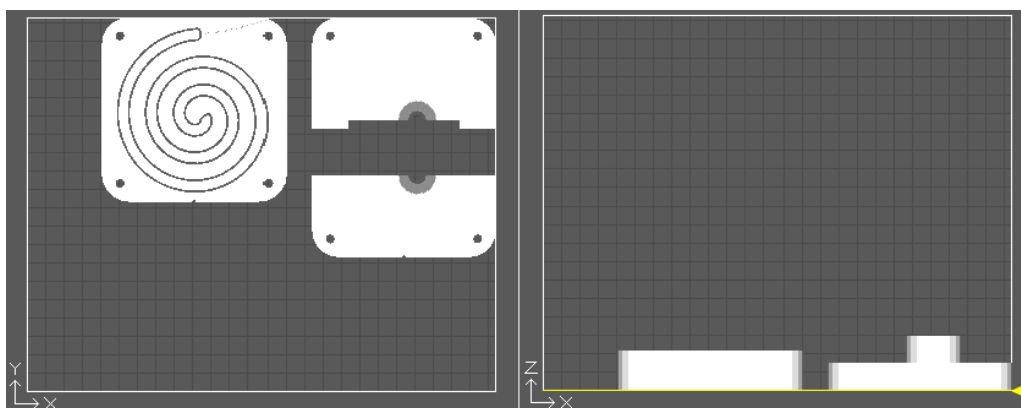
Slika 50 prikazuje gotovi izgled gornjeg lijevog dijela kalupa 2.



Slika 50. Gornji lijevi dio kalupa 2

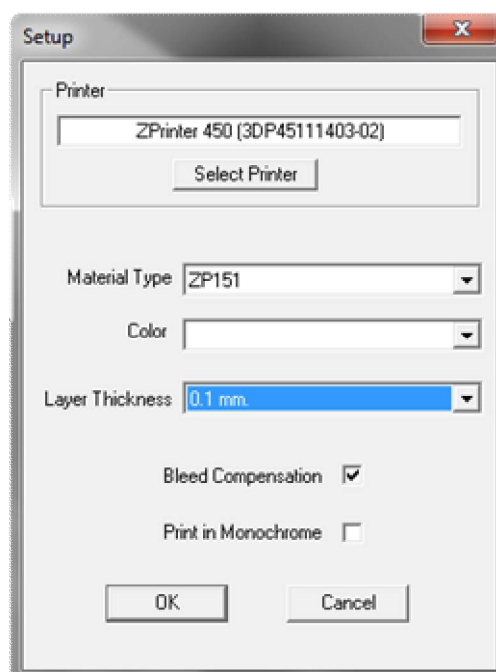
## 6.2. Izrada kalupa 2

Proces izrade kalupa 2 isti je kao i u eksperimentu 1. Nakon konstruiranja svih dijelova kalupa 2, zasebno se svaki sprema u .stl formatu kako bi ih program za prijenos u Zprinter 450 mogao realizirati. Dijelovi kalupa se pozicioniraju prema X, Y i Z osi platforme na kojoj se isti printaju (Slika 51).



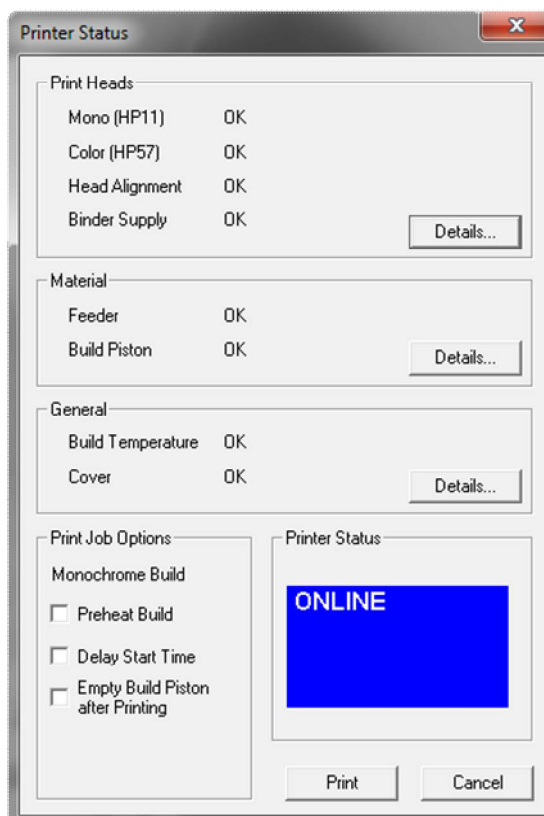
Slika 51. Pozicioniranje dijlova kalupa 2 prije izrade

Nakon pozicioniranja odabire se materijal ZP151, prah kojim printer izrađuje pozicije, kao i boja koja se u ovom slučaju ne odabire jer se printa običnim bijelom prahom. Debljinu sloja pritnjanja odabire se na 0,1 mm (Slika 52). Potrebno je 297 slojeva od 0,1 mm da bi se izradili svi dijelovi kalupa 2.



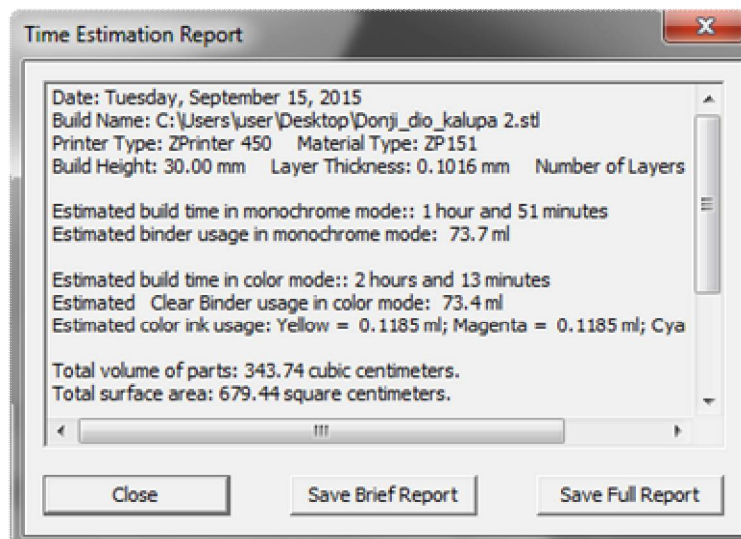
Slika 52. Odabir parametara za printanje

Odabirom svih parametara provjerava se da li je sve spremno za printanje (Slika 53).



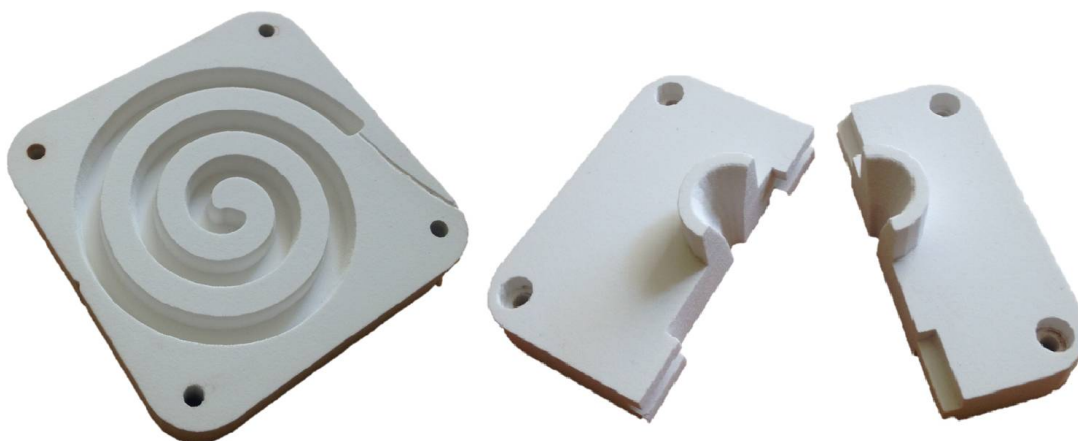
Slika 53. Status printera prije početka izrade

Pritiskom na opciju printanja izbacuje se novi prozor koji definira vrijeme izrade svih dijelova kalupa 2 gdje se uočava vrijeme izrade od 1h i 51 min u crno-bijelom printu kao i količina od 73,7 ml praha (Slika 54). Nakon toga započinje i sama izrada na Zprinter-u 450.



**Slika 54.** Izvještaj vremena printanja i količine utrošenog praha

Izradom svih pozicija od 1h i 51min printanja te 2h i 30min hlađenja istih dobivamo gotove dijelove kalupa 2 (Slika 55).



**Slika 55.** Isprintani dijelovi kalupa 2



### 6.3. Lijevanje litine u kalup 2

#### 6.3.1. Prvo lijevanje

Prethodno izrađeni kalup 2 sklapa se u sklop učvršćivanjem vijcima M5x30 i maticama M5 (Slika 56.),



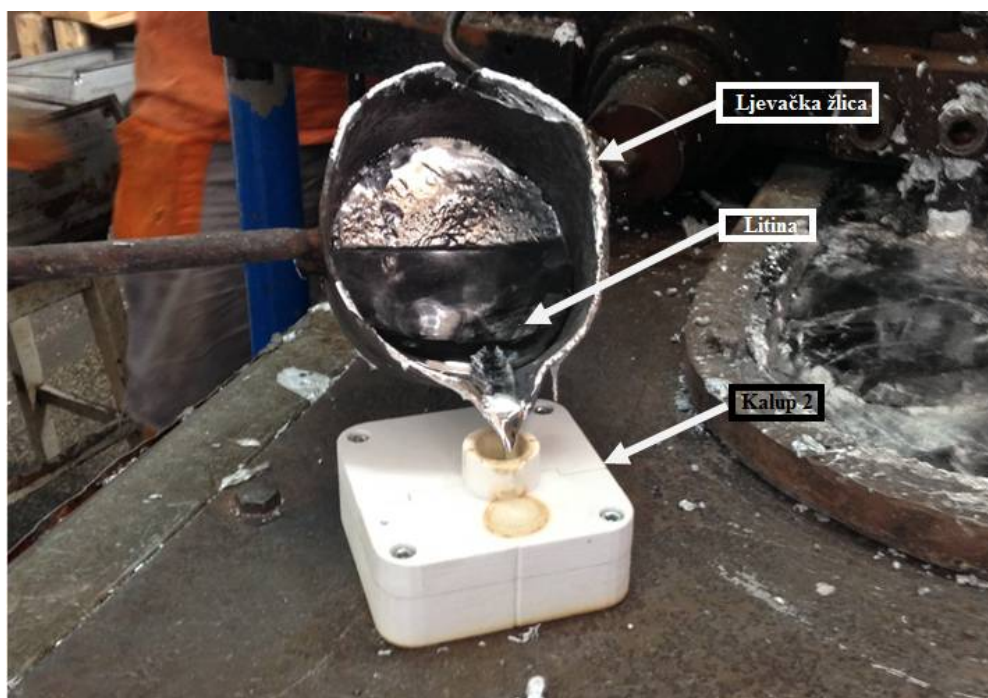
Slika 56. Sklapanje kalupa 2

Nadalje se kalup 2 ostavlja 20min na površini lijevačke peći gdje se zagrijava na 87°C (Slika 57) radi sušenja kalupa, da ne dolazi do velikih oslobođenja para iz istoga prilikom lijevanja.



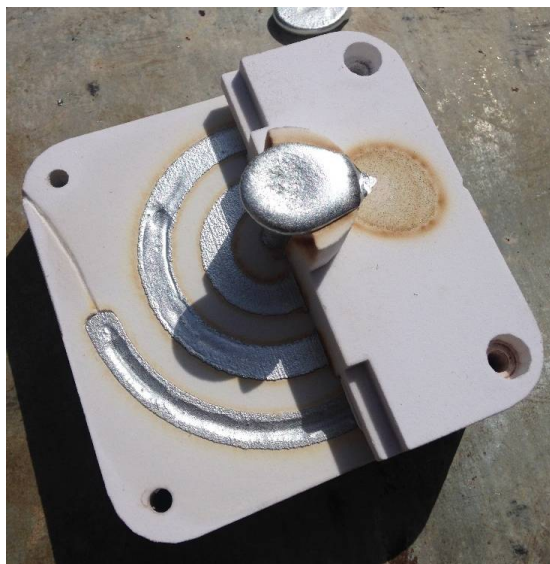
Slika 57. Zagrijavanje kalupa 2 na površini lijevačke peći

Nakon postignute željene temperature započinje proces lijevanja, uljevanjem legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u kalup 2 pomoću lijevačke žlice (Slika 58).



Slika 58. Lijevanje legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) u kalup 2

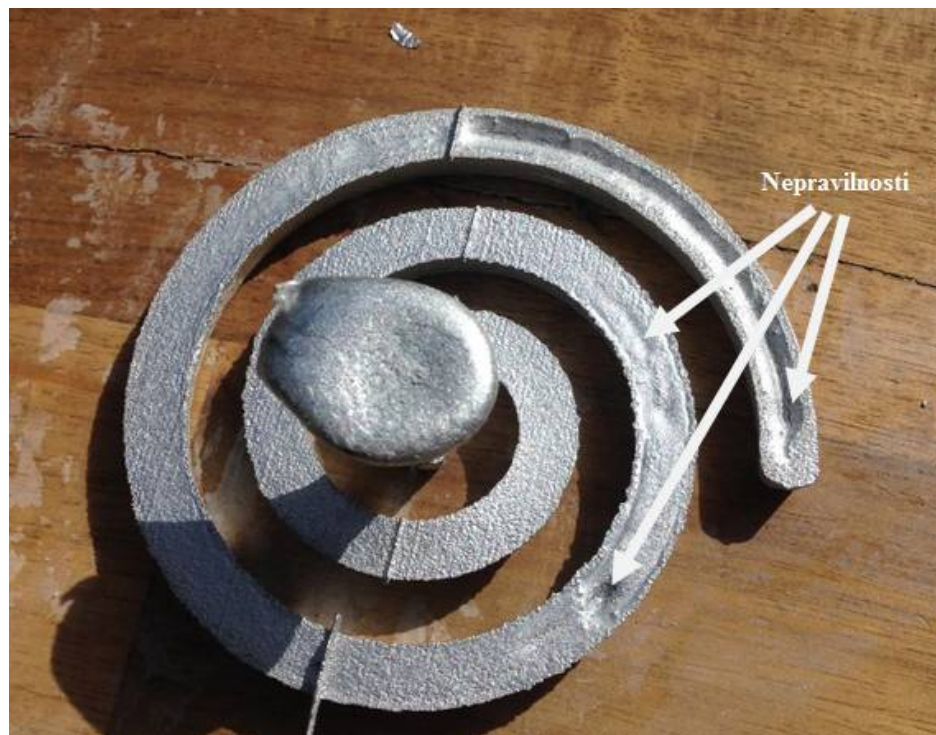
Nakon lijevanja, kalup se ostavlja u prostoru od 22°C na 12 minuta kako bi se isti ohladio i litina se skrutnula. Kalup 2 se otvara skidanjem vijaka i matica te polaganim micanjem gornjeg desnog dijela kalupa (Slika 59).



Slika 59. Micanje gornjeg desnog dijela kalupa 2 nakon lijevanja

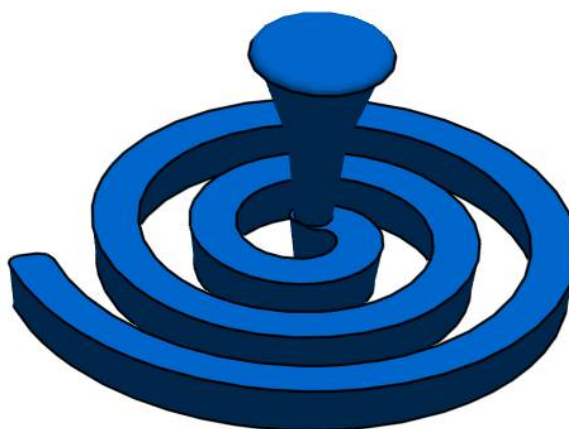


Već micanjem jedne polovice gornjeg dijela kalupa 2 uočava se da je litina popunila cijeli kalup Arhimedove spirale no još uvijek nije bio dovoljno osušen jer postoje sitne usahline na odljevku dobivene uslijed oslobađanja zaostalih para iz kalupa (Slika 60).



**Slika 60. Nepravilnosti na odljevku prvog lijevanja**

Odljevak se konstruira u programskom paketu Catia V5 pomoću opcije „Surface design“ kako bi se odredila težina odljevka te time i kontrola odstupanja popunjenosti kalupa (Slika 61) uvrštavanjem u postavke materijala gustoću legure Zamak 2 ( $ZnAl_4Cu_3$ ) koja iznosi  $6,8 \text{ kg/dm}^3$ .



**Slika 61. Konstruiranje odljevka prema Kalupu 2 pomoću opcije „Surface design“**

Masa konstruiranog odljevaka iznosi 0,168 kg dok odljevak iz prvog lijevanja teži 0,155 kg (Slika 62) što znači da litina nije dobro popunila kalup 2 te postupak lijevanja treba ponoviti. Odstupanje težine odljevka iz prvog lijevanja od ideale iznosi 13 grama.



Slika 62. Masa odljevka nakon prvog lijevanja

### 6.3.2. Drugo lijevanje

Prilikom vađenja odljevka nakon prvog lijevanja susreću se poteškoće odvajanja samog odljevka od donjeg dijela Kalupa 2. Bočni bridovi Arhimedove spirale na donjem dijelu kalupa 2 se lagano bruse pomoću brusnog papira granulacije 800 prije sklapanja u sklop i započinjanja procesa drugog lijevanja (Slika 63).



Slika 63. Brušenje i sklapanja kalupa 2 prije početka drugog lijevanja

Nakon sklapanja, kalup se ostavlja 15 minuta na lijevačkoj peći kao i kod prvog lijevanja. Temperatura Kalupa 2 prije lijevanja iznosi  $92^{\circ}\text{C}$  što je  $5^{\circ}$  više u odnosu na prvo lijevanje a i samim prvim lijevanjem, uslijed ulijevanja litine u kalup, dobiva se manji postotak vlage.

Kalup se nakon drugog lijevanja ostavlja, kao i kod prvog lijevanja, u prostoru od  $22^{\circ}\text{C}$  na 12 minuta radi hlađenja. Nakon micanja lijevog gornjeg dijela, uočava se idealno popunjenje kalupa 2 (Slika 64).



**Slika 64. Micanje gornjeg lijevog dijela kalupa 2**

Slijedi odvajanje i vađenje odljevka iz kalupa 2 no unatoč prethodno obrušenim bočnim bridova Arhimedove spirale odljevak se i dalje teže odvajao no ne zbog površine kalupa nego zbog zadržane vlage u kalupu. Nakon skidanja gornjih dijelova kalupa 2 koristili su se pomoćni alati s kojima se je pridržavao donji dio kalupa 2 koji je bio mekši u odnosu nakon prvog lijevanja (Slika 65).





**Slika 65. Otisci vađenja odljevka nakon drugoga lijevanja od pomoćnih alata**

Pomoćnim alatima prdržava se spirala donjeg dijela kalupa da ne dolazi do pucanja istoga. Uočavaju se dodatni prodori litine kroz dijelove Kalupa 2 (Slika 66) što može značiti da se Kalup 2 nakon drugog lijevanja gabaritno smanjio, ali zadrža dio vlage u sebi te time postao mekši.



**Slika 66. Odljevak nakon drugog lijevanja**

Odljevak se važe te mu masa nakon drugog lijevanja iznosi 0,165 kg [Slika 67], što je samo 3 grama odstupanje u odnosu na idealnu težinu odljevka. Test livljivosti je uspio!



Slika 67. Masa odljevka nakon drugog lijevanja

### 6.3.3. Treće lijevanje

Iako je test livljivosti uspio u drugom lijevanju, radi se treći ciklus lijevanja kako bi se utvrdila izdržljivost kalupa. Proces je isto kao i u prethodna dva postupka lijevnja. Kalup 2 se nakon sklapanja stavlja na površinu peći gdje postiže temperaturu od 91°C te započinje lijevanje u isti. Kalup 2 se nakon lijevanja još više stisnuo te je na gornjem dijelu, između oba dijela, litina izašla van istoga (Slika 68).



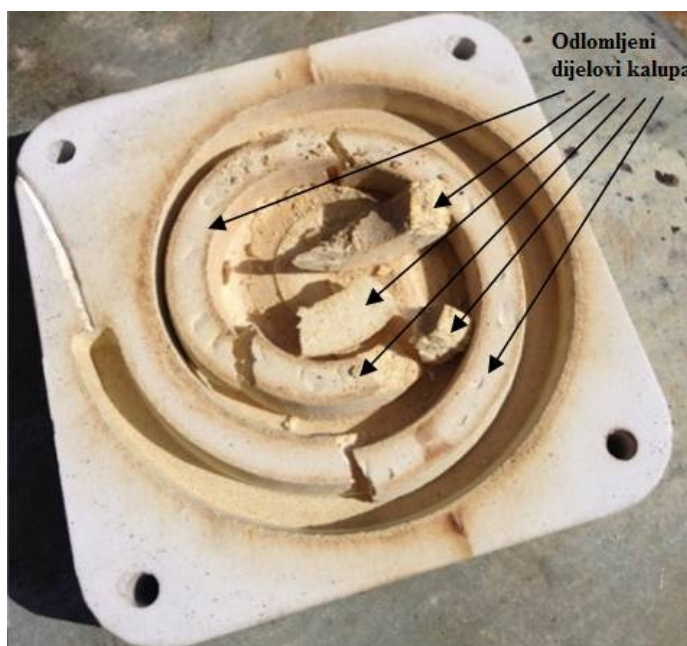
Slika 68. Smanjenje Kalupa 2 nakon trećeg lijevanja

Otvaranjem kalupa 2 uočava se da je litina još više doprijela između svih dijelova kalupa te postoje poteškoće odvajanja od donjeg dijela. Prilikom odvajanja, donji dio kalupa 2 počinje pucati zbog svoje mekoće na dijelu Arhimedove spirale (Slika 69), bez obzira na pomoć i pridržavanje istoga sa dodatnim alatima. Litina je čak ušla i u dio na kraju spirale predvičen za odvođenje vrućih para iz kalupa.



**Slika 69. Pucanje Kalupa 2 prilikom vađenja odljevka**

Test nije uspio jer kalup nije izdržao treće lijevanje a litina je popunila sve praznine između dijelova kalupa 2, a i sami kalup je razoren te lijevanje više daljnje lijevanje više nije omogućeno (Slika 70).



**Slika 70. Kalup 2 nakon vađenja odljevka trećeg lijevanja**



## 6.4. Rezultati lijevanja litine u kalup 2

Eksperiment 2 je izvršio test livljivosti iz drugog lijevanja ali kalup je izdržao samo tri ciklusa lijevanja. Smatra se da je kalup omekšavao nakon lijevanja i povišenih temperatura zbog tekućeg ljepljiva koje veže prah u 3D printeru. Kalup se svakim lijevanjem sve više stisnuo i gabaritno umanjio.

## 7. EKSPERIMENTALNO LIJEVANJE U KALUP 3

U eksperimentu 3 koristimo model i konstrukciju kalupa iz eksperimenta 2 jer je dizajn zadovoljio ispitivanje ali ga printamo u finijem sloju pomoću ZPrinter-a 450. Konstrukcija i dizajn se modelira u programskom paketu Catia V5 u gabaritnim dimenzijama 100x100x52 mm. Kalup se sastoji od tri dijela, jednog donjeg i dva gornja zbog mogućnosti ponavljanja ciklusa lijevanja, pričvršćen sa vijcima M5x30 i maticama M5 (Slika 31).

### 7.1. Priprema kalupa 3

U ovom slučaju, bez obzira što je kalup printan u finijem sloju, kalup se dodatno brusi pomoću brusnog papira granulacije 800 kako bi bilo omogućeno što lakše vađenje odljevka iz kalupa nakon lijevanja. Postoji mogućnost da se litina uvuče u praznine između slojeva nakon nekoliko ciklusa lijevanja. Najviša koncentracija brušenja je na bridovima Arhimedove spirale (Slika 71).



Slika 71. Brušenje kalupa 3

Kalup 3 se nakon brušenja stavlja u pećnicu na 100°C gdje se ostavlja na 2 sata kako bi se što više osušio i time sadržavao što manji postotak vlage da ne omekša tokom ponovljenih ciklusa lijevanja (Slika 72).



**Slika 72. Zagrijavanje kalupa 3**

Kalup 3 je nakon zagrijavanja i odvođenja vlage posato krhkiji nego što je bio. Kako bi spriječili dodatno omekšavanje kalupa prilikom lijevanja te susretanju kalupa s visokim temperaturama, premazat ćemo isti sa premazom Cirkon-dioksid ( $ZrO_2$ ) koji spriječava toplini da prodire u kalup.

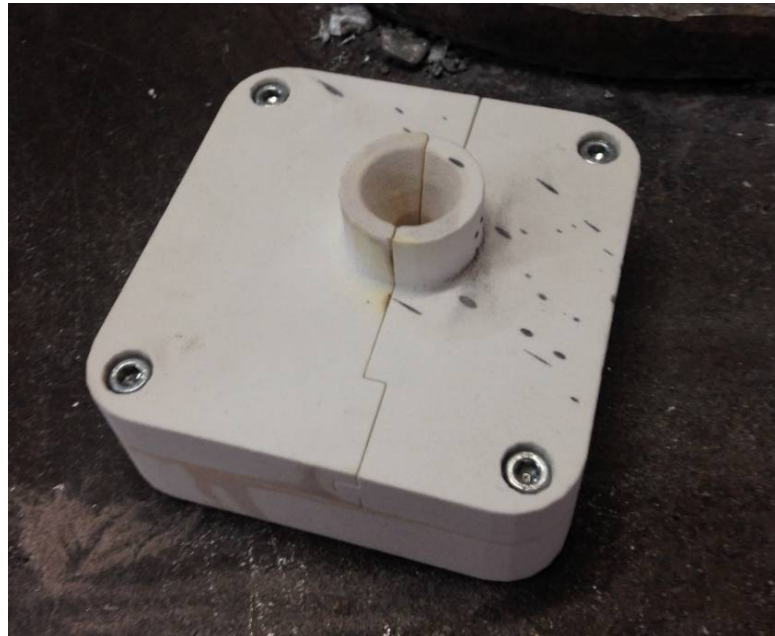
Poručje primjene Cirkon-dioksida je premazivanje pješčanih kalupa prije lijevanja za lakše odvajanje odljevka od istoga i sprečavanje odlaska prevelikih temperatura u kalup.

Dolazi u obliku bijelih kristala u više temperaturno ovisnih modifikacija (monoklinski 1000°C tetragonski 1900°C kubični). Kemijski je inertan i ima vrlo visoko talište (2700°C) pa se koristi kao sastojak visokovatrostralnih obloga peći otpornih na termošokove. Otapa se u fluoridnoj kiselini, vrućoj koncentriranoj sumpornoj kiselini, rastaljenom boraksu i staklu, a ne otapa se u vodi, kiselinama, lužinama, otopinama soli, organskim otapalima i rastaljenom NaCl i CaCl<sub>2</sub>. Taljenjem s alkalijama daje cirkonate koji su uglavnom kompleksni oksidi sa strukturom perovskita ili spinela.

Tako se npr. tetragonski olovov cirkonat smatra pogodnim materijalom za memorije elektroničkih uređaja. Kao visokovatrostralna opeka koristi se u izgradnji nuklearnih reaktora i lanaca u metalurgiji. Brojne su mu druge primjene: koristi se kao sastojak visokovrijednih keramika, kao abraziv i prah za poliranje, kao katalizator, za držače električnih grijača u pećima, kao izvor svjetla u Nernstovoj svjetiljci i aktivator fosforescentnog praha, kao

toplinski izolator (koji se nanosi termo-spray postupcima) te kao sirovina za dobivanje metalnog cirkonija i njegovih spojeva. Još se koristi i u dentalnoj medicini za izradu mostova zbog otpornosti na oštećenja nakon premaza. [4]

Kalup 3 sastavljamo u jednu cijelinu pomoću vijaka i matica (Slika 73).



Slika 73. Kalup 3 nakon pripreme

## ***7.2. Lijevanje litine u kalup 3***

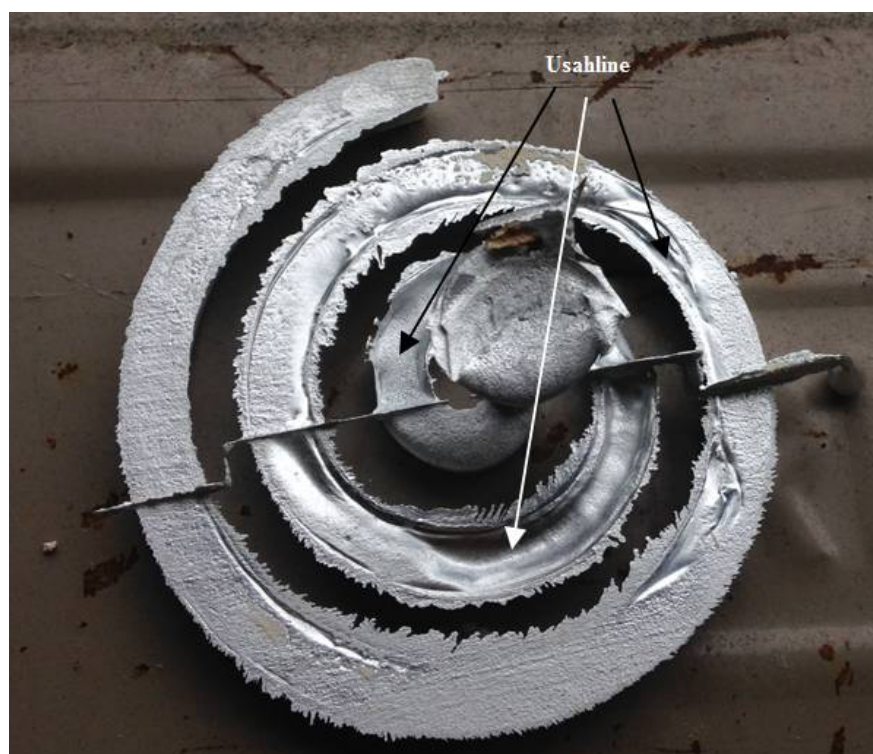
### **7.2.1. Prvo lijevanje**

Postupak lijevanja u eksperimentu 3 je isti kao i kod prethodna dva pukusa. Kalup se nakon sklapanja prvo ostavlja ne lijevačkoj peći na 20 min gdje postiže temperaturu od 86°C. Ulijeva se litina Zamak 2 ( $\text{CrAl}_4\text{Cu}_3$ ) čija je temperatura 430°C. Nakon lijevnja kalup se ostavlja na 5 minuta da se litina skrutne (Slika 74).



**Slika 74. Kalup 3 nakon prvog lijevanja**

Nakon rasklapanja kalupa 3 uočava se da litina nije dobro popunila kalup te postoje usahline. Tokom samog ulijevanja litine u kalup dio litine se vratio nazat te se moglo i očekivati da odljevak neće zadovoljiti ispitivanje kao što i nije (Slika 75). Usahline su nastale zbog prevelike razlike temperature između kalupa i litine. Nije bilo problema prilikom vađenja odljevka prvog lijevanja iz kalupa te isti nije oštećen.



**Slika 75. Odljevak nakon prvog lijevanja u kalupu 3**



Odljevak prvog lijevanja iz kalupa 3 se važe te se uočava da isti teži samo 0,120 kg (Slika 76). Masa odljevka odstupa od idealnog konstruiranog za 48 grama što je velika razlika. Nije zadovoljeno ispitivanje livljivosti u prvom lijevanju u kalup 3.



Slika 76. Masa odljevka nakon prvog lijevanja u kalup 3

### 7.2.2. Drugo lijevanje

U drugom lijevanju kalup 3 se ostavlja na lijevačkoj peći da se dodatno zagrije te počinje proces lijevanja. Lijevanje prolazi idealno te nema vraćanja litine iz kalupa kao što nema ni zaostalih para u istome koje bi mogle stvoriti usahline na samom odljevku. kalup 3 se nakon lijevanja ponovo ostavlja 5 minuta da se litina skrutne te se isti rasklapa. Tokom rasklapanja kalupa 3 nakon drugog lijevanja primjećujemo da je litina dobro popunila spiralu kalupa (Slika 77).



**Slika 77. Odljevak nakon drugog lijevanja u kalup 3**

Nije bilo problema prilikom vađenja odljevka drugog lijevanja iz kalupa te isti nije oštećen. Nakon odvajanja odljevka drugog lijevanja u kalup 3 uočava se da je puno bolje popunio Arhimedovu spiralu u odnosu na odljevak prvog lijevanja jer ne sadrži nikakve usahline (Slika 78).



**Slika 78. Razlika odljevaka prvog i drugoga lijevanja u kalup 3**

Odljevak drugog lijevanja iz kalupa 3 se važe te se uočava da isti teži 0,155 kg (Slika 79).





Slika 79. Masa odljevka nakon drugog lijevanja u kalup 3

Prikaz tog vaganja daje uvid da težina odljevka odstupa za 13 grama. Pronalazi se zaključak u dijelu uljavnog sustava. Svako lijevanje nije moguće ručno idealno izvesti na način da je uliven uvijek isti volumen litine u kalup što se može vidjeti na dijelu uljavnog susrava nakon lijevanja. Ispitivanje livljivosti drugog lijevanja u kalup 3 je uspjelo jer je litina popunila Arhimedovu spiralu na ispravan način.

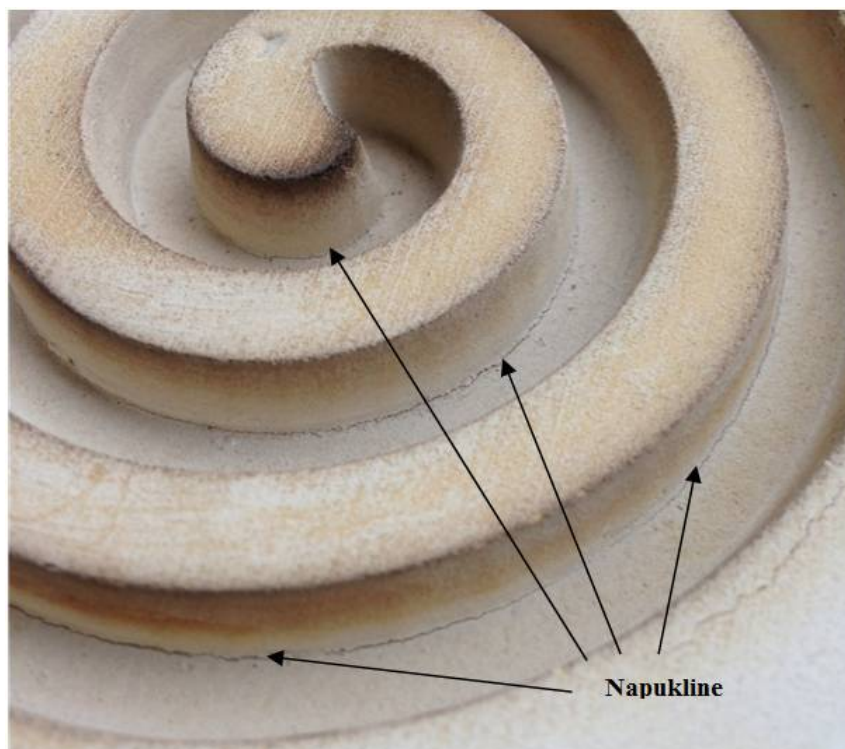
### 7.2.3. Treće lijevanje

U trećem lijevanju kalup 3 se ostavlja na lijevačkoj peći da se dodatno zagrije te počinje proces lijevanja. Lijevanje prolazi idealno te nema vraćanja litine iz kalupa kao što nema ni zaostalih para u istome koje bi mogle stvoriti usahline na samom odljevku. Kalup 3 se nakon lijevanja ponovo ostavlja 5 minuta da se litina skrutne te se isti rasklapa. Tokom rasklapanja kalupa 3, nakon trećeg lijevanja primjećujemo da je litina dobro popunila spiralu kalupa (Slika 80).



Slika 80. Odljevak nakon trećeg lijevanja u kalup 3

Nije bilo problema prilikom vađenja odljevka trećeg lijevanja iz kalupa ali primjećujemo da je isti dobio napukline na podnožju Arhimedove spirale (Slika 81).



**Slika 81. Napukline na podnožju Arhimedove spirale kalupa 3 nakon trećeg lijevanja**

Odeljak trećeg lijevanja se važe te se uočava da je iste mase od 0,155 kg kao i odljevak drugog lijevanja (Slika 82). Ispitivanje livljivosti trećeg lijevanja u kalup 3 je uspjelo jer je litina popunila Arhimedovu spiralu na ispravan način.



**Slika 82. Masa odljevka nakon tećeg lijevanja u kalup 3**

#### 7.2.4. Četvrto lijevanje

Iako je Kalup 3 malo napukao i dalje je sadrži dizajn konstruiranog kalupa. Ponavlja se još jedno lijevanje kako bi se vidjelo da li će kalup izdržati isto te kakvo će biti njegovo ponavljanje. Uvjeti i postupak lijevanja je isti kao i u prethodna tri lijevanja. Odljevak četvrtog lijevanja oprezno se odvaja od kalupa 3 s obzirom na pukotine. Nakon rasklapanja kalupa 3 uočava se da je litina popunila spiralu (Slika 83).



Slika 83. Odljevak nakon četvrtog lijevanja u kalup 3

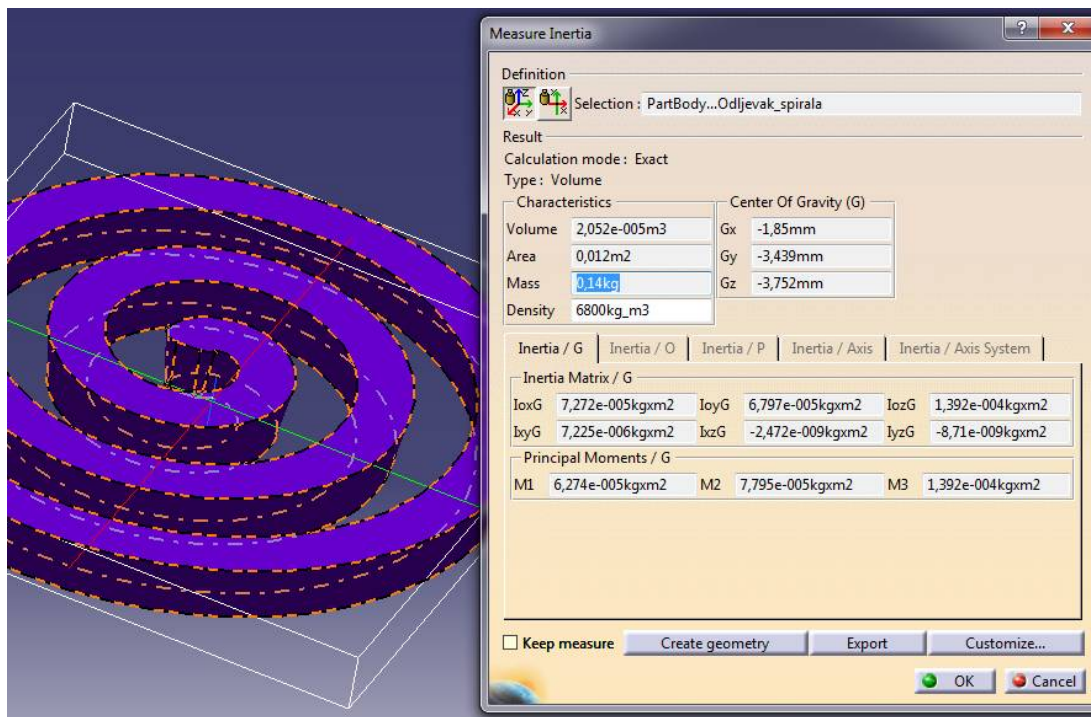
Odljevak četvrtog lijevanja se sa lakoćom odvojio od kalupa 3 te nije bilo nikakvih problema niti se kalup oštetio. Kalup 3 je ostao postojan za sljedeće lijevanje (Slika 84).



Slika 84. Kalup 3 nakon četvrtog lijevanja



Prethodno konstruiran idealan odljevak težio je 0,168 kg. Rekonstruiranjem istoga, dizajnira se odljevak samo spirale bez dijela uljavnog susatava te ona sada teži 0,14 kg (Slika 85).



Slika 85. Težina konstruirane Arhimedove spirale bez uljavnog dijela

Nadalje, na odljevku četvrtog lijevanja reže se dio uljavnog sustava koji je popunila litina te se važe. Prilikom vaganja, primjećuje se da masa odljevka četvrtog lijevanja u kalup 3 iznosi 0,14 kg (Slika 86) što je identično idealnoj masi konstruiranog odljevka. Ispitivanje odljevka u četvrtom lijevanju ne samo da je zadovoljilo test livljivosti već sadrži identičnu težinu idealnog.



Slika 86. Masa odljevka nakon četvrtog lijevanja u kalup 3

### ***7.3. Rezultati lijevanja litine u kalup 3***

Eksperimentom je izvršen test livljivosti. Veliku ulogu uspjeha dobiva se predgrijavanjem kalupa nakon printanja, brušenjem bočnih brdova Arhimedove spirale te Crikon-dioksid-ovim premazom koji spriječava povišenje temperature kalupa tokom lijevanja. Pošto je prilikom svakog pokusa prvo lijevanje bilo neuspjelo zaključuje se da je pevelika razlika temperature litine u odnosu na kalup te se uvijek oslobode zaostale pare iz kalupa. Svaki prvi odljevak je probni, nevaljani, ali temperaturno uravnoteži kalup sa litinom kako bi svako sljedeće lijevanje bilo zadovoljavajuće.

Nakon četiri lijevanja u eksperimentu 3, kalup je i dalje postojan te se može vršiti sljedeće lijevanje. Treba samo obratiti pozornost na oprezno odvajanje odeljvaka od kalupa kako isti ne bi bio oštećen.

## 8. ZAKLJUČAK

Lijevanje u kalupe izrađenim aditivnom metodom je konstruktivno i tehnološko brzo rješenje jer pri svakom uvidu grešaka na kalupu nakon ulijevanja, može se vratiti na prethodni korak, odnosno konstrukciju i dizajn kalupa gdje iste ispravljamo te se kalup ponovo izrađuje. U odnosu na dosadašnje izrade kalupa, ovom metodom isti se izrađuju puno brže. Cijena je prihvatljiva u odnosu na dosadašnje metode s obzirom na vrijeme izrade kalupa.

Mogućnost dobre kvalitete površine koja ovisi o finijem sloju printanja te dodatnom brušenju. Isprintani kalup se mora obavezno zaštititi termalnim premazom jer tekuće vezivo praha u suprotnom ispari tokom lijevanja te stvara dodatnu vlagu u kalupu kao što je uočeno u eksperimentalnom lijevanju 2. Samim isparivanjem tekućeg veziva narušava se konstrukcija, a time i dimenzije odljevka nakon lijevanja. Svako prvo lijevanje treba smatrati kao probno jer tek nakon istoga kalup dobi temperaturnu ravnotežu sa litinom, kao što je uočeno prema eksperimentima.

Aditivnom metodom izrade kalupa postoji mogućnost lijevanja kompleksnih odljevaka no ipak u pojedinačnoj proizvodnji jer ponavljanjem ciklusa dolazi do gabaritnih nepravilnosti što nosi dodatne obrade nakon lijevanja. Ako se koristi u pojedinačnoj proizvodnji za kompleksne odljevke postoji mogućnost lakog razaranja kalupa nakon lijevanja. Za maloserijsko ili serijsko lijevanje trebalo bi vršiti dodatna ispitivanja i analize na raznim oblicima odljevaka dimenzionalno i dizajnerski kompleksno. Litina dobro popunjava kalup izrađenih aditivnom metodom što se može uočiti iz prethodnih eksperimenata livljivosti.



## **9. PRILOZI**

### **I. CD-R disc**

## 10. LITERATURA

- [1] "Ljevarstvo", www.fsb.unizg.hr, 2011.
- [2] „Trodimenzionalni tisak“  
<http://materijali.grf.unizg.hr/media/TRODIMENZIONALNI%20TISAK.pdf>
- [3] „Zamak 2“ <http://www.rotometals.com/product-p/zamak%202%20ingots.htm>
- [4] „Cirkon-dioksid“ <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/zr/spojevi.html>