

# Analiza proizvodnog programa i procesa proizvodnje zaštitnih kaciga

---

**Košak, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:326237>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matija Košak**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Zoran Kunica, dipl.ing.

Student:

Matija Košak

Zagreb, 2019.

**ZADATAK****SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

**DIPLOMSKI ZADATAK**

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## **IZJAVA**

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

U Zagrebu, 25. studenoga 2019.

Matija Košak

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici, dipl.ing. i asistentu Damiru Beliću, mag.ing. mech. na strpljenju i korisnim savjetima koji su mi pomogli u izradi diplomskog rada.

Također, zahvaljujem tvrtki Šestan-Busch d.o.o. i glavnom direktoru gosp. Alojziju Šestanu na pruženoj prilici i susretljivosti prilikom izrade diplomskog rada. Veliko hvala mentorima Boži Bujaniću i Dominiku Žgancu, te svim kolegama koji su mi pomogli na bilo koji način u izradi rada.

**Posebno i veliko hvala mojoj obitelji, roditeljima Suzani i Robertu, bratu Davoru i djevojci Ivani te svim bližnjima i kolegama na bezuvjetnoj podršci i pomoći tijekom studija.**

Matija Košak

## SAŽETAK

Rad razmatra razvoj prototipa karbonske multifunkcionalne zaštitne kacige, koja bi imala široku civilnu i ograničenu vojnu primjenu. Razvoj takve kacige, uključivao je, pored ostaloga, oblikovanje varijanti modela kacige i izradu prototipa primjenom postupka vakuumske infuzije. Višekratnim ponavljanjem postupka vakuumske infuzije željelo se istražiti, stabilizirati i optimirati tehnološke parametre postupka, u cilju uspostave buduće serijske proizvodnje kaciga.

Ključne riječi: vojna industrija, zaštitna oprema, zaštitna kaciga, *multifunkcionalna zaštitna kaciga*, karbon, vakuumska infuzija

## **SUMMARY**

This thesis considers the development of a prototype of a carbon multifunctional safety helmet, which would have wide civilian and limited military applications. The development of such a helmet included, among other things, the designing of variants of the helmet model and manufacture prototype using a vacuum infusion procedure. By repeatedly repeating the vacuum infusion procedure, the aim was to investigate, stabilize and optimize the technological parameters of the procedure in order to establish future batch production of helmets.

Key words: military industry, protective gear, protective helmet, *Multifunctional safety helmet*, carbon, vacuum infusion



## SADRŽAJ

<b>ZADATAK.....</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVA .....</b>	<b>II</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>III</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>IV</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>V</b>
<b>POPIS OZNAKA.....</b>	<b>VIII</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>IX</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. VOJNA INDUSTRIJA I ZAŠTITNE KACIGE.....</b>	<b>2</b>
2.1. Vojna industrija.....	2
2.2. Zaštitna oprema u vojnoj industriji .....	4
2.3. Zaštitne kacige .....	7
2.4. Šestan-Busch d.o.o. ....	9
2.4.1. Kaciga BK-TT .....	10
2.4.2. Kaciga BK-R-SALESI.....	11
2.4.3. Kaciga BK-TF.....	12
2.4.4. Kaciga BK-R.....	13
2.4.5. Kacige BK-3 i BK-4 .....	14
2.4.6. Kaciga BK-ACH.....	15
2.4.7. Ostali proizvodi.....	16
2.5. Konkurencija.....	17
2.5.1. Team Wendy .....	17
2.5.1. Revision-military .....	19
<b>3. PROIZVODNI PROCES IZRADE VOJNE KACIGE .....</b>	<b>21</b>
3.1. Obrada kevlaru .....	22
3.2. Prešanje .....	24
3.3. Balističko ispitivanje.....	25
3.4. Bojenje .....	27
3.5. Montaža.....	28
3.5.1. Dijelovi za apsorpciju udarca.....	28
3.5.2. Regulacija podbradnog i zatiljnog dijela .....	31
3.5.3. Dodatna oprema .....	33
<b>4. PROJEKT MULTIFUNKCIONALNE ZAŠTITNE KACIGE .....</b>	<b>36</b>
4.1. EU projekt.....	36
4.2. Istraživanje .....	36
4.3. Tržište, količine i norme .....	37
4.4. Konkurencija.....	37

---

4.5. Materijal .....	41
4.6. Proizvodnja multifunkcionalne zaštitne kacige .....	43
4.6.1. Vakuumska infuzija .....	43
4.6.2. Nedostaci vakuumske infuzije .....	45
4.6.3. Proces vakuumske infuzije.....	45
4.7. Faze razvoja prototipa kacige .....	50
4.7.1. Modeliranje .....	50
4.7.2. 3D tiskanje .....	56
4.7.3. Modeliranje kalupa iz odabrane kalote .....	59
4.7.4. Izrada kalupa .....	60
4.7.5. Vakuumske infuzija .....	62
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>71</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>73</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>74</b>

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis</b>
$d$	m	promjer
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$m$	g	masa
$T$	°C	temperatura
$t$	s	vrijeme
$v$	m/s	brzina
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\sigma_M$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Vojna potrošnja u svijetu [1] .....	2
Slika 2.	Prodaja i izvoz oružanja u svijetu [2] .....	3
Slika 3.	Tjelesni oklop [17] .....	4
Slika 4.	Zaštitna kaciga [19] .....	5
Slika 5.	Zaštitna odjeća kroz povijest [4] .....	6
Slika 6.	Vlakna kevlar [6] .....	7
Slika 7.	Uništena kaciga od kevlar [19] .....	8
Slika 8.	Kaciga BK-TT [7] .....	10
Slika 9.	Kaciga BK-R-SALESI [7] .....	11
Slika 10.	Kaciga BK-TE [7] .....	12
Slika 11.	Kaciga BK-R [7] .....	13
Slika 12.	Kacige BK-3 i BK-4 [7] .....	14
Slika 13.	Kaciga BK-ACH [7] .....	15
Slika 14.	Kaciga PK-RIOT-I [7] .....	16
Slika 15.	Prsluk COVERT VEST C540 MOLLE [7] .....	17
Slika 16.	Kaciga Exfil Ballistic SL [8] .....	18
Slika 17.	Kaciga Exfil SAR Tactical [8] .....	19
Slika 18.	Kaciga Caiman Ballistic [9] .....	20
Slika 19.	Kaciga BK-ACH [7] .....	21
Slika 20.	Bala tkanine kevlar [5] .....	22
Slika 21.	Pokrivenost ušiju kod BK-ACH zaštite kacige [7] .....	23
Slika 22.	Strojevi za prešanje kaciga [7] .....	24
Slika 23.	Ispitni laboratorij [7] .....	25
Slika 24.	Ispitni primjerak zaštitne kacige .....	27
Slika 25.	Unutarnja oprema SHOTECK [7] .....	28
Slika 26.	Unutarnja oprema SHOTECK .....	29
Slika 27.	Unutarnja oprema – spužvice .....	30
Slika 28.	Dio za regulaciju podbratnog i zatiljnog dijela [7] .....	31
Slika 29.	Unutrašnji dio kacige nakon montaže .....	32
Slika 30.	Ispitani vizir .....	33
Slika 31.	Adapteri za kacigu [7] .....	34
Slika 32.	Prednji adapter za kacigu [7] .....	34
Slika 33.	Personalizirana kaciga BK-ACH s adapterima za dodatnu opremu .....	35
Slika 34.	Kaciga Cougar Tactical [24] .....	38
Slika 35.	Kaciga Tactical Hero [25] .....	38
Slika 36.	Kaciga Dominator [10] .....	39
Slika 37.	Inceptor GRX [11] .....	40

Slika 38.	Manta SAR [26] .....	40
Slika 39.	Karbonska vlakna [12] .....	41
Slika 40.	Primjer karbonskih vlakana u autoindustriji [12] .....	42
Slika 41.	Priprema kalupa te rezanje i pozicioniranje karbonskih vlakana .....	47
Slika 42.	Dodavanje sloja Peel-ply-a .....	47
Slika 43.	Slaganje cijevi i tkanine za prolaz smole .....	48
Slika 44.	Slaganje vakuumske folije .....	48
Slika 45.	Spajanje cijevima posudu za dovod smole te vakuumsku posudu na vakuumsku foliju .....	49
Slika 46.	Završni izgled procesa vakuumske infuzije .....	49
Slika 47.	Osnovna kaciga .....	51
Slika 48.	Modifikacija osnovne kacige, pridodavanjem tjemelog ojačanja .....	52
Slika 49.	Kaciga s varijacijom tjemelog ojačanja, u svrhu veće čvrstoće .....	53
Slika 50.	Daljnje modeliranje tjemelog ojačanja kacige, u svrhu veće čvrstoće .....	54
Slika 51.	Biciklistička izvedba kacige .....	54
Slika 52.	Model kacige odabrane za izradu prototipa .....	55
Slika 53.	Kaciga tiskana postupkom LPD .....	57
Slika 54.	Crna kaciga tiskana postupkom LPD .....	57
Slika 55.	Kaciga tiskana postupkom SLS .....	58
Slika 56.	Model kalupa .....	59
Slika 57.	Postupak lijepljenja medijapana .....	60
Slika 58.	Kalup .....	61
Slika 59.	Čistač kalupa .....	63
Slika 60.	<i>Sealer</i> .....	63
Slika 61.	Tekući odjeljivač .....	64
Slika 62.	Vosak za odjeljivanje .....	64
Slika 63.	Vakuumska kantica .....	65
Slika 64.	Kalup spreman za postupak vakuumske infuzije .....	66
Slika 65.	Postupak pod vakuumom .....	67
Slika 66.	Prva izrađena kaciga, oštećena pri vađenju iz kalupa .....	68
Slika 67.	Druga izrađena kaciga, oštećenja uslijed nestvrdnutosti smole .....	68
Slika 68.	Treća izrađena kaciga, zadovoljavajuće kvalitete .....	69
Slika 69.	Kaciga kao gotov proizvod .....	70

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Postupci u procesu izrade kacige ACH .....	22
Tablica 2. Norma NIJ za balističko ispitivanje kaciga .....	26
Tablica 3. Usporedba vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i gustoće ugljičnih, aramidnih i staklenih vlakana [12] .....	42
Tablica 4. Faze razvoja prototipa <i>Multifunkcionalne zaštitne kacige</i> .....	50
Tablica 5. Veličine glava.....	50
Tablica 6. Proces u vakuumskoj infuziji .....	62

## 1. UVOD

U današnjem svijetu, kao i kroz povijest, ratovanje je strašna, ali učestala pojava koja se javlja u svim dijelovima svijeta. Kako se većina novih izuma ostvarila upravo u vrijeme velikih sukoba i ratova kroz povijest, tako i danas vojna industrija teži tehnologiji koja je nova i bolja od postojeće. Razvojem novih tehnologija, koje se prvo koriste u svrhu izrade novih i poboljšanih oružja, razvijaju se sukladno njima i ostale industrije.

U ovome radu razmotrit će se zaštitna vojna kaciga kao jedna od bitnih komponenata osobne vojne opreme, te s njom usko povezana civilna zaštitna kaciga.

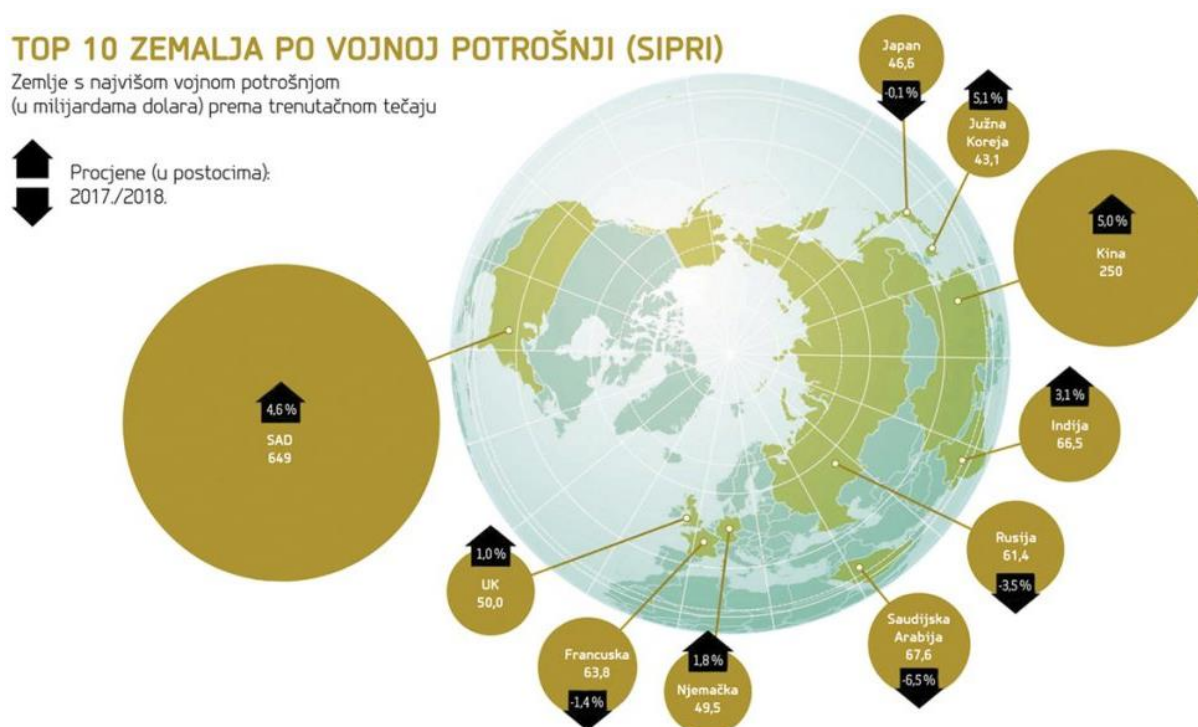
Danas se u svijetu koristi mnogobrojna zaštitna oprema bilo koje namjene, što zbog veće dostupnosti, što zbog drugačijeg razmišljanja ljudi u modernom dobu, ali sve više zbog pravila i zakona koji nalažu i propisuju njezinu obaveznu primjenu. Kako svakim danom svijet i tehnologija napreduju, pored funkcionalnosti i cijene, sve se više gleda i na izgled, udobnost i težinu, pa je modularnost u konstruiranju i proizvodnji te zaštitne opreme posebno bitna. Kroz rad će se moći uočiti kako neke minimalne promjene na zaštitnoj opremi mijenjaju upravo prije nabrojene karakteristike te se sve više okreću prema potrebama i željama pojedinaca (personalizacija proizvoda, engl. *mass customisation*). Razvoj novih modela zaštitne opreme dug je proces koji uključuje predviđanje sitnih promjena zaštitne opreme koje bi pojedinac mogao trebati i tražiti. Upravo se ta pojedinačnost danas iznimno cijeni i traži, pa je bitno imati na umu mogućnost modularne građe koja bi takvo nešto i omogućila.

Dakle, u radu će se vidjeti primjer razvoja zaštitne kacige okrenute željama pojedinaca, s posebnim naglaskom na njezinu multifunkcionalnost, pa tako i rasprostranjenost njene uporabe u raznim djelatnostima i industrijama. Nadalje, u radu posebno istaknuto mjesto ima razrada tehnološkog postupka vakuumske infuzije, kojim se kaciga namjerava serijski izrađivati.

## 2. VOJNA INDUSTRIJA I ZAŠTITNE KACIGE

### 2.1. Vojna industrija

Vojna industrija ili obrambena industrija je globalna industrija koja proizvodi i prodaje oružja i vojnu tehnologiju. Vojna industrija sastoji se od marketinga, istraživanja i razvoja, proizvodnje i održavanja vojnoga materijala, opreme i vojnih postrojenja. Proizvodi vojne industrije su razna oružja, municija, rakete, zaštitna oprema, zrakoplovi, brodovi, elektronični sistemi, laseri, ručne granate i još mnogi drugi. Godišnji troškovi vojne industrije za godine 2017. i 2018. iznose dva bilijuna dolara (Slika 1.).

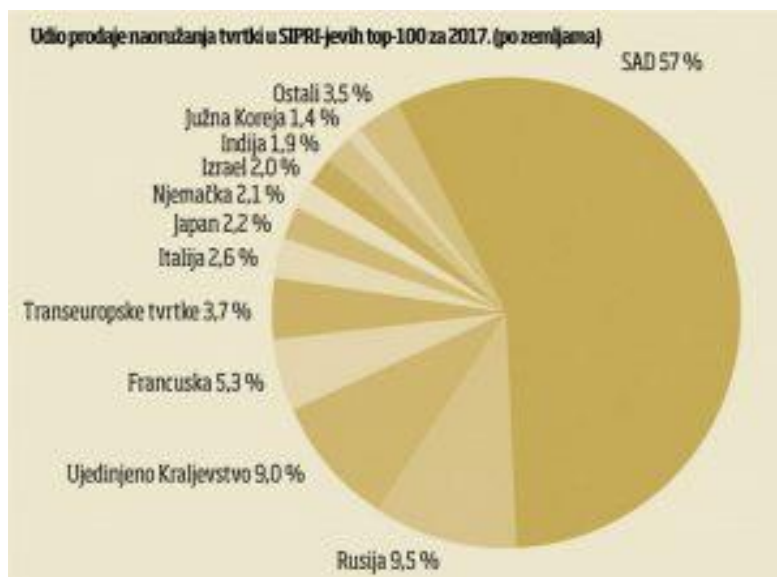


Slika 1. Vojna potrošnja u svijetu [1]

Najveći izvoznici vojne opreme u svijetu su SAD, Rusija, Kina, Njemačka i Francuska, dok su najveći uvoznici vojne opreme Indija, Saudijska Arabija, Kina, Ujedinjeni Arapski Emirati te Pakistan.



S udjelom većim od 50%, SAD je 2017. godine bio na uvjerljivo vodećem mjestu u izvozu vojne opreme (Slika 2.).



Slika 2. Prodaja i izvoz oružanja u svijetu [2]

Vojna industrija dijeli se na sljedeće sektore: sektor kopnenih oružja, sektor zračnih oružja te sektor pomorskih oružja i opreme. Uz spomenute sektore, sve se više kao prijetnja sigurnosti javljaju Cyber oružja.

Najveći proizvođač vojne opreme u svijetu je američki Lockheed Martin.

U Hrvatskoj vojna industrija nije posebno raširena te ima tek nekoliko tvrtki koje se bave proizvodnjom vojne opreme. Najpoznatije takve tvrtke u Hrvatskoj jesu Šestan-Busch d.o.o., Dok-Ing, HS Produkt i Grupacija Đuro Đaković [3].

Tvornica HS Produkt bavi se proizvodnjom pješačkog naoružanja, posebno pištolja, kao svog najpoznatijeg i najprodavanijeg proizvoda. Šestan-Busch bavi se izradom zaštitnih kaciga kaciga. Tvrtka Dok-Ing kao glavni proizvod koji spada u vojnu upotrebu ima opremu za razminiranje. Glavni proizvod grupacije Đuro Đaković je oklopno vojno vozilo.

## 2.2. Zaštitna oprema u vojnoj industriji

U zaštitnu opremu u vojnoj industriji spadaju tjelesni oklop (Slika 3.), oklopno odijelo, zaštitne kacige te slojevi oklopa. Sva zaštitna oprema napravljena je u svrhu apsorbaranja i odbijanja napada oružjem. Zaštitna oprema prije se koristila najviše u vojnoj uporabi dok se danas koristi i u zaštiti privatnih građana, policije i zaštitara.



Slika 3. Tjelesni oklop [17]

Slika 4. prikazuje modernu zaštitnu kacigu koja služi za zaštitu glave te smanjenje traume prilikom udarca u glavu.



**Slika 4. Zaštitna kaciga [19]**

Smisao oklopa je da oklopljeni objekt zaštititi od sila koje na njega djeluju izvana. On treba pružiti zaštitu od uništavajućeg djelovanja metka, raznih krhotina i sličnog. Postiže se na način da se objekt ili prostor koji treba zaštititi obuhvati slojem materijala visoke čvrstoće.

Zaštita se ostvaruje na način da oklop (zaštitni sloj) odoli, odnosno otkloni (preusmjeri) očekivanu razornu snagu. Pri tome, otpornost oklopa treba biti primjerena veličini i vrsti snage koja se očekuje. Snaga oklopa proizlazi iz čvrstoće materijala (tvrdoća i strukturna stabilnost) kao i strukture građe (na primjer izbočine). Struktura građe značajna je prije svega kod djelovanja sila na veliku površinu (zaštita od gnječenja), dok je čvrstoća materijala bitna kod točkastog djelovanja sile (streljivo).

Razlikuju se, naročito u vojnom [16] području, aktivni [17] i pasivni princip oklopa. Pasivni i (re)aktivni oklopi mogu se kombinirati (na primjer kod borbenih oklopa koji su opremljeni slojem reaktivnih oklopnih keramičkih pločica i time su bolje zaštićeni od streljiva).

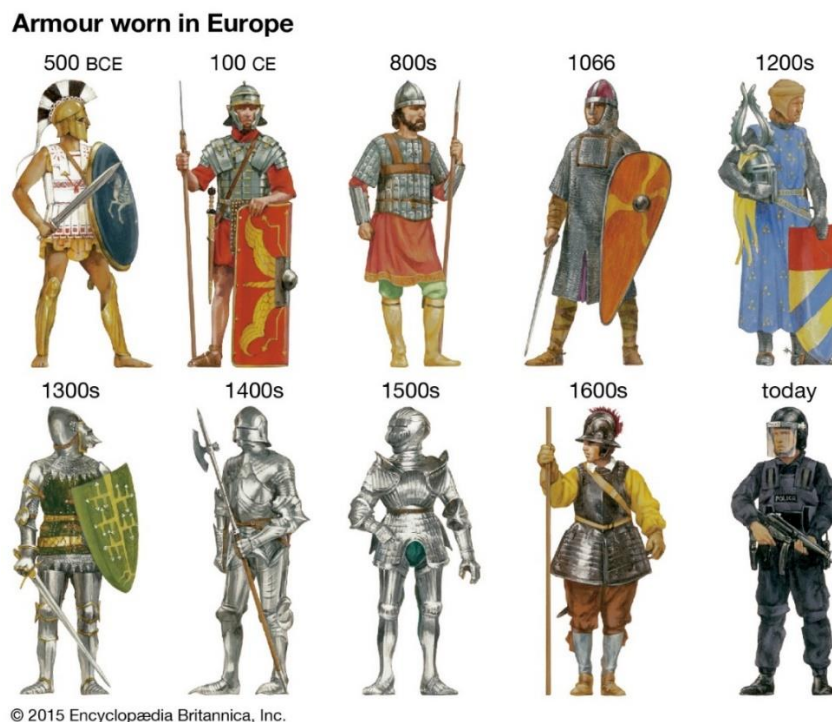
Oklopi mogu postojati i kao samostalni objekti, pa ga objekt koji treba zaštitu koristi samo prema potrebi. Poznati primjeri takvih oklopa su štitovi [18] vojnika u povijesti, kaciga [19] i slično.

Oklopi se daju podijeliti u tri glavne kategorije [17]:

1. oklop od kože, tkanine ili miješanih slojeva,
2. oklop izrađen od isprepletenih metalnih prstenova (željezo, čelik),
3. kruti oklop izrađen od metala [20], drva, plastike ili nekog drugog tvrdog i otpornog materijala (takve oklope nosili su vitezovi u srednjem vijeku).

Slika 5. prikazuje zaštitnu opremu vojnika kroz povijest [4].

Danas se sve više u industriji vojne opreme istražuju i koriste novi materijali, te se tako od nekad standardnog čelika sve više počelo kombiniranje novih materijala od kojih se može spomenuti kevlar jer je on specifičan za izradu zaštitne opreme. Kevlar je specifičan zbog toga što ima vrlo prikladna balistička svojstva, a mnogo je lakši od čelika koji se prije koristio.



Slika 5. Zaštitna odjeća kroz povijest [4]

### 2.3. Zaštitne kacige

Vojne kacige napravljene su za očuvanje glave.

Vojne kacige pojavljuju se od najranije povijesti ratovanja. Materijal kojim su se izrađivale prve kacige bile su koža i mjed, a kasnije bronca i željezo. Sredinom 10. stoljeća u vojnoj uporabi bile su najvećim dijelom kacige izrađene od čelika koji je bio najčvršći i najotporniji od svih dotad znanih materijala za izradu kaciga [5].

Najveći napredak u izradi vojnih kaciga desio se u 20. stoljeću tijekom dva svjetska rata. Kako su se potom sve više istraživali novi materijali, danas se kao materijali za izradu vojnih kaciga najviše koriste kevlar i twaron. Kevlar i twaron su lagana, čvrsta paraaramidna umjetna vlakna (Slika 6.). [6]



Slika 6. Vlakna kevlara [6]

Kevlar je zlatnožute boje. Promjer filamenata kevlara je 5 mikrometara, dok je temperatura raspada na visokih 500°C. Gustoća kevlara iznosi 1470 kg/m<sup>3</sup>, dok mu je vlačna čvrstoća 3500 N/mm<sup>2</sup>.

Twaron je također zlatnožute boje te sličnih karakteristika kao što ih ima i kevlar. Gustoća mu je ovisna o debljini niti koje su isprepletene u njemu od oko 1440 do 1470 kg/m<sup>3</sup>, a vlačna čvrstoća od 2400 do 3600 N/mm<sup>2</sup>.

Iako su sličnih karakteristika i izgleda, kevlar i twaron imaju različita imena jer su ih tako nazvale tvrtke koje su ih prve napravile. Kevlar je napravila tvrtka DuPont, dok je Twaron napravila tvrtka Akzo. [21]

Slika 7. prikazuje uništenu kacigu od kevlara koja je apsorbirala eksploziju granate. Može se uočiti da su se vlakna odvojila samo na pojedinim mjestima, a sama kaciga izgleda kao razderana i uništena odjeća.



Slika 7. Uništena kaciga od kevlara [19]

## 2.4. Šestan-Busch d.o.o.

Tvrtka Šestan-Busch d.o.o. nudi opsežnu liniju plastomernih proizvoda kao i kompozitnih proizvoda. U području vojne opreme djeluje u proizvodnji balističkih sredstava zaštite, biološko kemijskih sredstava zaštite i proizvodnji plastičnih dijelova. [7]

Šestan-Busch d.o.o. je moderna privatna tvornica čija je proizvodnja pod stalnim nadzorom vlastitih stručnjaka obučenih za namjensku proizvodnju i pod vanjskom kontrolom inopartnera po normama ISO 9001. Tvrtka ima stalnu suradnju po pitanju razvoja novih materijala s poznatim institutima iz Hrvatske, Njemačke, Italije, SAD-a, Španjolske, kao i iz drugih zemalja.

Osim vlastitim stručnjacima, tvrtka raspolaže suvremenim tehnologijama koje odgovaraju kompleksnim zahtjevima proizvodnje vojne opreme Tako, proizvodi tvrtke dostižu i prestižu sam vrh svjetske kvalitete vojnih proizvoda, a prije svega: protubalističke kompozitne kacige koje su visoke balističke zaštite preko 700 m/s, univerzalni pribor za osobnu dekontaminaciju te razni tehnički proizvodi od plastičnih materijala za specijalnu namjenu.

Proizvodi koje tvrtka najviše izrađuje jesu zaštitne kacige te zaštitni prsluci.

Specifičnost ove tvrtke je što nudi veliku raznolikost različitih tipova kaciga u vidu boje, udobnosti, težine, dodataka na kacigi, tj. ispunjavaju sve želje kupaca. U narednom tekstu spomenut će se nekoliko najčešćih osnovnih modela koje tvrtka proizvodi, dok će se kasnije opisati proizvodni proces izrade jedne kacige.

### 2.4.1. Kaciga BK-TT

BK-TT je lagana, nebalistička kaciga razvijena za vojni trening, rekreativne svrhe ili bilo kakvu primjenu gdje balistička zaštita nije potrebna. Školjka kacige je proizvedena pomoću tehnologije SMC (engl. *Sheet Molding Compound*) iz posebnog termostabilnog materijala koji je ojačan staklenim i aramidnim vlaknima pri čemu se osigurava otpornost na ubod i visoka razina zaštite na udarac.



Slika 8. Kaciga BK-TT [7]



### 2.4.2. *Kaciga BK-R-SALESI*

BK-R SALESI je balistička kaciga izrađena od visokokvalitetnih aramidnih vlakana. Kaciga je posebno dizajnirana i razvijena po danim uvjetima kako bi se povećala zaštita cijele glave. Svi elementi su pričvršćeni bez bušenja rupa na kacigi (kaciga bez vijaka) kako bi se uklonile sve potencijalne slabe točke.



Slika 9. Kaciga BK-R-SALESI [7]

### 2.4.3. Kaciga BK-TF

Kaciga BK-TE je balistička tenkovska kaciga izrađena od visokokvalitetnih aramidnih vlakana ili UHMWPE (polietilen ultravisoke molekularne težine). Posebno je proizvedena za rad u vojnim ili drugim oklopnim vozilima. Ima proširenja tako da pruža zaštitu i mogućnost nošenja slušalica i ostalih komunikacijskih uređaja.



Slika 10. Kaciga BK-TE [7]

#### 2.4.4. Kaciga BK-R

Kaciga BK-R je balistička kaciga izrađena od visokokvalitetnih aramidnih vlakana ili UHMWPE (polietilen ultravisoke molekularne težine). Dizajnirana je sa izraženim ušima koje omogućavaju stavljanje raznih dodataka kao što su slušalice i prednjom usnom, te osigurava maksimalnu fleksibilnost i udobnost.



Slika 11. Kaciga BK-R [7]

#### 2.4.5. Kacige BK-3 i BK-4

Kacige BK-3 i BK-4 su osnovni modeli kaciga izrađeni od visokokvalitetnih aramidnih vlakna ili UHMWPE (polietilen ultravisoke molekularne težine).



Slika 12. Kacige BK-3 i BK-4 [7]

#### 2.4.6. Kaciga BK-ACH

Kaciga BK-ACH (engl. *Advanced Combat Helmet*) moderna je balistička kaciga za vojsku i može se usporediti s modelima američke napredne vojne kacige proizvođača kao što su Team Wendy i Revision-military. Izrađena je od visokokvalitetnih aramidnih vlakna ili UHMWPE (polietilen ultravisoke molekularne težine) i dizajnirana kako bi osigurala maksimalnu fleksibilnost, udobnost i vrlo malo traumatu.



Slika 13. Kaciga BK-ACH [7]

#### 2.4.7. Ostali proizvodi

Osim vojnih kaciga, u prodaji su i zaštitne kacige za civile, HGSS, vatrogasce, hitnu pomoć i policiju (Slika 14.).



**Slika 14. Kaciga PK-RIOT-I [7]**

Uz izradu kaciga, tvrtka Šestan-Busch proizvodi i zaštitne prsluke (Slika 15.).



**Slika 15. Prsluk COVERT VEST C540 MOLLE [7]**

## **2.5. Konkurencija**

Dvije najveće i najpoznatije tvrtke koje se bave proizvodnjom vojnih kaciga jesu Team Wendy i Revision Military. Od ostalih konkurentnih tvrtki mogu se spomenuti još Future-safety, Busch-protective te Gentex-corp.

### **2.5.1. Team Wendy**

Team Wendy [8] je tvrtka smještena u Clevelandu, u Sjedinjenim Američkim državama. Osnovana je kao proizvođač skijaških kaciga, ali je s vremenom prerasla u jednog od većih proizvođača vojnih kaciga.

Uz vojne kacige još proizvode i civilne kacige za policiju i službe spašavanja.

Njihova najprodavanija kaciga je Exfil Ballistic SL (Slika 16.) koja dolazi u više verzija te je, kao i većina kaciga, modularna što se tiče dodavanja raznih dodataka na nju.



**Slika 16. Kaciga Exfil Ballistic SL [8]**



Exfil SAR Tactical (Slika 17.) nije balistička kaciga, već služi za službe spašavanja. Ovdje se može uočiti da tvrtka, iako se pretežno bavi proizvodnjom vojnih balističkih kaciga, proizvodi i civilne kacige. Premda je vojno tržište možda i najjače na svijetu, uvijek je pozitivno i dobro imati proizvodnju i u drugim granama industrije koja se bavi zaštitom glave.



**Slika 17. Kaciga Exfil SAR Tactical [8]**

### ***2.5.1. Revision-military***

Tvrtka Revision Military [9] također je jedan od glavnih konkurenata u proizvodnji vojnih kaciga. Zanimljivo je da se oni bave proizvodnjom samo vojnih i taktičkih kaciga te da se nisu okušali u proizvodnji civilnih kaciga kao što to rade druge tvrtke.

Njihova najprodavanija kaciga je Caiman Ballistic (Slika 18.).



Slika 18. Kaciga Caiman Ballistic [9]

Na temelju svega iznijetoga, **može se zaključiti** da konkurencija na tržištu svakako postoji, te posebno, **da postoje izražene sličnosti između pojedinih kaciga različitih proizvođača, što upućuje na to da su male razlike između najboljih kaciga koje su danas na tržištu.**

### 3. PROIZVODNI PROCES IZRADE VOJNE KACIGE

Sljedeći dio rada prikazuje proizvodni proces izrade zaštitne kacige BK-ACH (Borbena kaciga – engl. *Advanced Combat Helmet*).



**Slika 19. Kaciga BK-ACH [7]**

Proizvodni pogon tvrtke Šetan-Busch ima kapacitete za izradu gotovo svih potrebnih dijelova kacige.

U prilogu se nalazi slika tlocrta proizvodnog pogona (Prilog 1.). Zbog dobre organizacije rada i prostora proizvodnog pogona, u proizvodnji se bilježe odlični rezultati.

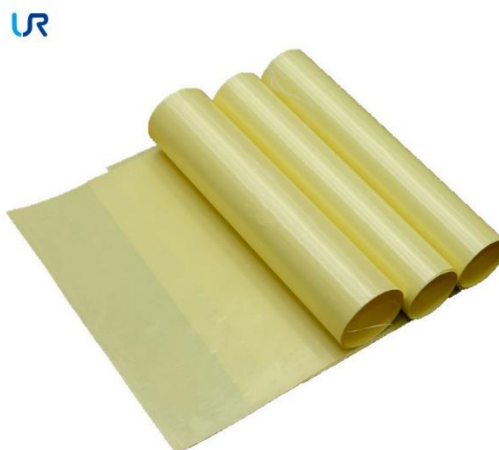
Blizina pojedinih strojeva (odjela) u procesu izrade kacige koji slijede jedan nakon drugoga čine izradu kaciga efikasnijom i bržom. Tablica 1. prikazuje procese u proizvodnji jedne takve kacige te približna vremena trajanja pojedinih procesa.

**Tablica 1. Postupci u procesu izrade kacige ACH**

<b>PROCES</b>
Obrada kevlara
Prešanje
Balističko ispitivanje
Bojenje
Montaža

### 3.1. Obrada kevlara

Kevlar koji se koristi u izradi kacige kupuje se u velikim balama (Slika 20.).



**Slika 20. Bala tkanine kevlara [5]**

Takav kevlar laserski se reže na oblike koji su potrebni za daljnju obradu. Odrezani listovi kevlara su pravokutnog i kružnog oblika. Kaciga dolazi u četiri veličine: S, M, L i XL, pa se stoga dimenzije odrezanih dijelova razlikuju ovisno o veličini zaštitne kacige.

Pravokutni dijelovi koji su odrezani, daljnjom obradom se spajaju sitnim plastičnim koncem u poseban oblik.

Izrezani dijelovi odlaze na daljnju obradu koja se naziva predformiranje. Kod predformiranja kevlar se stavlja u kalup.

Uz te preinake, odabrati se može i pokrivenost ušiju kod kacige, koja može biti potpuna, djelomična ili bez pokrivenih ušiju (Slika 21.). Pokrivenost ušiju ovisi o potrebi pojedine kacige. Ukoliko na kacigu dolaze dodaci (na primjer slušalice) kojima će smetati dio kacige odabire se kaciga s manjom pokrivenošću. Pokrivenost također određuju i vremenske prilike te vrsta terena na kojem će se koristiti.



**Slika 21. Pokrivenost ušiju kod BK-ACH zaštitne kacige [7]**

### 3.2. Prešanje

Nakon predformiranja, da bi se tkanine spojile i čvršće zalijepile jedna za drugu, kacige se prešaju pod velikim tlakom i povišenom temperaturom.

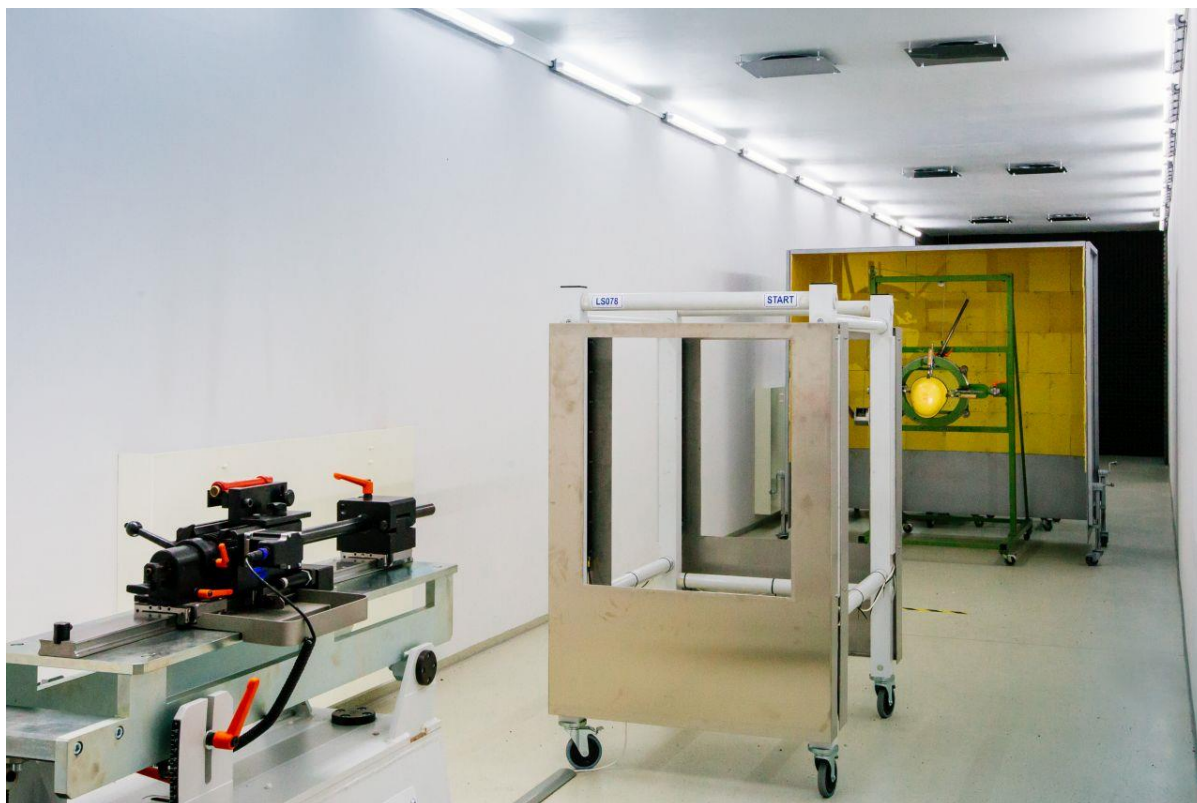
Prešanje je ujedno i najduži postupak u cijelom ciklusu izrade kacige (Slika 22.)



Slika 22. Strojevi za prešanje kaciga [7]

### 3.3. Balističko ispitivanje

Nakon prešanja, zaštitna kaciga odlazi na ispitivanje balističkih svojstava u ispitni laboratorij (Slika 23.).



Slika 23. Ispitni laboratorij [7]

Ovisno o balističkoj zaštiti koja je potrebna za pojedinu zaštitnu kacigu, balistička ispitivanja se vrše uporabom više vrsta metaka i brzina koje su određene za pojedinu razinu zaštite (Tablica 2.). Streljivo se ispaljuje iz posebnog stroja koji zamjenjuje oružje. Takav stroj može ispaljivati bilo koji metak trenutno proizveden i znan u svijetu naoružanja.

Ispitivanja se vrše prema normama: STANAG 2920/MIL STD 662F V50 STANDARD, NIJ Standard 0106.01, VPAM te GOST.

Norma NIJ je najbitnija što se tiče balističke zaštite. Stoga, ako kaciga zadovolji tu normu, spremna je za daljnje korake u izradi (a kasnije i za prodaju). Kacige se bez certifikata o balističkoj zaštiti ne mogu prodavati.

**Tablica 2. Norma NIJ za balističko ispitivanje kaciga**

<b>Razina zaštite</b>	<b>Vrsta testiranog metka</b>	<b>Masa metka, g</b>	<b>Brzina metka, m/s</b>	<b>Maksimalna unutarnja deformacija, mm</b>
<b>I</b>	,22 Caliber LR LRN	2,6	329	44
	,380 ACP FMJ RN	6,2	322	
<b>IIA</b>	9 mm FMJ RN	8,0	341	44
	40 S&W FMJ	1,7	322	
<b>II</b>	9 mm FMJ RN	8,0	367	44
	357 Mag JSP	10,2	436	
<b>IIIA</b>	9 mm FMJ RN	8,2	436	44
	44 Mg SJHP	15,6	436	
<b>III</b>	7,62 mm NATO FMJ	9,6	847	44
<b>IV</b>	,30 Caliber M2 AP	10,8	878	44



Slika 24. prikazuje kacigu na kojoj se provelo balističko ispitivanje. Na kacigi su vidljive rupe udara metka te njegovi ostaci i fragmenti u kacigi.



**Slika 24. Ispitni primjerak zaštitne kacige**

### **3.4. Bojenje**

Nakon obrađene balistike na nekoliko kaciga, ako se zadovoljio balistički test slijedi bojenje kacige u željenu boju i uzorak.

Na početku se stavlja temeljna boja koja pokrije žutozlatni sjaj kevlara. Temeljna boja služi i za primanje konačne boje na pravi način te da se dobije boja koju je kupac zatražio. Nakon temeljne boje, kaciga se boji u željenu boju ili uzorak. Postoji više načina bojenja kaciga, a jedan od popularnijih u novije doba je *Hydro dip* bojenje kod kojeg se boje prelijevaju iz jedne u drugu i povećavaju mogućnost kamuflaže koja je u vojnim sukobima vrlo bitna.

### 3.5. Montaža

Nakon bojenja slijedi montaža ostalih dijelova koji dolaze na kacigu. Montaža je ujedno i posljednja faza izrade kacige.

Kod montaže montiraju se dijelovi za apsorpciju udarca u glavu u koju spadaju SHOTECK ili spužva, zatim podbradni dio za regulaciju te zatiljni dio za regulaciju. Uz tu standardnu opremu, na kacigu se mogu montirati i vizir te adapteri (prilagodnici) za razne dodatke kao što su svjetla, dodaci za noćnu viziju, gas-masku i slično.

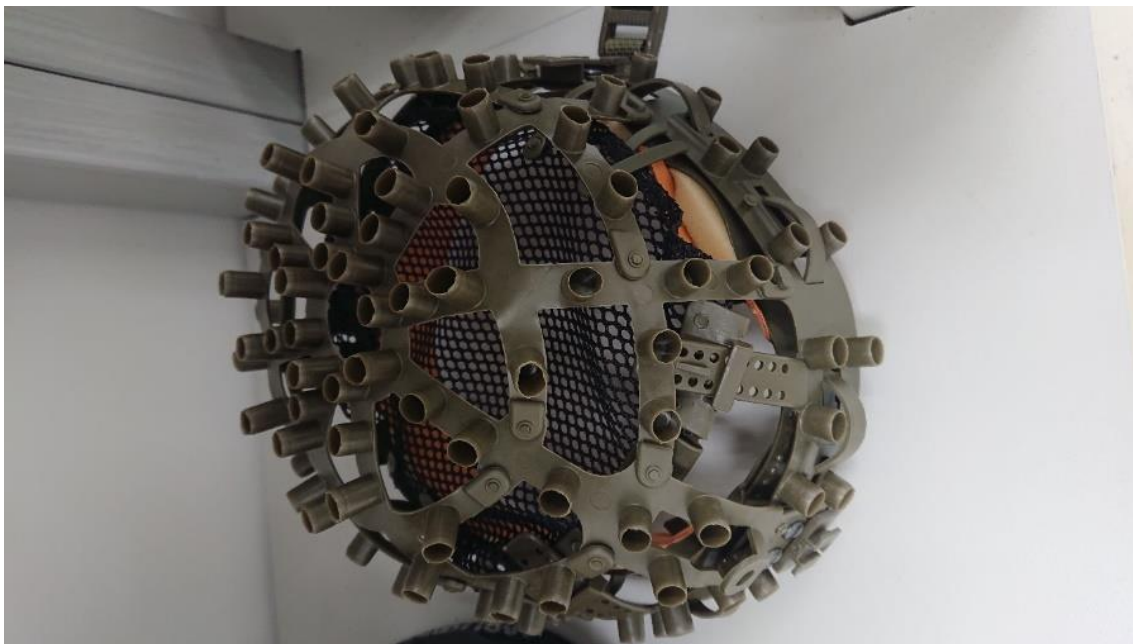
#### 3.5.1. Dijelovi za apsorpciju udarca

Unutarnja oprema SHOTECK (Slika 25.) nastala je kao rezultat višegodišnjeg istraživanja i usavršavanja provedenog u tvrtki Šestan-Busch. Konačni rezultat tog procesa je unutarnja oprema za balističke kacige s odličnim svojstvima ne samo na području apsorpcije energije udara projektila, već i na području ugone nošenja i vjetrenja kacige, odlične veze kacige i glave korisnika, kao i mogućnosti višestrukog podešavanja.



Slika 25. Unutarnja oprema SHOTECK [7]

Glavna značajka opreme SHOTEK je njena geometrija (Slika 26.). Naime, po vanjskoj površini opreme (strana koja je u dodiru s unutarnjom površinom kalote) raspoređeni su po posebnom rasporedu elementi koji prilikom udara projektila svojim deformiranjem apsorbiraju energiju udara, te se samo mali dio te energije prenosi na vrat korisnika kacige.



**Slika 26. Unutarnja oprema SHOTECK**

Važna karakteristika opreme SHOTECKa je i nesmetano korištenje komunikacijske opreme.

Dijelovi koji dolaze u montaži uz SHOTECK su i mrežica za glavu te koža za udobnije prislanjanje SHOTECKA na glavu. Sam SHOTECK se brizga u vlastitom pogonu pa su troškovi za izradu niži, također se u pogonu i šiva mrežica za glavu

Drugi oblik apsorpcije udarca na glavu su jednostavnije spužvice (Slika 27.) koje se oblikuju po potrebi kacige i same veličine kacige te se spajaju pomoću čička.



**Slika 27. Unutarnja oprema – spužvice**

### 3.5.2. Regulacija podbradnog i zatiljnog dijela

Dio za regulaciju (Slika 28.) izrađuje se od traka poliamida 16 i samostalno brizganih kopči i okica koje spajaju te trake.

Duljina traka ovisi o veličini kacige te je za svaku od veličina S, M, L te XL različita. Jedini dio koji se nabavlja od kooperanata je mehanizam BOA za stezanje zatiljnoga dijela.



Slika 28. Dio za regulaciju podbratnog i zatiljnog dijela [7]

Ti dijelovi se na kacigu spajaju vijčanjem što je ujedno i jedini dio kacige na kojem se koriste vijci. Vijci se dijelom izrađuju na CNC tokarilici u samoj tvrtki, a dijelom nabavljaju od vanjskih kooperanata.

Slika 29. prikazuje konačni izgled unutrašnjeg dijela kacige nakon montaže obaveznih dijelova (spužvica te podbradna i zatiljna traka).



**Slika 29. Unutrašnji dio kacige nakon montaže**

### 3.5.3. Dodatna oprema

Uza standardnu opremu, na kacigu mogu doći i dodaci kao što je vizir koji se naručuje te montira na zaštitnu kacigu prema želji kupaca. Vizir mora imati jednaku balističku zaštitu kao i kaciga, stoga se i sam vizir ispituje u ispitnome laboratoriju zajedno s kacigom (Slika 30.).



Slika 30. Ispitani vizir

Na kacigu mogu se postaviti i adapteri (Slika 31. i Slika 32.) koji služe za dodavanje razne dodatne opreme (laseri, noćna svjetla itd.) koju kupac samostalno može montirati na kacigu.



Slika 31. Adapteri za kacigu [7]



Slika 32. Prednji adapter za kacigu [7]



Završenom montažom dobiva se željena kaciga (Slika 33.) koju je kupac izabrao i koja ima traženi balistički standard.



**Slika 33. Personalizirana kaciga BK-ACH s adapterima za dodatnu opremu**

## 4. PROJEKT MULTIFUNKCIONALNE ZAŠTITNE KACIGE

### 4.1. EU projekt

Tvrtka Šestan-Busch posljednjih nekoliko godina povećala je svoj obujam posla nekoliko puta te se kontinuirano širi. Samim širenjem pokušavaju ostati u koraku s ostalim proizvođačima zaštitnih kaciga te su u stalnom dodiru s novim tehnologijama i procesima. Širenjem tvrtke i pogledom prema budućnosti u planove sve više dolaze i različiti novi proizvodi koji bi upotpunili asortiman proizvoda tvrtke. Najnoviji projekt na kojem tvrtka radi je *Multifunkcionalna zaštitna kaciga*. Projekt je sufinanciran sredstvima europskih fondova. Multifunkcionalna zaštitna kaciga otvorila bi dodatan, novi smjer u poslovanju tvrtke kojim bi ona proširila svoj utjecaj na nova tržišta.

Smisao projekta je razviti novi proizvod, modernu multifunkcionalnu zaštitnu kacigu visokih tehnoloških karakteristika koja primarno cilja na civilno tržište osobne zaštitne opreme, dok određena znanja i spoznaje mogu biti korišteni i u daljnjem razvoju protubalističkih kaciga.

Multifunkcionalna kaciga predviđena je kao kaciga koja bi se mogla koristiti u mnoge svrhe. Primarni cilj kacige je zadovoljavanje zahtjeva taktičkih trening kaciga za vojsku i policiju, (takva kaciga ne mora imati balistička svojstva). Nakon zadovoljenih zahtjeva za taktičku kacigu, kacigom će se pokušati zadovoljiti potrebe za kacigama i u ostalim djelatnostima kao što su službe spašavanja, hitne pomoći, vatrogastva i industrijske radne kacige.

### 4.2. Istraživanje

Projekt je započeo istraživanjem tržišta kacige, konkurencije, materijala, proizvodnje i ostalih važnih stvari koje je potrebno znati prije samog početka razvoja kacige.

### **4.3. Tržište, količine i norme**

Kako se tržište vojnom opremom sve više širi i javljaju se nove inovacije, tako se i proizvodne količine povećavaju. Modularnost kaciga sve je veća te se sa svakom narudžbom povećavaju opcije koje se dodaju na kacigu, u što spadaju razni dodaci, navlake, različiti vijčani spojevi i drugo. Zbog toga, potrebna je dobra organizacija posla i povezanost među radnikima te različitim proizvodnim procesima.

Multifunkcionalna zaštitna kaciga okrenula bi se civilnom tržištu, točnije službama spašavanja, vatrogascima te hitnoj službi, ali kao primarno tržište imala bi policiju i vojsku kojoj bi se nudila kao taktička kaciga za vježbe i trening.

Tržište zaštitnih kaciga u Hrvatskoj nije veliko, što znači da bi se tvrtka i ovim projektom većim dijelom okrenula prema europskom i svjetskom tržištu.

### **4.4. Konkurencija**

U ranijem dijelu rada spomenut je proizvođač Team Wendy koji uz balističke zaštitne kacige također ima u ponudi i taktičke civilne kacige. Kako je spomenuto, multifunkcionalna zaštitna kaciga primarno će biti okrenuta vojnoj uporabi, ali i kao taktička kaciga za trening. Samim time jedan od glavnih konkurenata je Team Wendyjeva kaciga Exfil SAR Tactical (Slika 17.).

Od taktičkih kaciga vrijedi još spomenuti i taktičke kacige tvrtke Future-saftey, pod nazivom Cougar Tactical (Slika 34.) te kacigu Tactical hero tvrtke Busch-protective (Slika 35.).



**Slika 34. Kaciga Cougar Tactical [24]**



**Slika 35. Kaciga Tactical Hero [25]**

Osim taktičkih zaštitnih kaciga, **na tržištu** postoji i nekoliko višenamjenskih kaciga za industrijsku primjenu te primjenu u službama spašavanja, vatrogastva i hitnoj službi. Međutim, **ne postoji kaciga koja bi se objedinila kao taktička kaciga i kaciga za ostale navedene poslove.** Upravo takvoj kacigi, koja bi objedinila sva ta zanimanja, teži se u Šestan-Buschu.

Naime, tvrtka Pacific [10], koja se navise bavi izradom vatrogasnih kaciga u ponudi ima i više namjensku kacigu Dominator (Slika 36.), koja se uz vatrogasnu uporabu preporuča i za korištenje u službama za spašavanje, hitnim službama, te u nekim industrijskim uvjetima.



Slika 36. Kaciga Dominator [10]

Također kao konkurenciju višenamjenskoj kacigi vrijedi spomenuti i Skylotecovu kacigu Inceptor GRX (Slika 37.) koja je prvenstveno industrijska kaciga, ali može se koristiti i u službama spašavanja te kao planinarska kaciga za civile. [11]



Slika 37. Inceptor GRX [11]

Posljednja će se spomenuti kaciga Manta SAR (Slika 38.) koja ima vrlo širok opseg različitih područja u kojem može služiti kao zaštitna kaciga. Neka od područja su hitne službe, vatrogasci, vožnja QUAD vozilima, industrijska zaštita i još nekoliko drugih područja.



Slika 38. Manta SAR [26]

Zaključno, ponuda na tržištu multifunkcionalnih kaciga nije velika tako da bi se multifunkcionalna zaštitna kaciga tvrtke Šestan-Busch, ako ispuni sve zahtjeve, mogla probiti na šire tržište svojim novim proizvodom.

#### 4.5. Materijal

Na temelju znanja i iskustva koje posjeduje i dosadašnjim radom u proizvodnji kaciga, u tvrtki je odlučeno da će se kaciga izrađivati od karbonskih vlakana (Slika 39.).



Slika 39. Karbonska vlakna [12]

Karbonska vlakna, vlakna koja sadrže najmanje 90% ugljika, vrlo su fina, većinom kružnog presjeka, promjera od 5 do 10  $\mu\text{m}$  i svojstvene crne boje.

Dobivaju se iz već oblikovanih drugih organskih vlakana, pretežno poliakrilonitrilnih vlakana velike čvrstoće, a u manjoj mjeri i od celuloznih viskoznih vlakana te iz smolastog ostatka pirolize nafte (tzv. mezofazna smola). Neovisno o vrsti ishodišnjoga materijala, proces dobivanja provodi se termičkom obradom u nekoliko stupnjeva (predobrada i karbonizacija). U njemu se pod strogo definiranim uvjetima i procesnim parametrima iz početnoga materijala postupno uklanjaju svi kemijski elementi osim ugljika, uz njegovu istodobnu postupnu ciklizaciju. Kod proizvodnje grafitnih vlakana, u završnoj se obradbi ciklička struktura ugljika grafitiranjem oblikuje u grafitnu.

Općenito su za karbonska vlakna karakteristična sljedeća svojstva: velika čvrstoća (od 3000 do 5000 N/mm<sup>2</sup>) i velik modul elastičnosti (kod grafitnih vlakana od 200 000 do 450 000 N/mm<sup>2</sup>), velika krutost, razmjerno mala gustoća u odnosu na metalne niti (od 1,5 do 2,2 g/cm<sup>3</sup>), izvrsna otpornost na toplinu uz istodobnu stabilnost dimenzija (termički raspad u području od 3600 do 4000°C), veoma slaba gorivost, kemijska inertnost, nekorozivnost, otpornost na kiseline, lužine i organska otapala, dobra toplinska i električna vodljivost, nemagnetičnost, vrlo mala apsorpcija rendgenskih zraka, neupijanje vlage i izvrsna biokompatibilnost. [13] Tablica 3. prikazuje usporedbu karbonskih vlakana s često korištenim aramidnim i staklenim vlaknima.

**Tablica 3. Usporedba vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i gustoće ugljičnih, aramidnih i staklenih vlakana [12]**

Materijal	Vlačna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti, N/mm <sup>2</sup>	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>
Karbonska vlakna	3600	966 000	1,80
Aramidna vlakna	3500	179 000	1,47
Staklena vlakna	3400	69 000	2,15

Neka od područja primjene su u avioindustriji, vojni i civilni zrakoplovi, helikopteri, motori, propeleri, antene, svemirske letjelice, u pomorskoj industriji za jahte i podmornice, u automobilskoj industriji, u autobusima, tramvajima, vlakovima, robotskim rukama (Slika 40.).



**Slika 40. Primjer karbonskih vlakana u autoindustriji [12]**



## 4.6. Proizvodnja multifunkcionalne zaštitne kacige

### 4.6.1. Vakuumska infuzija

Proizvodni postupak kojim će se izrađivati multifunkcionalne zaštitne kacige je vakuumska infuzija.

Vakuumska infuzija je tehnika koja koristi vakuum za uvođenje smole u laminat. Materijali ojačanja (vlakna) se suha polažu u kalup, a vakuum se postiže prije uvođenja smole. Po postizanju potpunog vakuuma, smola se doslovno usisa u vlakna kroz pažljivo postavljene cjevovode. Ova je metoda, za razliku od ručnog laminiranja, poboljšana time što se korištenjem vakuuma isisao višak smole iz laminata te je tako poboljšan odnos količine vlakana i smole, a rezultat je lakši i čvršći proizvod. Također se za 90% smanjuje isparavanje otapala i emisija prašine, čime je ova metoda i ekološki prihvatljivija. Svaki proces koji koristi tlak niži od atmosferskog za uvođenje smole u laminat je VIP (engl. *Vacuum Infusion Process*), a proces koji koristi tlak viši od atmosferskog za uvođenje smole je RTM (engl. *Resin Transfer Molding*).

#### **Vakumska infuzija nudi brojna poboljšanja u odnosu na tradicionalno ručno laminiranje:**

- bolji omjer vlakana i smole,
- manji utrošak smole,
- vrlo jednoličnu količinu dodane smole,
- neograničeno vrijeme postavljanja,
- čistija i ekološki prihvatljivija metoda,
- lakši proizvod poboljšane čvrstoće.

Vakuumska infuzija osigurava bolji omjer ojačanja i smole. Tipično ručno laminiranje rezultira viškom smole od 100% prema težini vlakana. Teoretski, u ovom postupku nema viška smole. Smola je sama po sebi vrlo krhka, tako da će svaki višak oslabiti proizvod. Vakuum će ukloniti veći dio, ali količina istisnute smole će ovisiti o raznim faktorima kao što su vrsta materijala ojačanja, sastav smole, vrijeme i slično. Vakuumska infuzija ima drugačiji pristup, tj. vakuum je postignut dok su vlakna još suha.

Za razliku od ručnog laminiranja, ne odvodi višak smole, već započinje bez smole koja se tokom procesa uvuče unutar materijala ojačanja, a svaki će višak smole koji je uveden na kraju biti isisan van kroz vakuumske cijevi. Rezultat je da je u laminat uvedena samo minimalna količina smole, a to znatno smanjuje težinu, povećava čvrstoću i maksimizira svojstva vlakana i smole. Zbog prirode vakuumske infuzije upotreba smole postaje predvidljiva, dok u standardnom laminiranju količina smole u laminatu varira ovisno o ljudskom faktoru. Čak i kod izrade velikih proizvoda, količina upotrijebljene smole će biti predvidljivo jednaka kod ponavljanih procesa te je rezultat manja količina potrošene smole. Konačni rezultat je, što je još bitnije, manje utrošenog novca. Još jedan važan faktor, tj. prednost vakuumske infuzije je vrijeme. Čest problem koji se javlja kod laminiranja je vremenski faktor. Mnogo smola ima vrijeme zgušnjavanja oko 30 minuta, iako ima pojedinih, kao što su neke Epoxy smole, koje omogućuju rad i do dva sata. Unatoč tome, to vremensko ograničenje može biti jako kritično kod isisavanja viška smole korištenjem vakuuma. Veliki projekti laminiranja lako mogu dostići granicu od dva sata pa čak i manji, naizgled jednostavniji projekti mogu izmaći kontroli kad se zbog zgušnjavanja zablokira vakuumski vod. Također, količina istisnute smole može od dijela do dijela varirati ovisno i o tome kada je istiskivanje započelo. Vakuumska infuzija nudi neograničeno vrijeme postavljanja materijala ojačanja. Kada su svi slojevi složeni, izvodi se mogu postaviti na potrebna mjesta. Ako nešto nije sjelo na svoje mjesto, vakuum se može otpustiti i ponovo namjestiti pomaknuto. Zbog toga su promjene i popravci u slaganju mogući sve do trenutka uvođenja smole.

Konačno, ponovno treba istaknuti da je vakuumska infuzija mnogo čistiji proces. Mnogo su manja i zagađenja nastala isparavanjem smole jer je jedino isparavanje moguće iz spremnika smole. Vakuumska infuzija, dakle, nudi čistiji, sigurniji i ugodniji radni okoliš, iako je i u ovom procesu važno da se radi u dobro ventiliranom prostoru.

#### 4.6.2. Nedostaci vakuumske infuzije

Kao i bilo koji proces laminiranja, vakuumska infuzija ima i svojih nedostataka. Za vakuumsku infuziju treba imati na umu da je to metoda:

- kompliciranog postavljanja predmeta rada u kalup,
- za koju **još nisu sasvim poznati specifični tehnološki parametri procesa**, što može voditi do lakog uništavanja odljevka, odnosno potrebe za eksperimentiranjem – učenjem na osnovi pokušaja i pogrešaka da bi se steklo neopohodno znanje i iskustvo za postavljanje **stabilnog izradbenog postupka kacige**.

Kod eksperimenata, vrijeme postavljanja opreme za vakuumsku infuziju nije ograničeno. Vakuumska infuzija zahtijeva, ne samo vakuumske cjevovode, nego i uvode za smolu, kao i produžetke tih cjevovoda unutar vakuumskog omota. Postavljanje ovih cjevovoda za vakuum i smolu varira ovisno o vrsti kacige pa ne postoji jedan univerzalni način postavljanja te to mora biti procijenjeno prije postavljanja. Problemi koji se mogu pojaviti kada infuzija započne je mogući ulazak zraka u cjevovode za dovod smole. To će vjerojatno rezultirati gomilanjem smole, nenatapanjem ili čak potpunim zaustavljanjem toka smole. Iako naravno ima nekih slučajeva gdje se greška može ispraviti, no ne treba s tim računati. Najbolja zaštita od pogreške je pažljivo planiranje. S obzirom na kompleksnost postavljanja i mogućnosti greške treba pratiti protok smole. Potrebno je odrediti gdje smola teže ili nikako ne protječe te pronaći način za dovesti je do problematičnih mjesta.

#### 4.6.3. Proces vakuumske infuzije

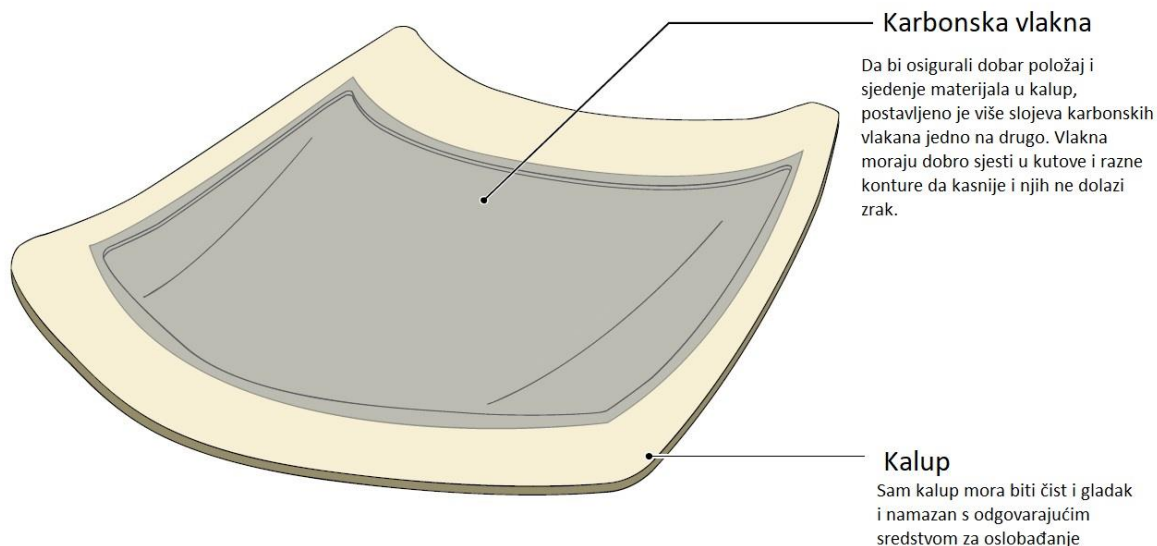
Osnovni princip metode je stvaranje podtlaka ispod vakuumskog omota. Podtlak se počinje stvarati pokretanjem vakuumske pumpe te ga je prije puštanja smole u sustav potrebno nadzirati kako bi se otkrilo eventualno propuštanje jer se stvoreni podtlak ispod omota mora održavati neprekinutim tijekom cijelog procesa infuzije. Nadzor se vrši uspoređivanjem vrijednosti koje daju tlakomjer na vakuumskoj pumpi i onaj ugrađen na vakuumski omot.

Provjera propuštanja vrši se i pomoću detektora propusnosti na svim spojevima vakuumske vreće i kalupa, na T-spojevima cjevovoda i usisnim spojevima vakuumskih cijevi koji moraju biti dobro zabrtvljeni. Ta provjera je vrlo važna jer podtlak omogućuje usisavanje i kretanje smole kroz vodič ispod omota, odnosno omogućuje realizaciju infuzijskog procesa. Željeni podtlak u sustavu je oko 0,7 bara te se mora održavati konstantnim u cijelom procesu infuzije. Kada se osigura nepropusnost u sustavu, počinje se sa otvaranjem ventila za usis smole iz spremnika sa kataliziranom smolom. Ventili se otvaraju postupno tako da se prvo otvori jedan, zatim kada smola iz spremnika dospije do njegovog usisa na vakuumskom omotu on se ponovo zatvara, a zatim se otvori drugi i ponovi postupak te tako za svaki od ugrađenih ventila. Otvaranjem ventila dolazi do smanjenja podtlaka ispod omota, stoga vakuumska crpka mora biti aktivna tijekom cijelog procesa. Kada su svi usisi ispunjeni smolom te kada je ponovo uspostavljen dovoljan vakuum, ponovno se otvore ventili i smola se krene širiti kroz cijevi i vodič te prodirati u slojeve ojačanja. Najčešće se kreće s otvaranjem ventila smještenih na najnižim dijelovima kalupa, a zatim redom po visini. Kako se katalizirana smola u spremniku prazni, tako se postupno mora dodavati nova jer u sustav nikako ne smije dospjeti niti najmanja količina zraka. Kada se smolom postupno ispuni cijeli objekt, svi ventili se zatvaraju čime je infuzijski proces završen, ali se podtlak nastavi održavati dok smola ne otvrdne. Za vrijeme otvrdnjavanja smole počinje se rastavljati sustav cijevi za opskrbu smolom. Nakon otvrdnjavanja smole skida se vakuumski omot i objekt se može izvaditi iz kalupa. U ovom procesu potreban je separator kako bi se vakuumska crpka zaštitila od viška smole koja biva usisana kroz usisnu cijev crpke. Separator se spaja na vakuumsku pumpu i na njega su spojene cijevi za odvod viška smole.

Sam proces infuzije traje relativno kratko (10-ak minuta), ali mnogo više vremena potrebno je za postavljanje ojačanja, sustava cjevovoda i vakuumskog omota. Bez obzira na to, ukupno vrijeme trajanja ovog procesa znatno je kraće od klasičnog ručnog postupka laminiranja.

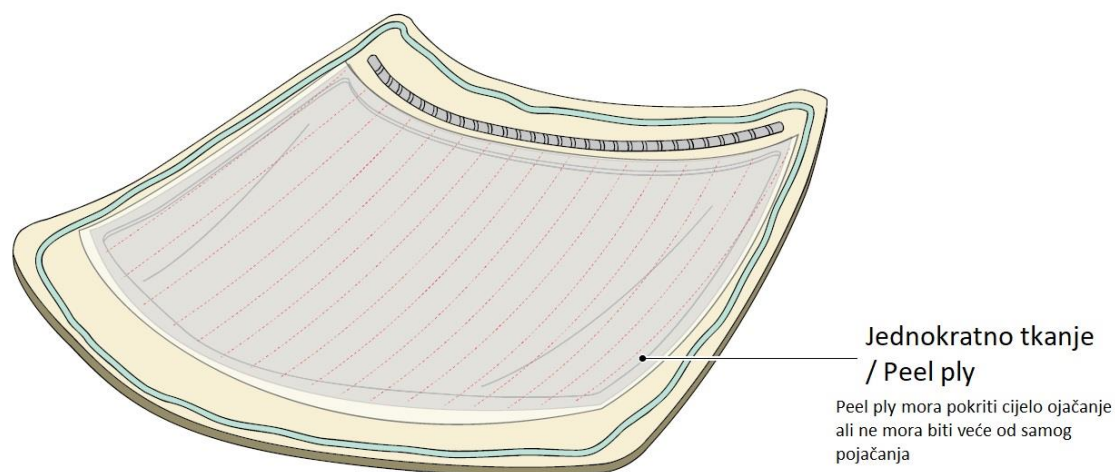
Na slikama 41. do 46. detaljno se prikazuje cijeli proces vakuumske infuzije.

Prvi korak vakuumske infuzije je priprema kalupa (Slika 41.), njegovo čišćenje i stavljanje odjeljivača. Potom se dodaju karbonska vlakna. Korištena karbonska vlakna nakon infuzije debljine su 0,17 mm pa se može orijentirati koliko slojeva treba staviti ovisno o željenoj debljini.



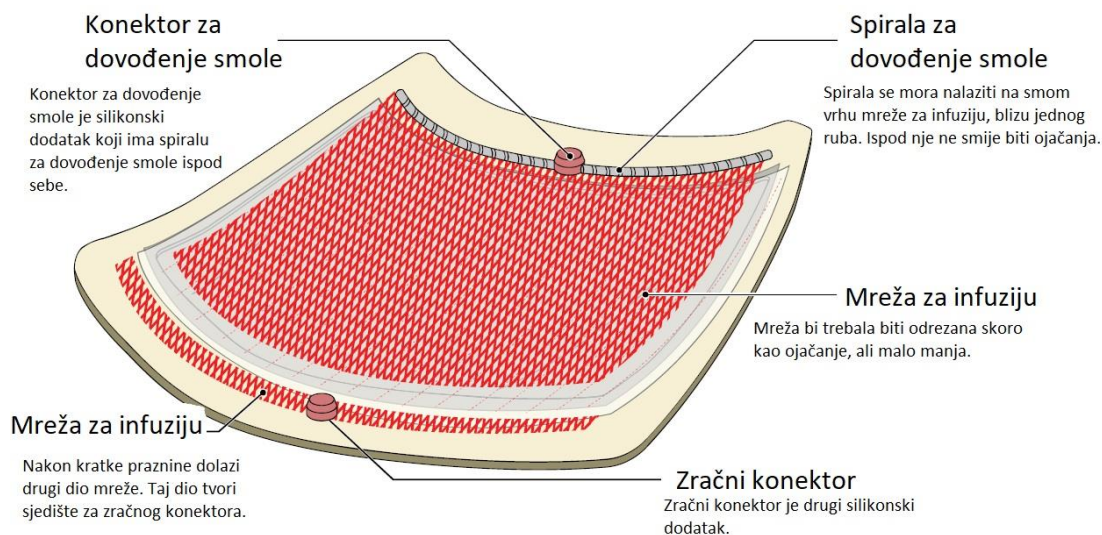
**Slika 41. Priprema kalupa te rezanje i pozicioniranje karbonskih vlakana**

Sljedeći korak je stavljanje tkanine *Peel-ply* (Slika 42.) koju se reže na nešto veće dimenzije od samog karbona jer ona služi za lakše odvajanje karbona od ostalih materijala potrebnih za proces vakuumske infuzije.



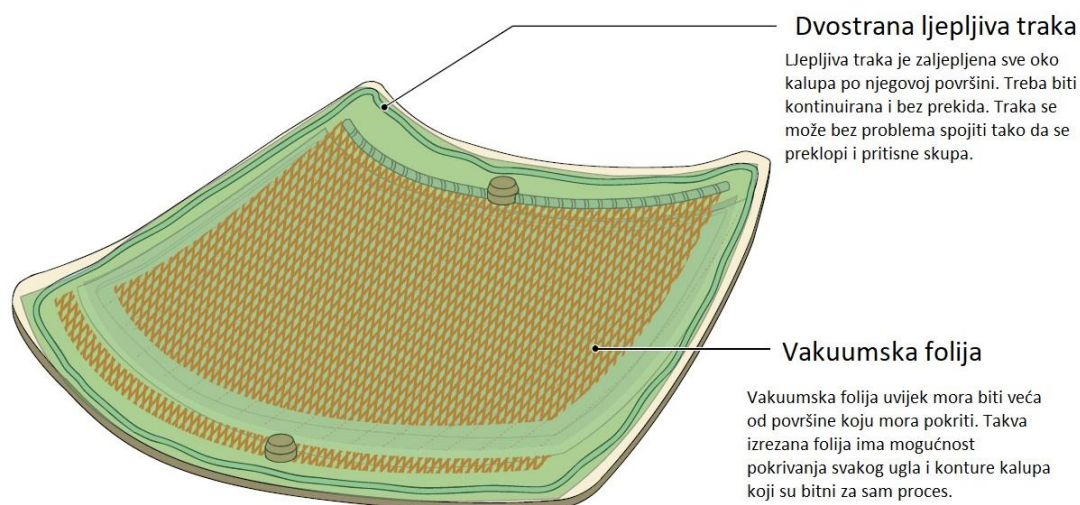
**Slika 42. Dodavanje sloja Peel-ply-a**

Istih dimenzija kao Peel-ply reže se i tkaninu za prolaz smole te ju se stavlja na Peel-ply tkaninu. Oko te tkanine stave se cijevi za prolaz smole i spoji ih se na konektore koji će se cijevima spajati na vakuumsku kanticu. (Slika 43.)



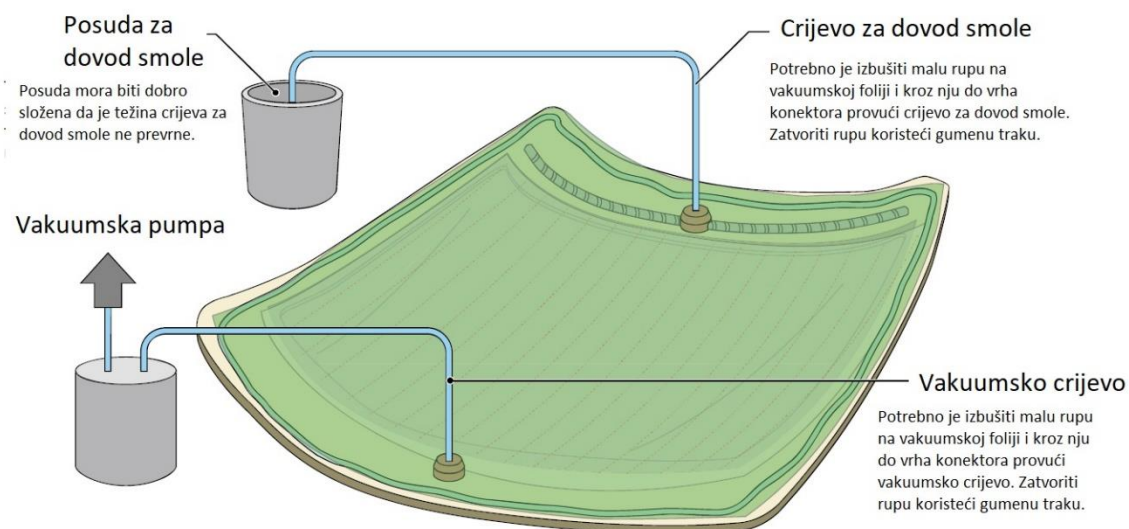
**Slika 43. Slaganje cijevi i tkanine za prolaz smole**

Vakuumska folija stavlja se sljedeća (Slika 44.). Ona mora biti većih dimenzija od prijašnjih tkanina jer njezina površina mora obuhvatiti sva izbočenja i udubine u kalupu nakon vakuumiranja. Lijepi se dvostrukom ljepljivom trakom.



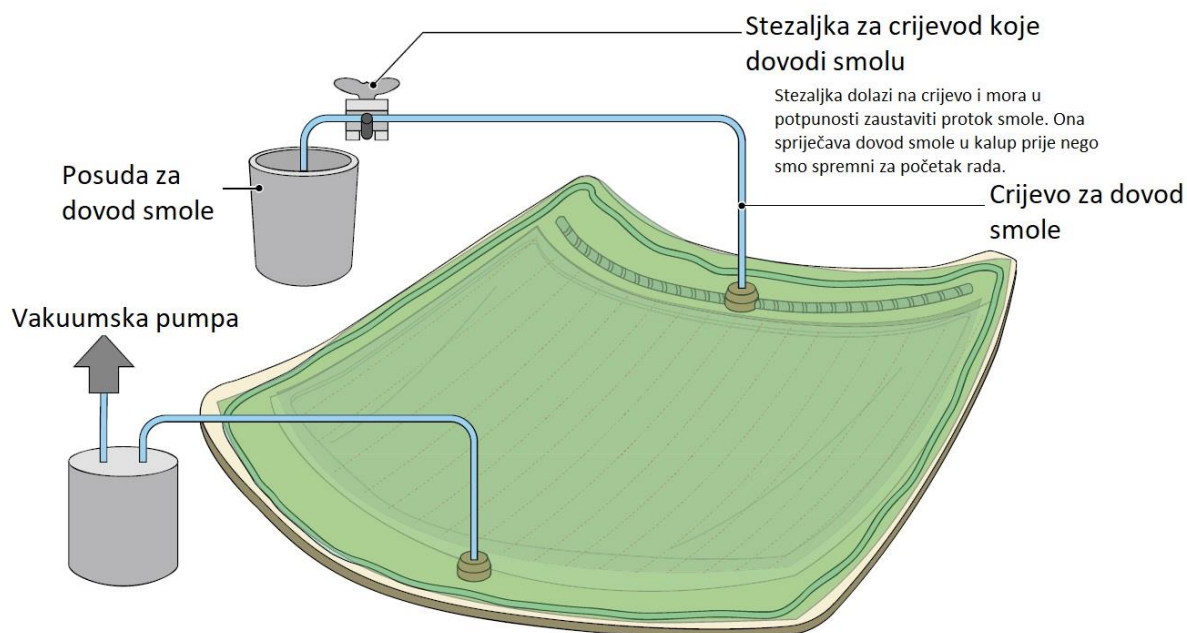
**Slika 44. Slaganje vakuumske folije**

Spaja se posuda za dovod smole te vakuumska posuda koja je spojena na vakuumsku pumpu, na vakuumsku foliju te se stezaljkama zatvora (Slika 45.).



**Slika 45.** Spajanje cijevima posudu za dovod smole te vakuumsku posudu na vakuusku foliju

Nakon zatvaranja cijevi sa stezaljkom potrebno je napraviti vakuum u kalupu preko vakuumske pumpe te potom pustiti smolu u proces (Slika 46.).



**Slika 46.** Završni izgled procesa vakuumske infuzije

#### 4.7. Faze razvoja prototipa kacige

Tablica 4. prikazuje faze razvoja multifunkcionalne zaštitne kacige i njihovo trajanje.

**Tablica 4. Faze razvoja prototipa Multifunkcionalne zaštitne kacige**

FAZA RAZVOJA
Modeliranje kacige
3D tiskanje
Modeliranje kalupa
Izrada kalupa
Vakuumska infuzija

##### 4.7.1. Modeliranje

Prvi korak razvoja je modeliranje kacige. Kod modeliranja kacige, dimenzija koja se uzela za sam model bila je standardna dimenzija XL veličine glave. Standardne dimenzije ostalih veličina glave prikazane su u tablici 5.

**Tablica 5. Veličine glava**

Veličina kacige	Opseg glave, cm
XS	53 do 54
S	55 do 56
M	57 do 58
L	59 do 60
XL	61 do 62

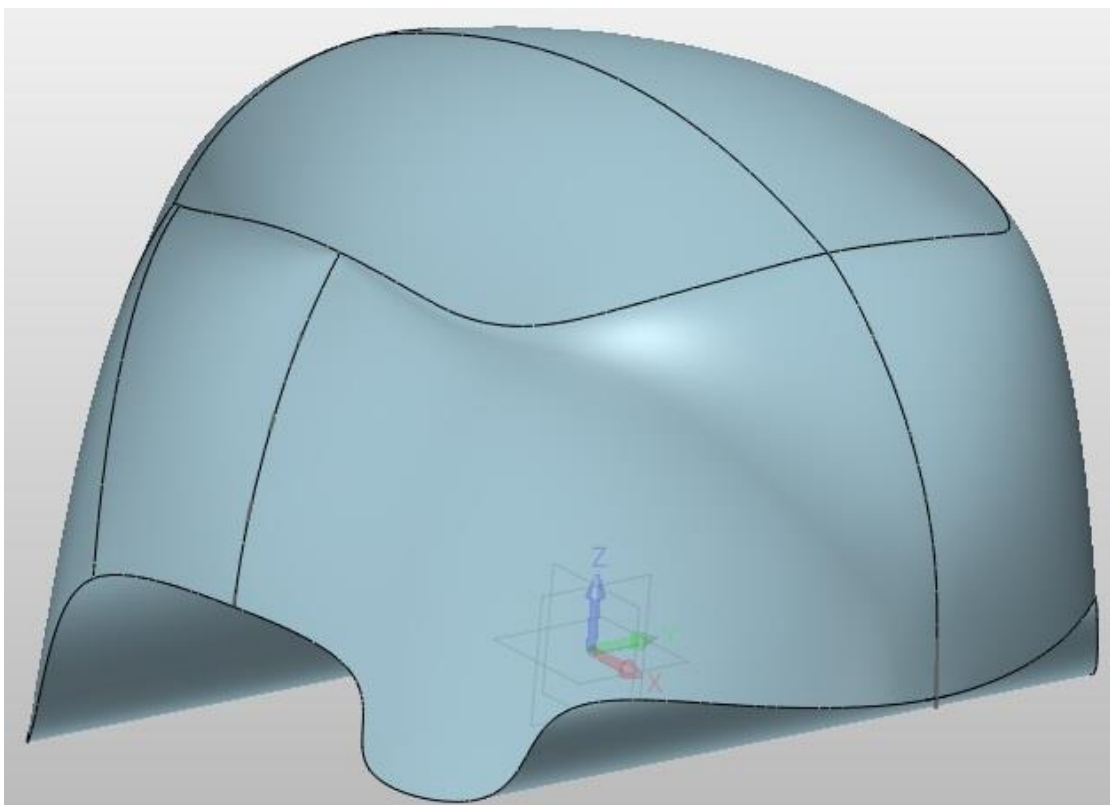
Kacige su modelirane u programu ZW3D. Program ZW3D je proizvod tvrtke ZWSOFT. ZWSOFT bavi se izradom CAD/CAM softverskih alata. Neki od drugih softverskih alata koji bi olakšali realizaciju kacige, odnosno olakšali odabir samog dizajna, a posebno, i najvažnije, osigurali što vjerodostojnije oblikovanje (modeliranje i simulaciju) kacige prema fizikalnim zakonitostima (engl. *real physics*), jest softver COMSOL [27].



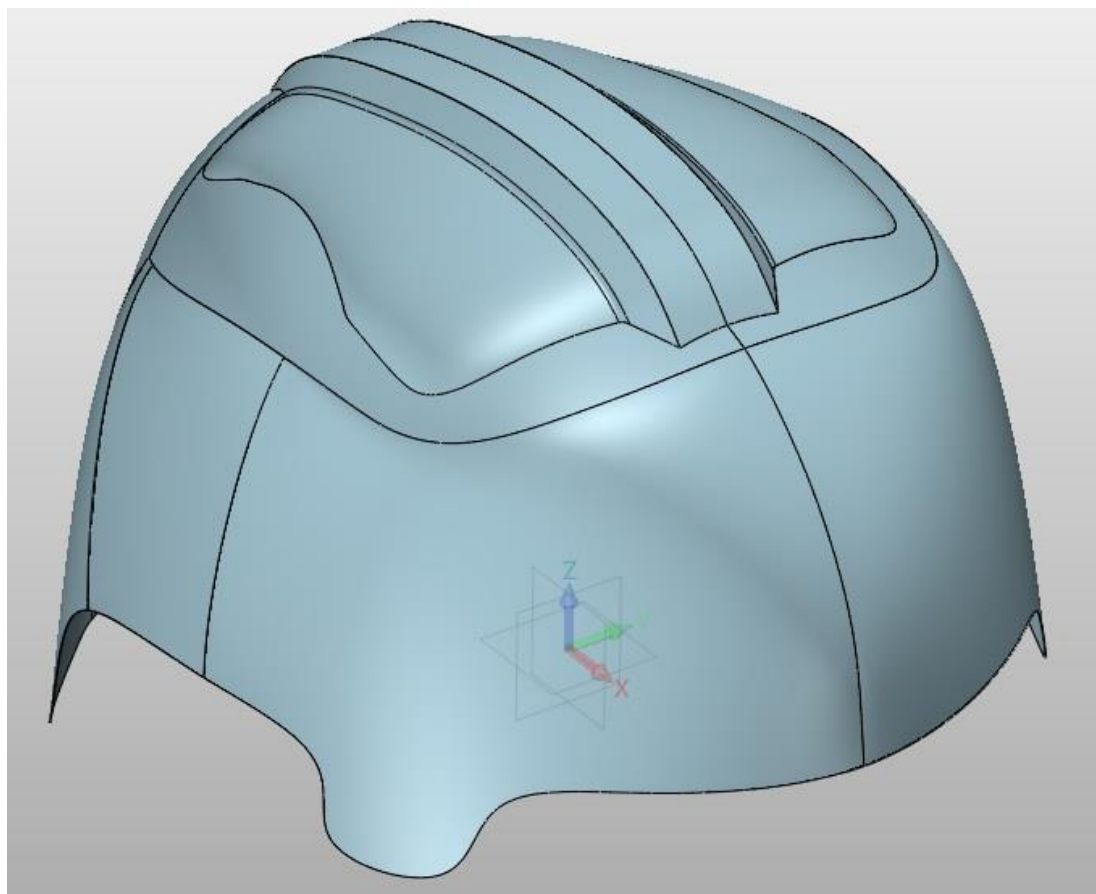
Slikama 47. do 52. prikazano je nekoliko načinjenih 3D modela kaciga. Zadatak je bio napraviti 10-ak verzija kacige te odabrati najbolju. Uz navedene slike u prilogu se nalazi i nekoliko tehničkih crteža kaciga (prilozi 2. do 8.).

Slika 47. prikazuje dizajn takozvane čiste kalote kacige koja je odabrana kao početna osnova drugim verzijama.

Slika 48. prikazuje jedan od odabranih modela u kojem je za 5 mm ojačan gornji dio kacige koji će povećati čvrstoću kacige.

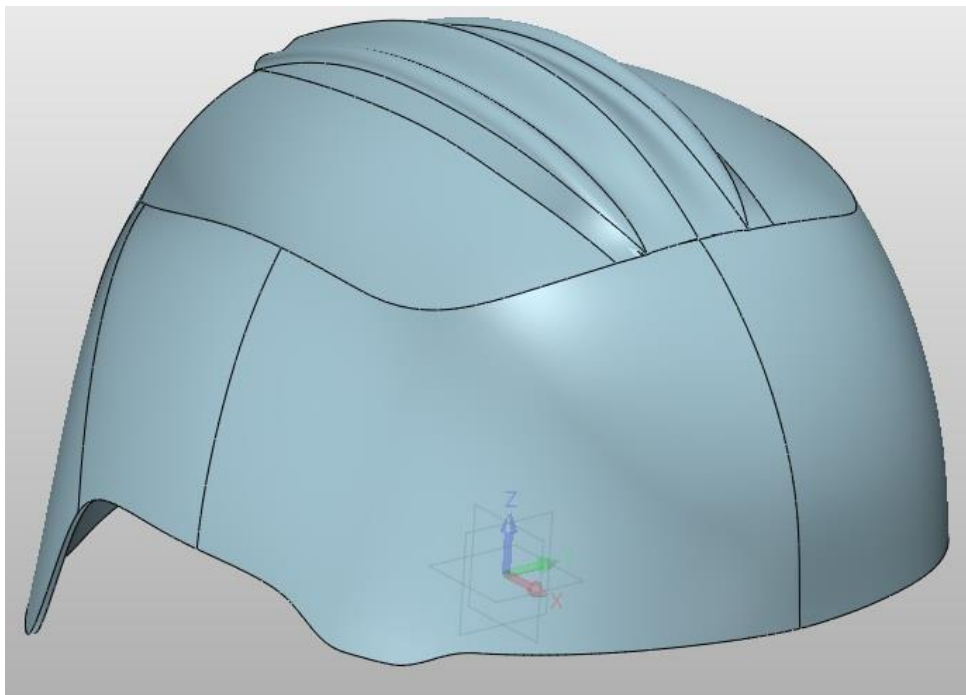


**Slika 47. Osnovna kaciga**

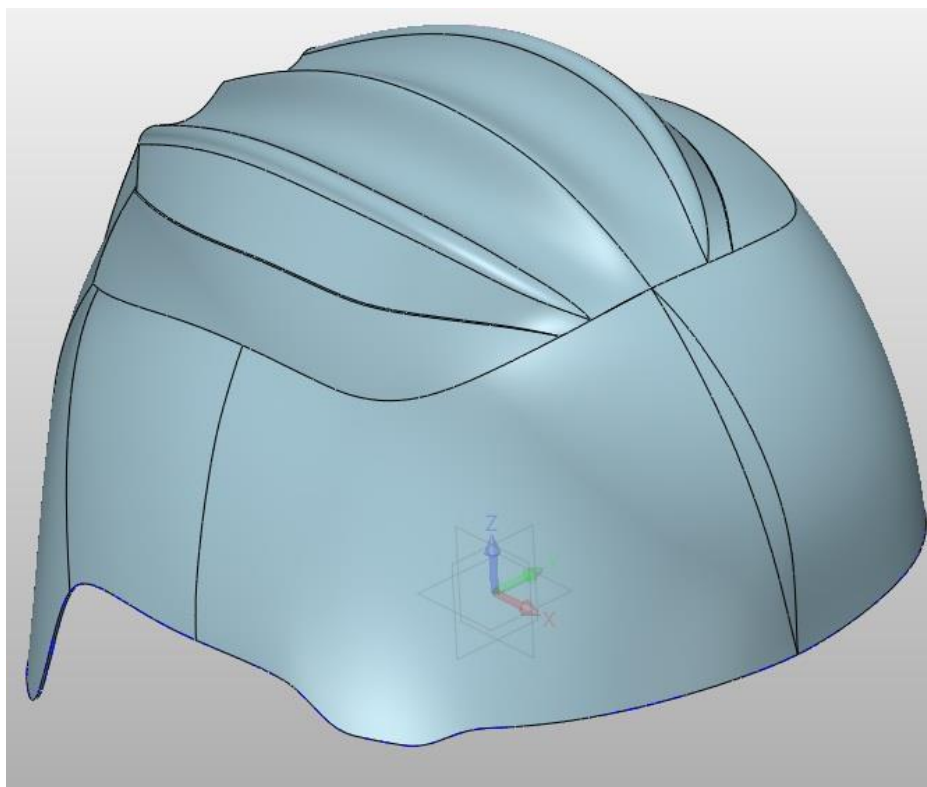


**Slika 48. Modifikacija osnovne kacige, pridodavanjem tjemenog ojačanja**

Kacige na slikama 49. i 50. su slične i kod njih je samo promijenjen gornji dio koji nije znatno povećao volumen, ali je povećao čvrstoću kacige.

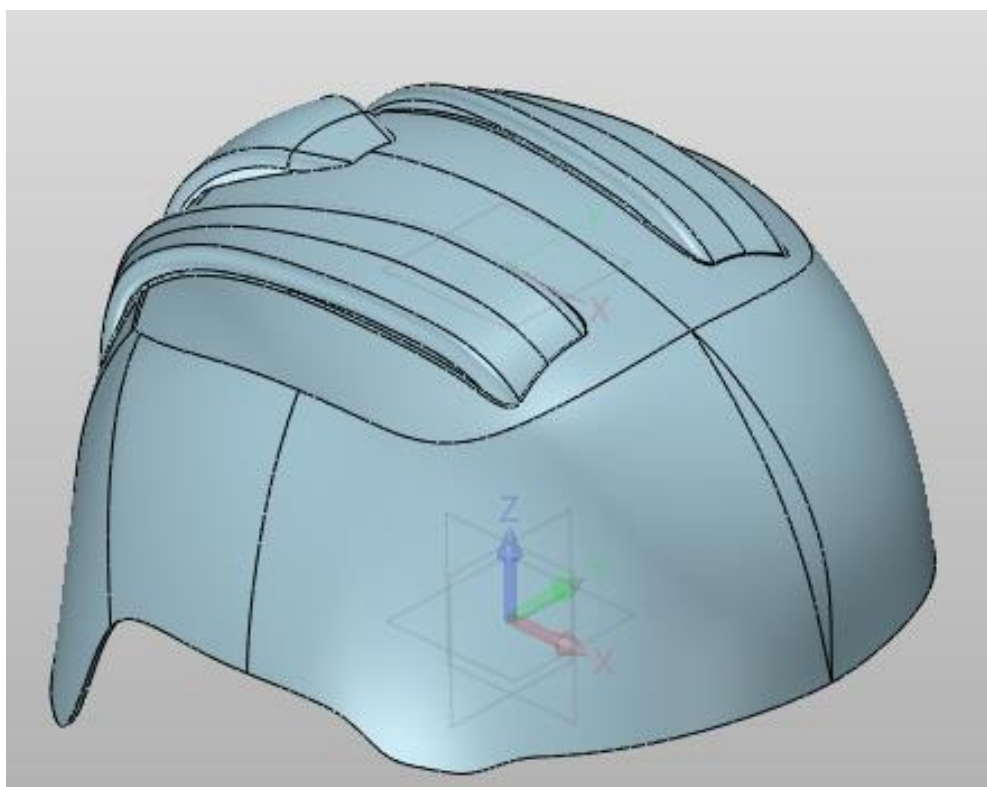


**Slika 49.** Kaciga s varijacijom tjemelog ojačanja, u svrhu veće čvrstoće



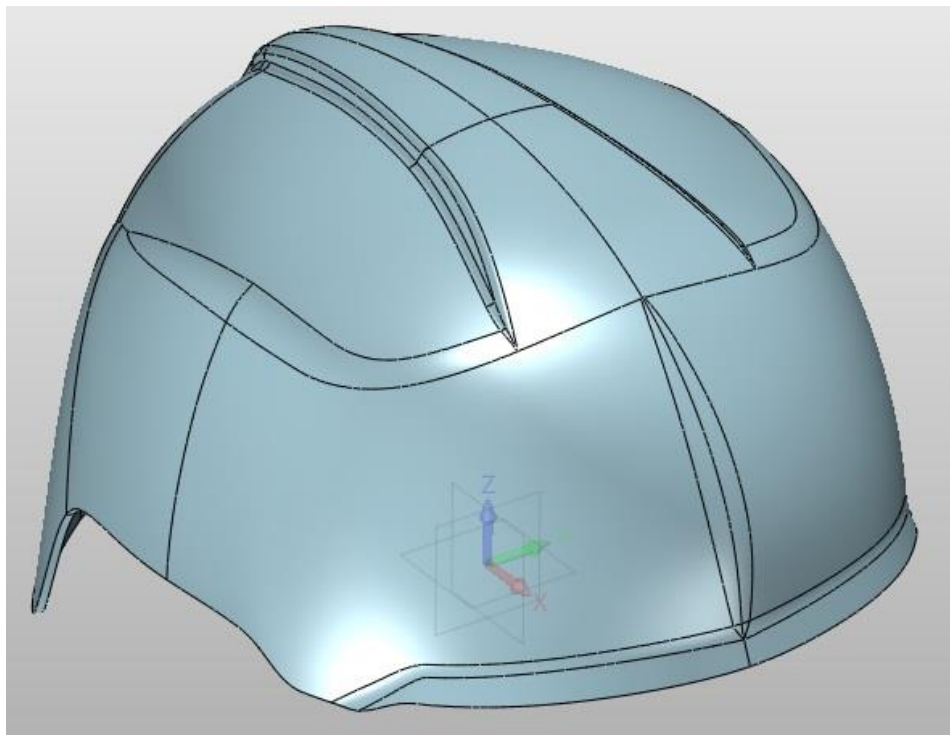
**Slika 50.** Daljnje modeliranje tjemelog ojačanja kacige, u svrhu veće čvrstoće

Slika 51. prikazuje kacigu koja bi trebala služiti kao biciklistička kaciga.



**Slika 51.** Biciklistička izvedba kacige

Slika 52. prikazuje kacigu koja je odabrana za izradu prototipa zbog svog jedinstvenog dizajna. Naime, ojačanjem tjemena dobivena je veća čvrstoća nego kod običnog dizajna kacige, dok je njezin dizajn moderan i privlačan za kupca.



**Slika 52. Model kacige odabrane za izradu prototipa**

#### 4.7.2. 3D tiskanje

Nakon modeliranja uslijedilo je 3D tiskanje.

3D tiskanje jest aditivni izradbeni postupak. Aditivna izradba (engl. *Additive Manufacturing*) je dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradbom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela računalnim CAD programima za modeliranje ili digitaliziranjem prostornog oblika već postojećeg objekta trodimenzionalnim skanerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Tim se postupcima jednako uspješno mogu izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu. No, brzina izradbe, izbor materijala i dimenzije modela zasad su ograničeni.

Prvi postupak koji se koristio bio je LPD (*Layer Plastic Deposition*). Takav postupak kao gradivni materijal koristi vrstu topive plastike u obliku žice. Žica ulazi u pomičnu zagrijanu glavu printera gdje se topi i zatim istiskuje kroz mlaznicu malog promjera. Pri izlasku iz mlaznice materijal se precizno nanosi sloj po sloj i skrućuje u konačan oblik. Prednost LPD tehnologije je mogućnost izrade kompleksnih oblika bez mnogih ograničenja koja postoje u tradicionalnim metodama proizvodnje. Prednost je i to što se koriste materijali koji su po svojim vizualnim i fizikalnim svojstvima slični proizvodima izrađenim od konvencionalnih plastičnih masa. [22]

Slika 53. prikazuje kacigu printanu metodom LPD u brončanoj boji. Kaciga se printala u četiri dijela i potom lijepila.



**Slika 53. Kaciga tiskana postupkom LPD**

Slika 54. prikazuje istu kacigu isprintanu metodom LPD, ali u crnoj boji. Kod ovog printanja kaciga je printana u osam dijelova i potom lijepljena.



**Slika 54. Crna kaciga tiskana postupkom LPD**

Drugi postupak printanja koji se koristio je postupak SLS. SLS (engl. *Selective Laser Sintering*) je tehnologija 3D printanja u kojoj se koriste polimeri u obliku praha. Izvor topline kod SLS 3D printera je CO<sub>2</sub> laser koji služi za poticanje fuzije (spajanja) između čestica praha tako oblikujući čvrsti sloj nekog objekta. Postupak SLS printanja je kvalitetniji i točniji način printanja, međutim sam postupak je sporiji i materijal za printanje je skuplji pa takav postupak nije toliko čest kao LPD. [23]

Slika 55. prikazuje isti model kacige isprintan metodom SLS. Kaciga je printana u 16 dijelova te kasnije lijepljena.

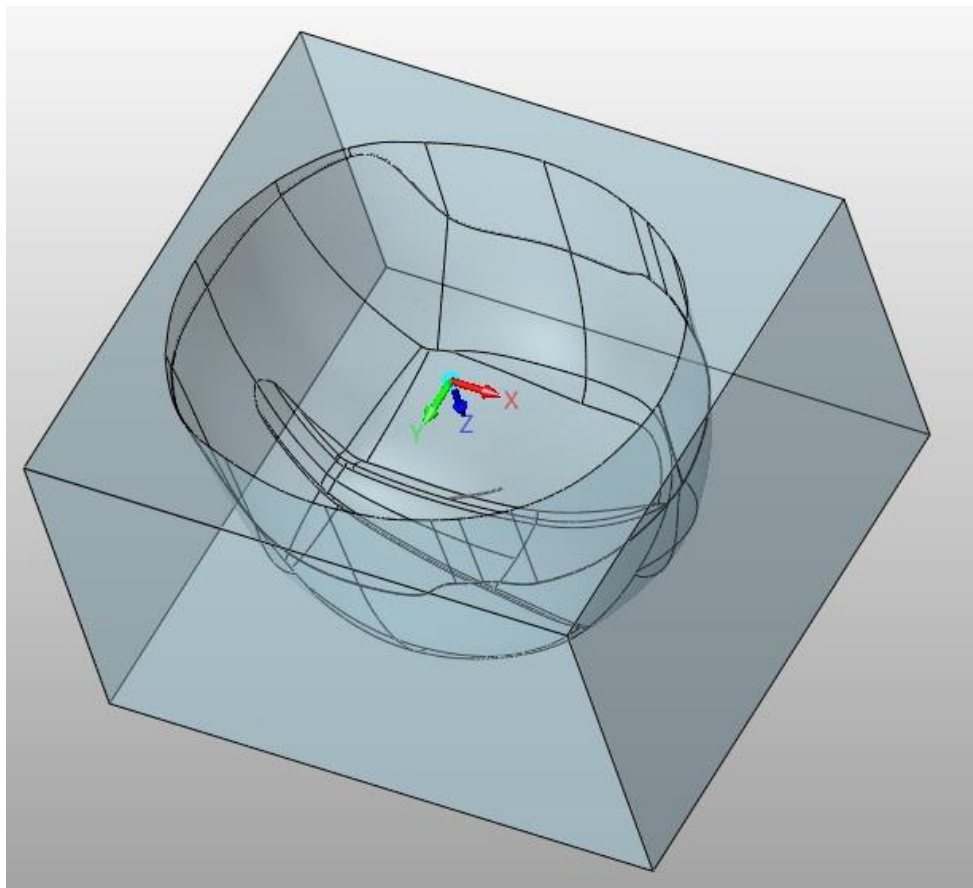


**Slika 55. Kaciga tiskana postupkom SLS**



#### 4.7.3. Modeliranje kalupa iz odabrane kalote

Iz odabrane kacige u programu ZW3D izmodeliran je kalup koji će se koristiti u postupku vakuumske infuzije (Slika 56.). Model kalupa izmodeliran je unutar kvadra tako da je u njega utopljen model kacige i definiran rub kacige. Bitna stvar koja se mora paziti kod modeliranja kalupa je ta da nema takozvanih negativnih kutova. Tehnički crtež kalupa nalazi se u prilogu 9.



Slika 56. Model kalupa

#### 4.7.4. Izrada kalupa

Sljedeći zadatak je izrada kalupa. Kalup je napravljen glodanjem medijapana. Medijapan ploče su proizvedene od usitnjenog drva uz minimalan dodatak veziva. Gustoća je po cijeloj debljini ujednačena, što ih čini pogodnim za profiliranje raznih oblika. U izradi kalupa nije korišten neki drugi materijal, točnije metal, jer je puno skuplji od medijapana, a kod izrade prototipa drveni kalup odlično će poslužiti jer je jeftiniji, a njegovom obradom može se dobiti dovoljno točan kalup koji će zadovoljiti sve potrebne zahtjeve kao što su finoća površine, točnost oblika, dobro primanje boje.

Model kalupa podijeljen je na šest dijelova te je tih šest dijelova glodano i kasnije lijepljeno.

Slika 57. prikazuje proces lijepljenja ploča medijapana.



**Slika 57. Postupak lijepljenja medijapana**

Nakon što su se svi dijelovi kalupa zalijepili, dobiveni kalup se pokitao te kasnije obojio temeljnom bojom i na to u dva sloja epoxy bež bojom. Između bojenja kalup se brusio da bi se uklonile neravnine dobivene bojenjem i da bi se dobila još sjajnija površina.

Slika 58. prikazuje gotov kalup spreman za postupak vakuumske infuzije.



**Slika 58. Kalup**

Uz potpuno novi izrađeni kalup, u postupku se koristio i već gotov čelični kalup koji ima mogućnost spajanja na temperiralo i grijanje na temperature do 140 stupnjeva celzija.

#### 4.7.5. Vakuumske infuzija

Nakon izrade kalupa slijedi sam postupak vakuumske infuzije. Postupak vakuumske infuzije napravljen je tri puta. Dva pokušaja ispala su djelomično dobra, dok je treća kaciga uspjela. Postupak za sva tri pokušaja bio je jednak i njegovi dijelovi naznačeni su u tablici 6. te su zapisana vremena trajanja pojedinog dijela.

**Tablica 6. Procesi u vakuumskoj infuziji**

<b>PROCES VAKUUMSKE INFUZIJE</b>
Čišćenje kalupa
Priprema pumpe i sistema za dovođenje smole
Slaganje kalupa
Priprema smole
Dobivanje vakuuma u kalupu
Proces laminiranja smole
Proces stvrdnjivanja smole

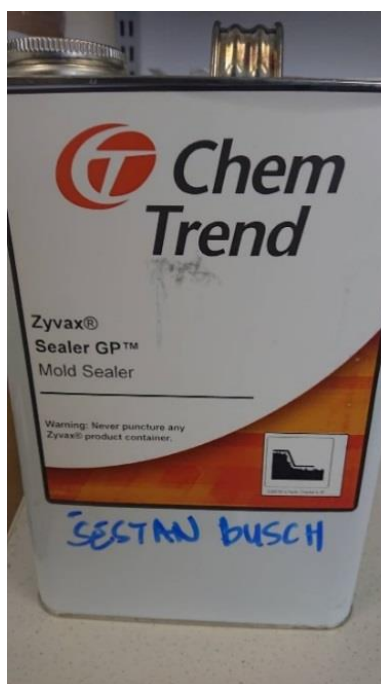
## Čišćenje i premazivanje kalupa

Prvi korak je čišćenje kalupa. Kalup se očistio sredstvom *Mould cleaner* (Slika 59.).



Slika 59. Čistač kalupa

Da bi se ispunile neravnine na kalupu, kalup se premazao takozvanim *sealerom* (Slika 60.)

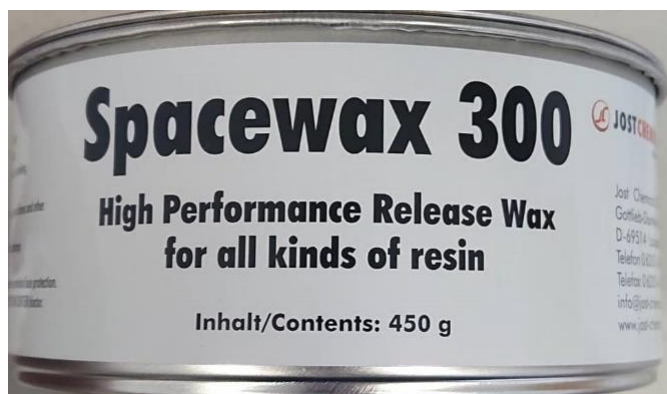


Slika 60. Sealer

Zadnji premaz kalupa je odjeljivač. Korištena su dva odjeljivača, tekući odjeljivač (Slika 61.) i vosak (Slika 62.). Odjeljivač služi da se smola ne primi za kalup te da se gotov proizvod lakše izvadi iz samog kalupa.



Slika 61. Tekući odjeljivač



Slika 62. Vosak za odjeljivanje

### Priprema pumpe i sistema za dovođenje smole

Sljedeći korak je priprema pumpe i sistema za dovod smole i vakuumiranje. Vakuumska pumpa se cijevom spoji na vakuumsku kanticu (Slika 63.) koja se spaja na foliju koja se zatim stavlja na kalup. Prije početka slaganja kalupa napravi se proba vakuumske pumpe i kanticice. Pumpom se napravi vakuum u kanticici te se zatvori odvod zraka i sama pumpa. Ukoliko je unutar kanticice ostao vakuum može se krenuti sa sljedećim korakom.



Slika 63. Vakuumska kantica

## Slaganje kalupa

Nakon toga slijedi slaganje (montaža) kalupa:

- Prvi korak je slaganje karbona u kalup. Karbon mora pokriti mjesta na kojima se želi dobiti gotovi proizvod. Jedan sloj karbona nakon vakuumske infuzije daje debljinu 0,17 mm.
- Na sloj karbona stavlja se tkanina Peel-ply. Ona se reže većih dimenzija od karbona te ga mora cijelog pokriti.
- Nakon toga slijedi tkanina za provođenje smole. Ona mora biti istih dimenzija kao Peel-ply.
- Oko svega dolazi cijev za provođenje smole. Smola se treba provoditi kroz cijev do vakuumske kantice.
- Zadnji sloj koji se stavlja je sloj folije koja mora biti dosta veća od ostalih slojeva jer kad se javlja vakuum mora biti dovoljno velika da pokrije cijeli kalup. Ta folija lijepi se ljepljivom gumom oko kalupne šupljine. Uz to, na jedan ili više dijelova stavlja se odvodnik smole kroz koje će pomoću cijevi dolaziti smola potrebna za završetak procesa.

Slika 64. prikazuje gotov pripremljeni kalup.



**Slika 64. Kalup spreman za postupak vakuumske infuzije**



### **Priprema smole**

Korak koji slijedi je priprema smole. Smola se dobila miješanjem dviju vrsta smola, EC 157 i W152 MR, u omjeru 100:30.

### **Proces vakuumske infuzije**

Nakon slaganja i spajanja dijelova cijevima, potrebno je uključiti pumpu i napraviti vakuum unutar kalupa (Slika 65.). Kad se postigne vakuum, pusti se smola u proces koja mora doći do svih dijelova na kojima se nalazi karbon. Ovisno o vrsti smole, potrebno je držati proces pod vakuumom određeno vrijeme, a to se naziva laminiranje smole. Nakon što prođe određeno vrijeme, isključi se pumpa i čeka da se smola stvrdne. Najčešće to traje tri puta duže od samog držanja pod vakuumom. Postupak se može ubrzati povećanjem temperature. Kod zadnjeg procesa vakuumske infuzije zagrijani je kalup na 60 stupnjeva celzija što je omogućilo brže stvrdnjivanje smole i bolje rezultate. Nakon što se smola stvrdne, potrebno je odvojiti korišteni materijal od karbona.



**Slika 65. Postupak pod vakuumom**

Slika 66. prikazuje prvi dobiveni rezultat. Kaciga se u ovom slučaju vrlo teško izvadila iz kalupa te se u procesu vađenja oštetila.



**Slika 66. Prva izrađena kaciga, oštećena pri vađenju iz kalupa**

Slika 67. prikazuje drugu izrađenu kacigu. Ona se u ovom slučaju lakše izvadila, međutim smola se nije dovoljno stvrdnula i kaciga nije dobila željene karakteristike.



**Slika 67. Druga izrađena kaciga, oštećenja uslijed nestvrdnutosti smole**

Slika 68. prikazuje treću izrađenu kacigu, gdje je postupak vakuumske infuzije uspio.



**Slika 68. Treća izrađena kaciga, zadovoljavajuće kvalitete**

Ova tri rezultata pokazala su da na kvalitetu samog komada kod vakuumske infuzije najviše utječu vrijeme laminiranja i stvrdnjivanja smole, temperatura na kojoj se radi postupak te je bitno dobro pripremiti kalup (očistiti ga, premazati *sealerom* i odjeljivačem).

Na uspješno izrađenu kacigu montirali su se dodaci te je spremna za korištenje (Slika 69.). Takva dobivena kaciga služiti će kao daljnji putokaz prema još boljim primjercima.



**Slika 69. Kaciga kao gotov proizvod**

## 5. ZAKLJUČAK

Vojna industrija sve više raste i jedna je od najjačih industrijskih grana danas na svijetu. Kako se širi vojna industrija, s njom se šire i ostale povezane industrijske grane.

Zaštitna vojna oprema u današnjem svijetu iznimno je važna te se sve više personalizira. Zaštitne vojne kacige, kao dio zaštitne opreme koja štiti od ozljeda glave, možda su i najbitnija zaštita u svijetu ratovanja. Danas se kacige sve više izrađuju prema željama korisnika i razlikuju se od korisnika do korisnika po konstrukciji, težini, boji i čvrstoći. Različiti su i dodaci koji se stavljaju na kacige, a posebno, i fizikalna svojstva kaciga, točnije, stupanj balističke zaštite koji je najvažnije svojstvo zaštitne kacige. Kaciga može izaći iz proizvodnje tek kada je prošla sva potrebna balistička ispitivanja.

Tvrtka Šestan-Busch d.o.o. bavi se izradom zaštitnih kaciga te je njen proizvodni proces toliko uhodan da u najkraćem vremenu od prvog procesa izrezivanja kevlaru dolazi do gotove kacige kroz postupke predformiranja, prešanja, bojenja i montaže. Takva uhodanost omogućuje proizvodnju 600-tinjak kaciga dnevno te mogućnost prodaje velikih količina kaciga u vrlo kratkom roku. Tvrtka nudi više desetaka verzija zaštitnih kaciga koje su do najsitnijih detalja napravljene za krajnjeg korisnika. Takva proizvodnja koja omogućava izradu različite verzije kacige za svakog pojedinca svrstala je Šestan-Busch u sam vrh proizvođača zaštitne vojne opreme.

U ovome radu posebno je razmotren novi projekt tvrtke. Naime, tvrtka Šestan-Busch krenula je u projekt *Multifunkcionalna zaštitna kaciga* kojim će pokušati ući na tržište civilne zaštitne opreme. Projekt je započeo istraživanjem tržišta i konkurencije, i upravo je u ovome radu načinjen prvi naredni važan korak tj. modeliranje kacige. Od 10-ak modela izabran je jedan i izrađen je prvi prototip te kacige. Nakon modeliranja kacige i njezinog kalupa, izrađen je i kalup koji je korišten u postupku vakuumske infuzije. Osim toga (novog) kalupa, korišten je i već postojeći čelični kalup. Vakuumska infuzija postupak je koji je odabran za izradu multifunkcionalne zaštitne kacige a za materijal su odabrana karbonska vlakna. Vakuuskom infuzijom se kroz nekoliko eksperimenata dobio prvi zadovoljavajući primjerak kacige.

Postupak vakuumske infuzije u tvrtki se smatra posebno prosperitetnim, pa je u ovome radu upravo dan doprinos uvođenju te tehnologije izradom prvog uspješnog primjerka kacige.

Nakon uspješne izrade prototipa, uslijedit će daljnji rad na poboljšavanju konstrukcije kacige i optimiranju tehnoloških parametara njezine izrade (posebno što se tiče vakuumske infuzije), a u svrhu uspostave serijske proizvodnje. U sklopu tih nastojanja, dodatni inženjerski izazovi bili bi sadržani i u razmatranju još efikasnije strukture proizvodnog sustava i u postizanju višeg stupnja automatizacije proizvodnog procesa.

Takva kaciga otvorila bi nova vrata i putove kojim može krenuti tvrtka. Zaštitna kaciga trebala bi se koristiti u većini znanih industrija i sportova koje koriste neki oblik zaštite glave. Zbog postojećeg nevelikog broja takvih kaciga na tržištu, ako projekt bude uspješan, takva kaciga mogla bi dignuti tvrtku i na sam vrh što se tiče izrade civilnih kaciga, a ne samo vojnih kaciga u kojima su jedan od najjačih svjetskih proizvođača.

## 6. LITERATURA

- [1] <https://hrvatski-vojn timer.hr/vojna-industrija-promjena-pri-vrhu/>, Pristupljeno: 2019-10-08
- [2] <https://hrvatski-vojn timer.hr/>, Pristupljeno: 2019-10-08
- [3] <https://obris.org/category/hrvatska/vojna-industrija-rh/>, Pristupljeno: 2019-10-08
- [4] <https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing>, Pristupljeno: 2019-10-08
- [5] <https://www.explainthatstuff.com/kevlar.html>, Pristupljeno: 2019-10-09
- [6] <https://www.teijinaramid.com/en/products/twaron/>, Pristupljeno: 2019-10-09
- [7] <https://www.sestan-busch.hr/>, Pristupljeno: 2019-10-13
- [8] <https://www.teamwendy.com/>, Pristupljeno: 2019-10-13
- [9] <https://www.revisionmilitary.com/>, Pristupljeno: 2019-10-13
- [10] <https://www.pacifichelmets.com/>, Pristupljeno: 2019-10-13
- [11] [https://www.skylotec.com/eu\\_en/](https://www.skylotec.com/eu_en/), Pristupljeno: 2019-10-13
- [12] <http://kompozit-kemija.hr/>, Pristupljeno: 2019-10-15
- [13] M. Grozdanić, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [14] W. Kunej, Poliesterski kompoziti, A.G. Matoš, Samobor, 2003.
- [15] Vacuum infusion – The Equipment and Process Of Resin Infusion, FibreGlast developments corporation, 2004.
- [16] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vojska>, Pristupljeno: 2019-10-17
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Reactive\\_armour](https://en.wikipedia.org/wiki/Reactive_armour), Pristupljeno: 2019-10-17
- [18] <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0tit>, Pristupljeno: 2019-10-17
- [19] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaciga>, Pristupljeno: 2019-10-17
- [20] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Metal>, Pristupljeno: 2019-10-17
- [21] <http://www.differencebetween.net/object/differences-between-kevlar-and-twaron/>, Pristupljeno: 2019-10-19
- [22] <https://zortrax.com/blog/lpd-technology-get-into-the-details/>, Pristupljeno: 2019-10-19
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering), Pristupljeno: 2019-10-19
- [24] <https://www.future-safety.com/>, Pristupljeno: 2019-10-23
- [25] <https://www.busch-protective.com/>, Pristupljeno: 2019-10-23
- [26] <https://www.usar-tech.com/manta-sar-helmet>, Pristupljeno: 2019-10-23
- [27] <https://www.comsol.com/>, Pristupljeno: 2019-11-19

## **PRILOZI**

1. Slika tlocrta pogona tvrtke Šestan-Busch d.o.o.
2. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB4“,
3. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB5“
4. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB6“
5. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB7“
6. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB8“
7. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB10“
8. Tehnički crtež „Multifunkcionalna zaštitna kaciga – model SB11“
9. Tehnički crtež „Kalup za multifunkcionalnu zaštitnu kacigu – model SB1“