

# Utjecaj temperature prešanja na probojna svojstva kompozitne ploče

---

Mesarić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:330355>

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

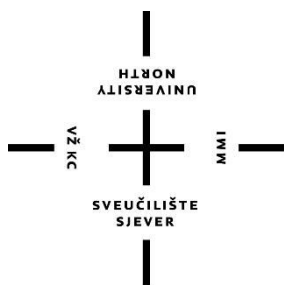
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

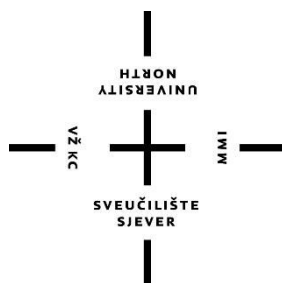
Završni rad br. 145/PS/2015

## **Utjecaj temperature prešanja na probojna svojstva kompozitne ploče**

Mesarić Filip, 5744/601

Varaždin, rujan 2015. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 145/PS/2015

## **Utjecaj temperature prešanja na probojna svojstva kompozitne ploče**

**Student**

Filip Mesarić, 5744/601

**Mentor**

Božo Bujanić, dipl. ing.

Varaždin, rujan 2015. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Filip Mesarić	MATIČNI BROJ	5744/601
DATUM	10.07.2015.		
KOLEGIJ	Tehnologija II		
NASLOV RADA	Utjecaj temperature prešanja na probojna svojstva kompozitne ploče		
MENTOR	Božo Bujanić dipl. ing.	ZVANJE	viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. dr.sc. Živko Kondić, dipl. ing.		
	2. Božo Bujanić, dipl. ing.		
	3. Marko Horvat, dipl. ing.		

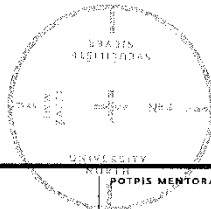
## Zadatak završnog rada

BROJ 145/PS/2015

### OPIS

U radu je potrebno ispitati utjecaj temperature prešanja na probojna svojstva kompozitne aramidne ploče. Postupak izrade ploče mora biti izravno prešanje, kompozitni materijal aramidni prepreg (aramidno tkanje kao ojačavalo i fenolna smola kao matrica). Za ispitivanje probojni svojstva odabrati parametar V50. Rad treba sadržavati:

1. teorijski dio:
  - osnove o kompozitima,
  - postupak ispitivanja parametra V50,
2. praktični dio:
  - opis postupka i opreme,
  - prikaz dobivenih podataka,
  - tumačenje dobivenih rezultata.



ZADATAK URUŽEN

15.07.2015

SVEUČILIŠTE  
SJEVER

## **Predgovor**

Izrada ovog rada potaknuta je od strane mentora zbog unapređenja izrade zaštitnih oklopa kao i zbog dobivanja viših razina zaštite od prodora projektila.

Zbog složenih i skupih ispitivanja aramidnih vlakana, nije provedeno puno ispitivanja pa dolazimo do nedostatka potrebnih podataka. U dogovoru sa mentorom i tvrtkom Šestan – Busch d.o.o., izrađen je završni rad na temu utjecaja temperature prešanja na brzinu V50 ispitivanja aramidnih ploča. Dobiveni rezultati koristiti će u unapređenju izrade i zaštite oklopnih elemenata, a samim time i zaštiti ugroženih ljudskih života.

Za mogućnost izrade ovog rada, zahvalio bih se tvrtki **Šestan – Busch d.o.o.** te svim njezinim djelatnicima, a naročito gospodinu **Davoru Paheku** koji mi je pomogao u izradi i testiranju ploča. Zahvalio bih se **Sveučilištu sjever**, svim profesorima, asistentima i suradnicima koji su mi omogućili stjecanje znanja potrebnih za izradu ovog rada, a posebno bih se zahvalio mentoru, profesoru **Boži Bujaniću** dipl.ing., koji mi je predložio temu te mi omogućio i pomogao izradu rada.

## **Sažetak**

U ovom završnom radu vrši se ispitivanje utjecaja temperature prešanja aramidnih ploča na V50 brzinu.

U prvom dijelu rada objašnjena je teorija ispitivanja i standardi te način izrade aramidnih vlakana. Opisana su svojstva kompozitnih materijala, izrada aramida, način izrade vlakana u role te standardi za ispitivanje i klasifikaciju protubalističkih oklopa. Opisani su NIJ i Stanag standardi te njihova veza sa brzinom V50. U drugom dijelu objašnjena je metoda izrade aramidnih ploča potrebnih za ispitivanje. Opisani su svi alati potrebni za izradu ploča, kao i svi alati za ispitivanje. Preša se šest aramidnih ploča na različitim temperaturama te se zatim one ispituju. U trećem dijelu prikazani su dobiveni rezultati, za svaku ploču zasebno, a u četvrtom dijelu prikazani su dijagrami usporedbe svih rezultata. Analizom i komentiranjem dobivenih rezultata dolazi se do idealnih temperatura prešanja radi postizanja što veće brzine V50.

Ključne riječi: kompozitni materijal, aramid, aramidna vlakna, protubalistička zaštita, NIJ standard, Stanag standard, brzina V50.

# SADRŽAJ

KORIŠTENE KRATICE .....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA .....	III
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest i razvoj balističkih oklopa.....	1
1.2. Balistika (terminalna balistika).....	3
2. OBRADA ZADATKA – TEORIJA.....	4
2.1. Kompozitni materijali .....	4
2.2. Aramid.....	7
2.2.1. Svojstva aramida.....	8
2.2.2. Uporaba aramida.....	13
2.2.3. Tkana aramidna vlakna.....	14
2.2.4. Ne – tkana aramidna vlakna.....	15
2.3. NIJ standard 0101.04 .....	17
2.4. Stanag standard 2920 .....	18
2.4.1. Metoda ispitivanja.....	18
2.5. Balistička granica V50 .....	19
3. PRAKTIČNI DIO .....	20
3.1. Preša.....	20
3.2. Kalup.....	21
3.3. Temperiralo .....	22
3.4. Aramidne ploče .....	23



4.	REZULTATI .....	24
4.1.	Prešane ploče .....	24
4.1.1.	Debljine ploča .....	25
4.2.	Rezultati V50 ispitivanja.....	26
4.2.1.	Rezultati ploče 150 .....	28
4.2.2.	Rezultati ploče 160 .....	29
4.2.3.	Rezultati ploče 170 .....	30
4.2.4.	Rezultati ploče 180 .....	31
4.2.5.	Rezultati ploče 190 .....	32
4.2.6.	Rezultati ploče 200 .....	33
5.	ANALIZA REZULTATA .....	34
6.	ZAKLJUČAK.....	36
7.	LITERATURA .....	37
8.	PRILOG 1.....	38

## **KORIŠTENE KRATICE**

MMC – metalna matrica kompozita

PMC – keramička matrica kompozita

PA – poliamid

PA66 – poliamid 66

PPD-T – poli(p-fenilen tereftalamid)

MPD-I – poli(m-fenilen isoftalamid)

PPBA – poli(p-benzamid)

PEN – polietilen nedir

PET – polietilen tereftalat

HMPE – polietilen visokog modula (high-modulus polyethylene)

PBO – (polybenzobisoxazole)

NIJ – Nacionalni institut pravde (The National Institute of Justice)

ISO – Internacionalni standardi

V50 – ispitna brzina

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1.1. Aramidno vlakno</i> .....	2
<i>Slika 2.1. Strukture kompozita</i> .....	4
<i>Slika 2.2. Karakteristike kompozita različitih matrica u odnosu na metale</i> .....	5
<i>Slika 2.3. Dijagram naprezanje-istezanje kompozita</i> .....	6
<i>Slika 2.4. Kemijska struktura aramida</i> .....	7
<i>Slika 2.5. Ekstrudiranje anizotropne otopine PPD-T/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> .....	9
<i>Slika 2.6. Utjecaj relativne vlažnosti zraka i vremena na masu aramida</i> .....	9
<i>Slika 2.7. Dijagram rastežno naprezanje – istezanje</i> .....	12
<i>Slika 2.8. Usporedba prekidnih duljina niti loma u neopterećenom</i> .....	12
<i>Slika 2.9. Tkana mreža vlakana</i> .....	14
<i>Slika 2.10. Ne-tkana mreža vlakana</i> .....	16
<i>Slika 2.11. Utvrđivanje granice V50</i> .....	19
<i>Slika 3.1. Preša sa kalupom</i> .....	20
<i>Slika 3.4. Izolacijska ploča</i> .....	21
<i>Slika 3.2. Gornji kalup</i> .....	21
<i>Slika 3.3. Donji kalup</i> .....	21
<i>Slika 3.5. Promjena temperature na površini kalupa</i> .....	22
<i>Slika 3.6. Rola aramida</i> .....	23
<i>Slika 4.1. Točke testiranja i koordinate u mm</i> .....	24
<i>Slika 4.2. Brzinomjer i stegnuta ploča</i> .....	26
<i>Slika 4.3. Ispitni laboratorij</i> .....	26
<i>Slika 4.4. Stezanje i namještanje ploče</i> .....	26
<i>Slika 4.5. Probijanje ploče</i> .....	27
<i>Slika 4.6. Zadržavanje projektila</i> .....	27
<i>Slika 4.7. Ispitana ploča 150</i> .....	28
<i>Slika 4.8. Ispitana ploča 160</i> .....	29
<i>Slika 4.9. Ispitana ploča 170</i> .....	30
<i>Slika 4.10. Ispitana ploča 180</i> .....	31
<i>Slika 4.11. Ispitana ploča 190</i> .....	32
<i>Slika 4.12. Ispitana ploča 200</i> .....	33
<i>Slika 5.1. Dijagram brzine V50</i> .....	34
<i>Slika 5.2. Dijagram zadržane i probijene brzine</i> .....	34

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 2.1. Utjecaj starenja na rasteznu čvrstoću aramida .....</i>	11
<i>Tablica 2.2. Toplinska rastezljivost .....</i>	11
<i>Tablica 2.3. NIJ razine zaštite .....</i>	17
<i>Tablica 2.4. Veličine projektila i njihove brzine .....</i>	18
<i>Tablica 3.1. Temperature temperirala .....</i>	23
<i>Tablica 4.1. Debljine ploča.....</i>	25
<i>Tablica 4.2. Rezultati ispitivanja ploče 150.....</i>	28
<i>Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja ploče 160.....</i>	29
<i>Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja ploče 170.....</i>	30
<i>Tablica 4.5. Rezultati ispitivanja ploče 180.....</i>	31
<i>Tablica 4.6. Rezultati ispitivanja ploče 190.....</i>	32
<i>Tablica 4.7 Rezultati ispitivanja ploče 200.....</i>	33

# 1. UVOD

## 1.1. Povijest i razvoj balističkih oklopa <sup>[1]</sup>

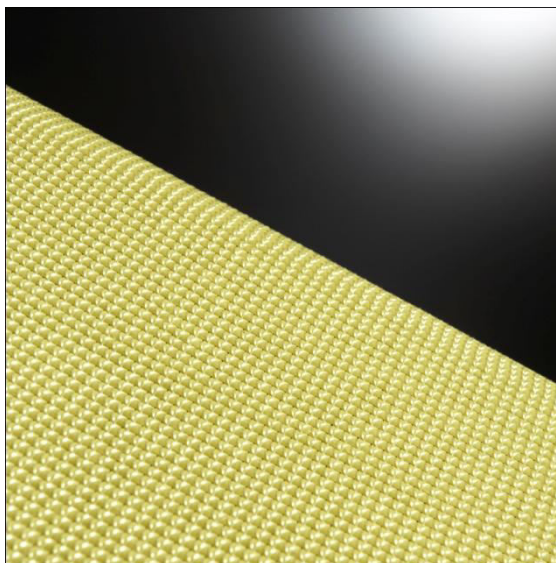
U svojoj borbi za opstanak čovjek je oduvijek bio izložen napadima, bilo životinja, bilo drugih ljudi. Shvatio je da zaštita postavljena između njegovog tijela i protivnika povećava njegove šanse da odbije napad, preživi i da iz sukoba izađe kao pobjednik. Na početku su ta zaštitna sredstva bila od drveta, slojeva kože ili kamena i stavljala su se neposredno ispred tijela kada je postojala potreba za njima.

Razvojem novih oružja ukazala se potreba za novim načinima zaštite, tako da su već rimski legionari, a potom i srednjovjekovni vitezovi, nosili profilirane tjelesne oklope, koji su preteča današnjih zaštitnih, balističkih prsluka ili popularno zvanih „pancirki”. Pronalaskom vatrenog oružja sve se promijenilo i sva do tada poznata sredstva zaštite su postala neefikasna.

Prva poznata i efikasna zaštita protiv vatrenog oružja pojavila se polovicom 18. stoljeća kada su suparnici u dvobojima odijevali više mokrih svilenih košulja. Mokra svila se skupljala, povećavala otpornost na proboj svojih vlakana i tako predstavljala veću zapreku za zrno ispaljeno iz vatrenog oružja. Ali ta zaštita je, usavršavanjem vatrenog oružja i municije, uskoro postala nedovoljna.

Nakon dva velika svjetska rata, kada su statistike pokazale da je više od 80 posto pješništva, najmasovnijeg i najznačajnijeg roda vojske stradalo od streljačkog naoružanja, krhotina artiljerijskih i minobacačkih projektila, te raznih mitsko-eksplozivnih naprava, izrada zaštitne individualne opreme za vojnika postala je glavna tema u svim vojskama.

Stotine i stotine naučnika širom svijeta započelo je potragu za novim materijalima koji će omogućiti izradu efikasne zaštitne opreme. I 1964. god. Stephanie Kwolek, kemičarka u američkoj tvrtki “Du Pont”, otkrila je aramid, novo umjetno polietilensko vlakno (slika 1.1.), koje je imalo pet puta veću otpornost od čelika.



*Slika 1.1. Aramidno vlakno [2]*

Nekoliko godina kasnije taj materijal se pojavio u serijskoj proizvodnji pod imenom „kevlar” i našao je svoju primjenu u vojnoj, avio i automobilskoj industriji. Nakon kevlara vrlo brzo su proizvedeni i drugi materijali slične namjene, kao što su Stabond, Spektra Zylon i Dyneema fiber te Nano Kevlar fiber. Za proizvodnju „pancirki” materijal se isporučuje u obliku višeslojne tanke role. Princip zaštite se sastoji u tome da materijal djeluje kao mreža za zrno iz vatrenog oružja i sprečava njegov prodor u tijelo. Pri tome se materijal deformira i „ulazi” u tijelo i do 40 mm (ovaj fenomen se zbog svog oblika naziva “prst”), pri čemu je česta pojava oteklina na tijelu, pa i povrede poput loma rebara. Zaštitni prsluk izrađen isključivo od kevlara i sličnih materijala može zaštititi od vatrenog oružja, ali ne i od uboda noža (nož ima deset puta veću probojnu moć od zrna iz vatrenog oružja). Zbog toga se u suvremene pancirke ugrađuje i gusta čelična mreža koja služi za zaštitu od uboda.

## 1.2. Balistika (terminalna balistika)

Balistika (iz starogrčkog βάλλειν bállein - bacati) je grana fizike, koja izučava gibanje bačenih tijela, a zavisi o brzini, stazi (putanji) i dometu projektila ispaljenih iz vatrenog oružja. U posljednje vrijeme bavi se i projektiranjem projektila kako bi se postigao željeni učinak.

„Ocem“ balistike se slovi talijan Niccolò Fontana Tartaglia. Otkrio je mogućnost razgradnje pojedinih komponenti u kretanju bačenih tijela, a time mogućnost za izračunavanje njihovog kretanja.

Balistika se dijeli na slijedeće osnovne grane:

- Unutarnja balistika - Proučava izgaranje baruta u cijevi, nastali tlak, konstrukciju cijevi koje trebaju izdržati tlak, brzinu zrna i sl..
- Vanjska balistika - Proučava gibanje projektila nakon izlaska iz cijevi, koristeći se Newtonovim zakonima mehanike.
- Balistika na cilju (terminalna balistika) - Proučava učinak djelovanja projektila na cilj (metu). Ovisno o načinu proučavanja pojava i procesa, terminalna balistika se dijeli na:
  - Teorijsku (koja matematički modelira procese i pojave).
  - Pokusnu (koja proučava metode i bilježi pojave pri opaljenju i kretanju projektila).<sup>[3]</sup>

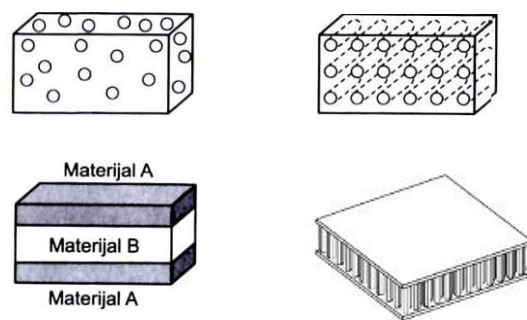
U praktičnom dijelu završnog rada koristi se pokusna terminalna balistika za ispitivanje prodornosti projektila, tj. za ispitivanje balističke čvrstoće oklopnih materijala.

## 2. OBRADA ZADATKA – TEORIJA

### 2.1. Kompozitni materijali <sup>[4]</sup>

Kompozitni materijali ili kompoziti su materijali koji nastaju umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava. Cilj je dobivanje materijala takvih svojstava, kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

Razvrstani su kao: kompoziti s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije (slika 2.1.).



*Slika 2.1. Struktura kompozita: s česticama, s vlaknima, slojeviti i sendvič konstrukcija [4]*

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

1. svojstvima matrice i ojačala,
2. veličini i rasporedu konstituenata,
3. volumnom udjelu konstituenata,
4. obliku konstituenata i
5. prirodi i jakosti veze između konstituenata.

Neke od općih prednosti kompozitnih materijala pred konvencionalnim materijalima jesu sljedeće:

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika,
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova,
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje,
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima i
- otpornost na koroziju.



Podjela kompozita na osnovu:

1. MATRICE - metalna (MMC),
  - keramička (PMC),
  - polimerna (polimeri, ugljik).
2. OJAČALA - kompoziti ojačani česticama,
  - kompoziti ojačani vlaknima,
  - strukturni kompoziti,
  - slojeviti kompoziti (laminati),
  - sendvič konstrukcije.

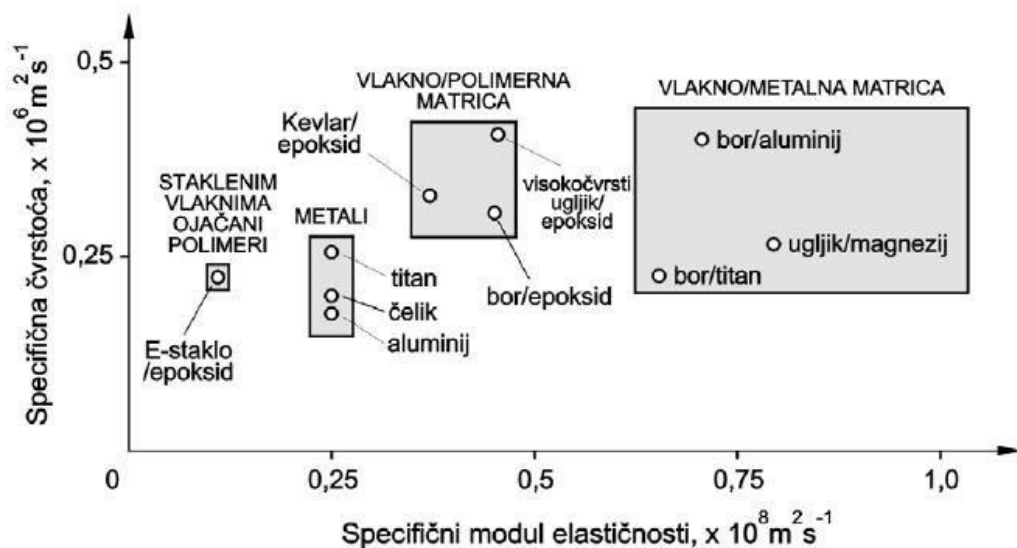
→ MATRICA + OJAČALA = KOMPOZIT

MATRICA može biti metalna, keramička te polimerna, a karakteristike su im prikazane u dijagramu na slici (slika 2.2.).

METALNA – legure Al, Ti, Cu, Mg, superlegure itd.

POLIMERNA – poliesterske smole, vinilesterske smole, epoksidne smole, poliamidi, itd.

KERAMIKA –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{ZrO}_2$ .



Slika 2.2. Karakteristike kompozita različitih matrica u odnosu na metale [4]

→ u novije vrijeme proizvode se i tzv. UGLJIK-UGLJIK KOMPOZITI, koji mogu podnijeti vrlo visoke temperature, tj. bez ikakvih problema mogu biti izloženi temperaturi od  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ , a kratkotrajno mogu funkcionirati i do  $2700 \text{ }^\circ\text{C}$

### Vrste ojačala:

1. VISKERI - vrlo tanke niti keramičkih monokristala sa ekstremno velikim omjerom „duljina/promjer“,

- pravilna kristalna građa, raspored vlakna utječe na svojstva kompozita,
- u smjeru vlakana čvrstoća je maksimalna, a u smjeru okomitom na vlakna je minimalna,
- najčvršći poznati materijal = zbog pravilne kristalne građe nema tečenja,
- vrlo skupi,
- mogu biti od grafita (ugljika), silicijeva karbida ili nitrida i aluminijske oksida.

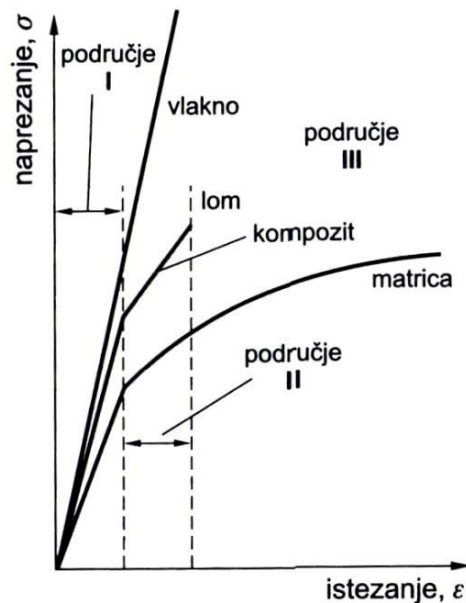
2. VLAKNA - polimerna i/ili keramička, polikristalna ili amorfna,

- imaju mali promjer,
- npr. staklo, ugljik, bor, aluminijski oksid...

3. ŽICA - čelik, Mo, W,

- relativno veliki promjer (pneumatici, cijevi).

Kompoziti ojačani VLAKNIMA daju dobra mehanička svojstva (slika 2.3.).



Slika 2.3. Dijagram naprezanje-istezanje kompozita [4]

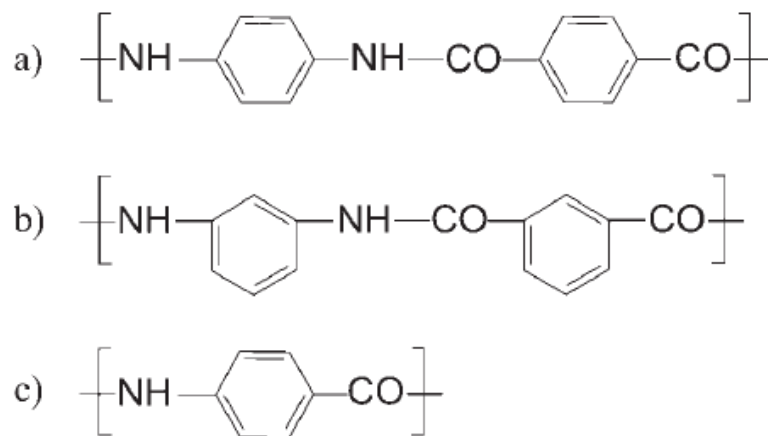
Dva značajna svojstva vlakana su visoka toplinska stabilnost i kontrolirana rastezljivost pri povišenim temperaturama. Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do poboljšanja čvrstoće, žilavosti, krutosti, povećanja omjera „čvrstoća/gustoća“  
→ → Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna!

Vlakna se razlikuju prema: vrsti, duljini, promjeru, orijentaciji i hibridizaciji.

## 2.2. Aramid

U kasnim 1960-ima dogodio se napredak u području polimera. DuPont-ovi znanstvenici razvili su vlakna tri puta jača od najlona s daleko većim modulom elastičnosti. Vlakna su tako fina da tkana tkanina ima vrlo veliku savitljivost i lako se oblikuju. Nova vlakna su imenovana PRD-49, a komercijalno su znana kao Kevlar 29. Ova vlakna su puno čvršća i lakša od stakloplastičnih (eng. fiberglass) vlakana i mogu zamijeniti najlon u fleksibilnosti i krutosti u oklopu koji se koristi od strane agencija za provedbu zakona i vojske. Kacige i fleksibilni prsluci izrađeni iz aramidnih vlakana mogu zaustaviti fragmente i zrna metaka, te su puno lakša od najlonskih vlakana. <sup>[5]</sup>

Organizacija US Federal Trade Commission definira aramidno vlakno kao vlakno sastavljeno od sintetskih linearnih makromolekula koje su sastavljene od aromatskih skupina povezanih amidnim ili imidnim vezama, od kojih je najmanje 85 % neposredno vezano na dva aromatska prstena. Ako su prisutne i imidne veze, njihov broj ne prelazi broj amidnih veza. Iz definicije je vidljiva razlika između aramida i ostalih poliamida poput PA66. Kemijska građa i struktura nekih aromatskih poliamida prikazane su na slici 2.4..



**Slika 2.4.** Kemijska struktura[6] :a) poli(*p*-fenilen tereftalamid)(PPD-T)  
b) poli(*m*-fenilen isoftalamid)(MPD-I)  
c) poli(*p*-benzamid)(PPBA)

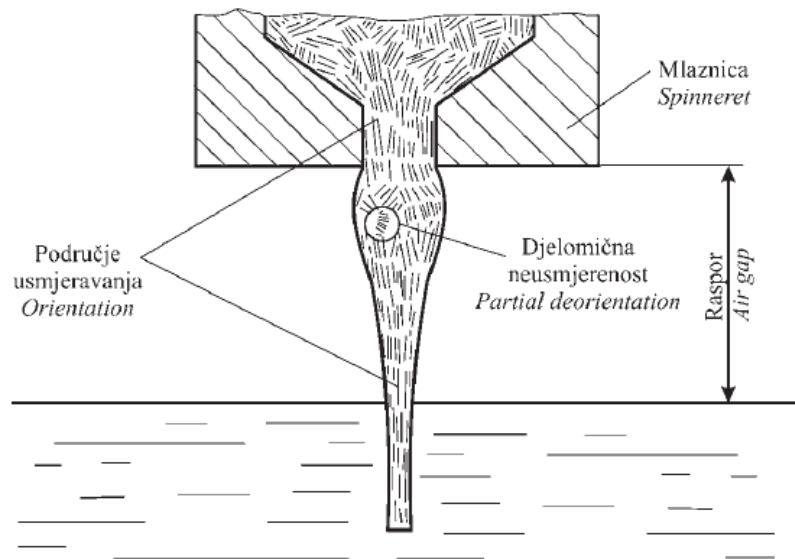
Osnova aramidnih vlakana je poli(p-fenilen tereftalamid) (PPD-T), vrsta aromatskih poliamida proizvedena prvi put 1965. godine. PPD-T je, kao i većina para-orientiranih aromatskih poliamida, jako postojan u klasičnim otapalima, međutim otapa se u visoko koncentriranim jakim kiselinama poput sulfidne kiseline. Kowlek je otkrila zanimljivu pojavu da se 10 % otopina PPD-T/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ponaša poput kristalaste kapljevine i da pokazuje anizotropna svojstva. Daljnja istraživanja pokazala su, međutim, da svojstvo anizotropnosti prestaje kada koncentracija PPD-T-a prijeđe 12 %. Da bi se dobila homogena otopina poliamida u određenom omjeru, upotrebljava se postupak očvršćivanja sulfatne kiseline i miješanje praškastog poliamida s ledenim prahom sulfatne kiseline.

Kod proizvodnje je potrebno obratiti pažnju na ponašanje anizotropne otopine PPD-T/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pri postupku ekstrudiranja kroz mlaznicu malog promjera. Smično naprezanje dovodi do usmjeravanja makromolekula koje se nalaze uz stijenk mlaznice u smjeru strujanja. Zbog viskoelastičnosti kapljevine na izlasku iz mlaznice dolazi do djelomičnog gubitka usmjerenosti makromolekula, međutim do povrata usmjerenosti dolazi u zračnom rasporu, što je vidljivo na slici 2.5.. Aramidna vlakna postojana su pri normalnim uvjetima okoline, a toplinska razgradnja počinje pri 400 °C. Samogasiva su i neškodljiva za zdravlje ljudi i životinja. Istraživanja provedena na štakorima i ljudima pokazala su da izloženost aramidu ne uzrokuje nastanak tumora, iritaciju kože ili dišnog sustava. <sup>[6]</sup>

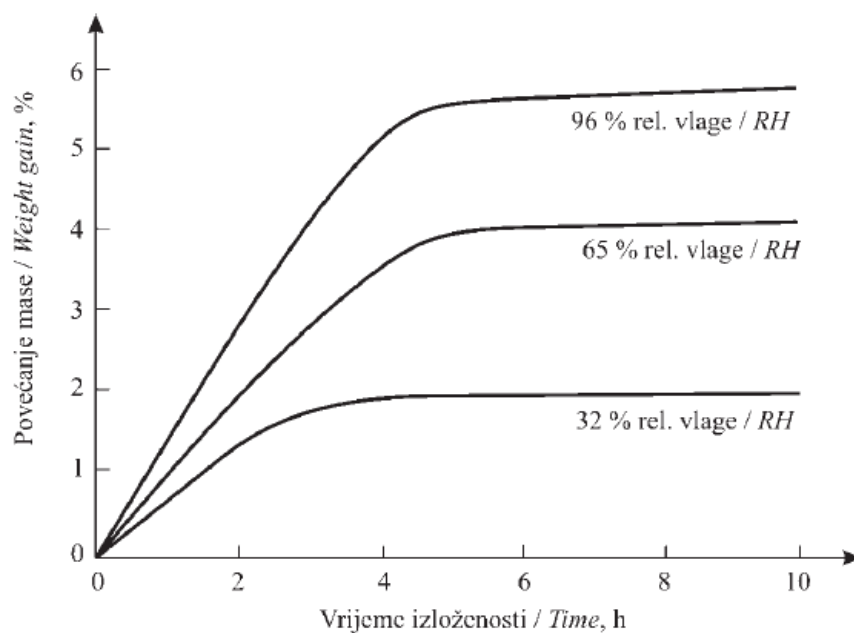
### 2.2.1. Svojstva aramida <sup>[6]</sup>

Aramidna vlakna nemaju najveće module rasteznosti ni najvišu rasteznu čvrstoću, međutim odlikuje ih optimalan omjer mehaničkih i kemijskih svojstava. Žuta boja aramida uzrokovana je konjugacijom amidne veze i oksidacijskim skupinama na krajevima amina. Gustoća većine p-aramidnih vlakana pri normalnim uvjetima okoline iznosi od 1,43 do 1,47 g/cm<sup>3</sup>. U usporedbi s gustoćom PA (1,14 g/cm<sup>3</sup>), ugljika (1,8 g/cm<sup>3</sup>), stakla (2,55 g/cm<sup>3</sup>) ili čelika (7,9 g/cm<sup>3</sup>), vidljivo je da je aramid zanemarivo više gustoće od PA i mnogo niže gustoće od ugljika, stakla i čelika, dok su mu ostala fizikalna svojstva izvrsna.

Apsorpcija vode jedan je od najčešće spominjanih nedostataka aramida i aramidnih vlakana. Ovisno o uvjetima okoline, aramidna vlakna mogu upijanjem vode povećati masu i za 7%. Taj postotak ovisi o vrsti aramidnih vlakana, postotku nečistoća u materijalu (u prvom redu pepela) i o uvjetima okoline. Slika 2.6. prikazuje ovisnost povećanja mase vlakana o relativnoj vlažnosti zraka i vremenu. Prikazani rezultati pokazuju veće povećanje mase zbog upijanja vode pri višoj relativnoj vlažnosti zraka i u duljem razdoblju.



Slika 2.5. Ekstrudiranje anizotropne otopine PPD-T/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [6]



Slika 2.6. Utjecaj relativne vlažnosti zraka i vremena na masu aramida [6]

Aramidna vlakna imaju nižu rasteznu čvrstoću od ugljika, ali veću od većine polimernih materijala i čelika, što je vidljivo iz dijagrama na slici 2.7a. Riječ je o rasteznoj čvrstoći u uzdužnom smjeru, odnosno u smjeru osi vlakna. Vlakna u uzdužnom smjeru posjeduju nizak modul smičnosti i nisku uzdužnu pritisnu čvrstoću. Većina organskih otapala ne utječe znatno na aramidna vlakna i na vrijednost rastezne čvrstoće, a slana voda nema nikakav utjecaj (slika 2.7b.). No lužine i kiseline visoke koncentracije ili pri povišenoj temperaturi narušavaju strukturu materijala. Važna mjera usporedbe rastezne čvrstoće materijala izražajno različite gustoće jest vrijednost specifične rastezne čvrstoće i specifičnog modula rasteznosti. Oni se izračunavaju tako da se vrijednost rastezne čvrstoće ili modula rasteznosti podijeli s gustoćom materijala. Primjer usporedbe vlakana različite gustoće prikazan je na slici 2.8.. Čvrstoća aramidnih i čeličnih vlakana uspoređena je na zraku i u slanoj vodi, i to tako da je mjerena duljina slobodno ovješene niti (bez dodatnog opterećenja) pri kojoj je došlo do loma niti zbog vlastite mase (e. *free length*). Rezultati su pokazali da primjerice *Kevlar 49* ima sedam puta veću duljinu loma od čelika mjereno na zraku i 26 puta veću duljinu loma mjereno u slanoj vodi. Postojanost na oksidaciju važno je svojstvo aramida. Istraživanjem utjecaja starenja na rasteznu čvrstoću aramidnih vlakana u temperaturnom rasponu od 100 do 250 °C. Rezultati su pokazali (tablica 2.1.) da se aramidna vlakna mogu upotrebljavati u oksidnoj okolini pri temperaturi ne višoj od 150 °C.

Otpornost puzanju kritičan je zahtjev za vlakna koja se koriste kao ojačavala kompozitnih tvorevina. Zbog visokog udjela kristalaste strukture i anizotropnih svojstava aramidna vlakna pokazuju visoku otpornost puzanju. Međutim, pri izrazito visokim opterećenjima, povišenoj temperaturi i u slučajevima kada su vlakna natopljena vlagom, dolazi do određenog puzanja. Potrebno je napomenuti da visoki udio kristalaste strukture uvjetuje i niske vrijednosti pritisne čvrstoće u smjeru vlakana i u smjeru i okomito na smjer vlakana. Iz tablice 2.2. proizlazi da je pritisna čvrstoća pet puta niža od rastezne čvrstoće te da je smična čvrstoća sedamnaest puta manja od rastezne čvrstoće.

Modul rasteznosti i modul stlačivosti imaju istu vrijednost, dok je vrijednost modula smičnosti sedamdeset puta niža od modula rasteznosti. Niska vrijednost smičnih svojstava objašnjava se anizotropnom strukturom. Aramidna vlakna kao i

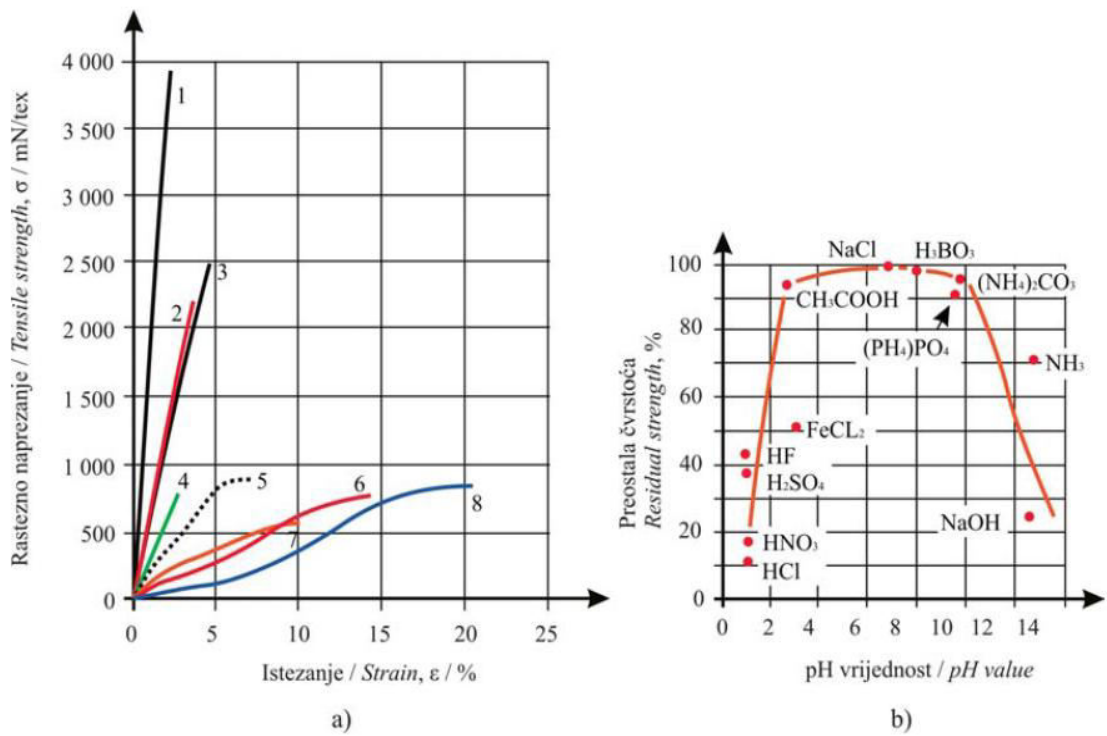
većina polimernih materijala osjetljiva su na ultraljubičasto zračenje, radioaktivno zračenje i zračenje određenih umjetnih izvora svjetlosti. Da bi se spriječilo moguće oštećenje vlakna, ona moraju biti zaštićena od tih izvora zračenja. Međutim aramidna vlakna posjeduju svojstvo samozaštite jer npr. gornji slojevi štite donje slojeve od utjecaja zračenja. U tablici 2.2. prikazane su vrijednosti toplinske rastezljivosti za neke vrste aramidnih vlakana. Vidljivo je da je vrijednost negativnog predznaka. Također, vlakna posjeduju visok stupanj dimenzijske stabilnosti.

*Tablica 2.1. Utjecaj starenja na rasteznu čvrstoću aramida [6]*

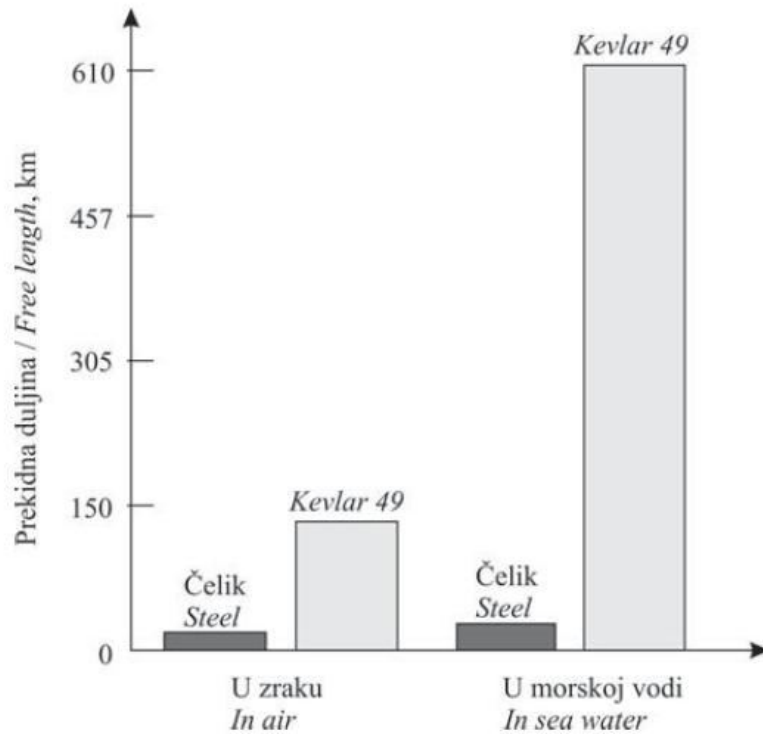
	Temperatura, °C	Vrijeme grijanja, h	Gubitak rastezne čvrstoće, %
1	160	100	0
2	160	500	5
3	250	100	40

*Tablica 2.2. Toplinska rastezljivost [6]*

Vlakno	Toplinska rastezljivost, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Kevlar 29	-3,76
Kevlar 49	-4,25
Kevlar 149	-1,96
E – staklo	+5,00



**Slika 2.7.** Dijagram [6]: a) rastezno naprezanje – istežanje (1-ugljik, 2-Twaron, 3-Technora, 4-E-staklo, 5-PEN, 6-PET, 7- celuloza, 8-PA66)  
b) kemijska postojanost aramidnih vlakana



**Slika 2.8.** Usporedba prekidnih duljina niti loma u neopterećenom stanju [6]



### 2.2.2. Uporaba aramida <sup>[6]</sup>

Aramidna vlakna, štapeli i pulpa najčešće se rabe kao ojačavala za kompozitne tvorevine. U kombinaciji s polimernom matricom mogu se dobiti proizvodi vrhunskih mehaničkih, kemijskih i toplinskih svojstava. Takvi se proizvodi primjenjuju u industriji zrakoplova, automobila i brodova, građevinarstvu itd. Najprepoznatljivije područje primjene aramidnih vlakana je protubalistička zaštita. Vlakna se primjenjuju za izradu različitih tipova raznih oblika protubalističke zaštite ljudi, vozila i objekata. Vrlo važnu primjenu aramidna vlakna pronašla su u industriji gumenih proizvoda. Gumeni pneumatici, brtve i remenje samo su neki proizvodi u kojima se aramidna vlakna koriste kao ojačavala. Posebne vrste konopa i kabela, posebno optički kabela, također se izrađuju i ojačavaju aramidnim vlaknima. Tako se kabela signalne željezničke instalacije ojačavaju aramidnim vlaknima iz dva razloga. Prvi je da se poveća rastezna čvrstoća samoga kabela, a drugi je da se smanji vjerojatnost da će kabele oštetiti lovci koji gađaju ptice koje se često odmaraju upravo na tim kabelima uz pruge.

Aramidna vlakna zbog dobrih mehaničkih i kemijskih svojstava imaju golem tržišni potencijal i široku primjenu u svim granama ljudske djelatnosti. No njihova veća primjena tek počinje. Razlog slabije primjenjivosti aramidnih vlakana u prošlosti dijelom se krije u činjenici da je postupak proizvodnje aramidnih vlakana izrazito složen i obuhvaćen mnogim patentnim rješenjima, pa mu je i cijena visoka. Također je važno napomenuti da se o trajnosti, a time i pouzdanosti svojstava umjetnina načinjenih od aramidnih vlakana još ne zna dovoljno. Međutim uza sve to aramidna vlakna zauzimaju jedno od vodećih mjesta na ljestvici ojačavala kompozitnih tvorevina.

### 2.2.3. Tkana aramidna vlakna <sup>[5]</sup>

Tkanje vlakana u tkanine je tehnologija razvijena u ranim fazama ljudske civilizacije. Međutim, ova tehnologija je poboljšana pomoću automatskih strojeva za tkanje. Oštećenja vlakana u operaciji tkanja su svedena na minimum zbog niza modifikacija u svakoj fazi, gdje vlakna dolaze u kontakt s tkalačkim strojem. Unatoč svim ovim prednostima, vlakna su obično upletena, a neka su i oštećena prilikom tkanja. U tipičnom tkanju, vlakna se uviju prije tkanja. Uvijanje vlakana smanjuje „fiber-to-fiber“ nasjedanje vlakana, tako održavajući fizikalna svojstva vlakana. Međutim, uvijanje smanjuje razvlačenje pojedine niti u snopu vlakana kod prodiranja projektila. Tkanine koje se koriste za fleksibilne oklope dodatno se obrađuju kako bi se uklonile sve nečistoće nastale kod tkanja.



*Slika 2.9. Tkana mreža vlakana [5]*

Ovaj proces se naziva „ribanje“ tkanine. Nakon što je tkanina „izribana“ može se primijeniti vodonepropusna prevlaka. To je bitno kod aramidnih tkanina, jer vlaga ne prodire u tkaninu i tako se ne smanjuje balistički otpor tkanine.

Balistički i tekstilni inženjeri su se udružili kako bi se postigla veća zaštitna svojstva oklopa od tkanog materijala. Performanse tkanog oklopnog materijala mogu se povećati korištenjem različitih varijacija tkanja, ograničavanjem ili uklanjanjem uvijanih vlakana, novim konstrukcijama tkanine i šivanjem vlakana u oklop. Jednostavna tkana tkanina je prikazana na slici 2.9.. Sastoji se od niza pređenih niti u osnovnom smjeru i niza pređenih niti u tkanom smjeru ili smjeru ispunjavanja. Osnovno pređenje leži u smjeru dužine (strojno) tkanine, a tkano ili punjeno pređenje leži u poprečnom smjeru tkanine.

Postoje različite varijacije stilova tkanja koje se mogu koristiti za preplitanje niti osnovnim i tkanim smjerom, kako bi se dobila prikladna zaštitna tkanina.

Balističke osobine tkanine zavise o:

1. Fizičkim svojstvima balističkih vlakana,
2. Deniera (duljinska masa) vlakana u osnovnom i tkanom smjeru,
3. Razini uvijanosti niti,
4. Dizanju tkanja tkanine,
5. Oštećenja tkanine tokom tkanja,
6. Operacijama poslije tkanja.

Nedavno je razvijena nova vrsta izrade koja poboljšava zaštitna svojstva tkanine. U novoj tehnologiji upotrebljava se mala količina ljepila koja povećava interakciju projektil – na – tkaninu, a u nekim slučajevima se, određenim koracima, kalandrira tkanina sa ili bez utiskivanja tankog filma.

#### 2.2.4. Ne – tkana aramidna vlakna <sup>[5]</sup>

Evolucija laganih balističkih materijala u posljednjih deset do petnaest godina je pokrenula izum lakših i jačih umjetnih vlakana i sastavljanje tih vlakna u jednoj orijentaciji izbjegavajući savijanje i uvijanje vlakana tijekom operacije tkanja.

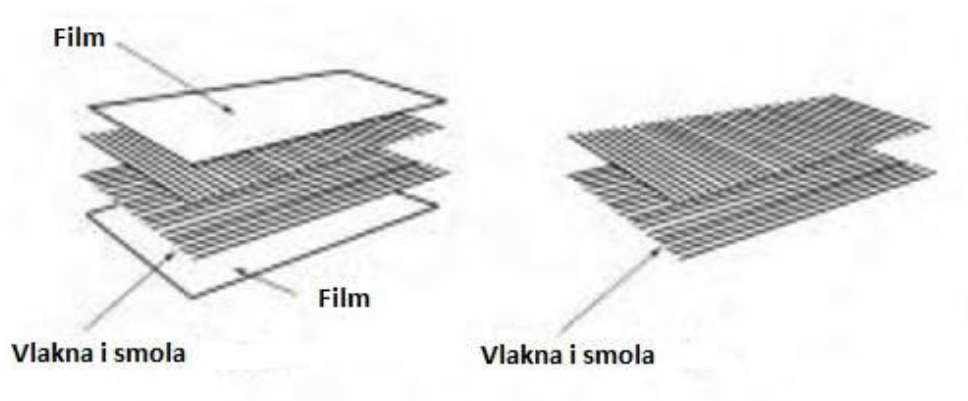
Postoji niz novih tehnologija u području tradicionalno tkanih zaštitnih materijala kojima se unapređuje i povećava interakcija projektila s balističkim materijalima. Međutim, ne – tkani lagani oklopni materijali proizvedeni s Honeywell jedinstvenom patentiranom tehnologijom, imaju bolje balističke performanse u odnosu na tkane materijale.

U ovoj patentiranoj tehnologiji balistička vlakna su poravnata međusobno paralelno, slično kao i kod tkanih tkanina, a zatim se veziva ili smole priljepljuju u obliku kontinuirane mreže poravnatih vlakana. Mreža drži razmak vlakana za daljnju obradu. Mreža usklađenih vlakana stavlja se (slika 2.10.) na 90 stupnjeva, da se formira kontinuirana rola. Mreže sastavljene pod 0 stupnjeva i 90 stupnjeva formiraju jednosmjernu križanu rolu proizvoda. Proizvod, razvijen sa ovom

tehnologijom, primjenjiv je na sve tipove kontinuiranih balističkih vlakana, visokih preformansi, kao što su HMPE vlakana, aramidna vlakna i PBO vlakna.

Balističke osobine ne-tkanih, jednosmjerno križanih balističkih materijala ovise o:

1. Fizičkim svojstvima balističkih vlakana,
2. Deniera (duljinska masa) vlakana,
3. Broju isprepletenih vlakana,
4. Širenju vlakana na makro razini,
5. Vrsti smole,
6. Količini smole,
7. Vezi između smole i vlakana.



*Slika 2.10. Ne-tkana mreža vlakana [5]*

Oklopni proizvodi sada mogu biti projektirani od 100% ne-tkanog jednosmjerno križanog materijala, odnosno od 100% tkanog materijala ili kombinacijom više vrste materijala sa boljim balističkim svojstvima uz zadržanu najnižu moguću težinu.

## 2.3. NIJ standard 0101.04 <sup>[5]</sup>

### Nacionalni institut za pravdu: NIJ standard 0101.04 (SAD)

Jedan od najviše korištenih standarda u SAD-u, Nacionalnom institutu za pravosuđe (The National Institute of Justice). NIJ standard 00101.04 je izdan u rujnu 2000. godine. Od svog predstavljanja bio je korišten kao referenca za mnogobrojne zemlje Južne Amerike, Europe i Azije.

Standard uspostavlja minimalne zahtjevene performanse i metode ispitivanja za balistički otpor osobnih oklopa, za tijelo za zaštitu ljudskog torza, protiv projektila ispaljenih iz vatrenog oružja, pištolja i pušaka. Standard također utvrđuje kriterije za prihvaćanje oklopa u smislu označavanja, slijeda ispitivanja, izrade i savitljivosti.

Balistički otpor oklopa u ovom standardu svrstava se u sedam razina. Tipovi *I*, *IIA*, *II* i *III A* označavaju razinu zaštite od projektila ispaljenog iz pištolja. Tipovi *III* i *IV*, štite od „high-powered“ projektila ispaljenih iz pušaka i upotrebljavaju se jedino u taktičkim situacijama (tablica 2.3. i tablica 2.4.).

Uzorci oklopa za NIJ razine *I*, *IIA*, *II* i *IIA* ispituju se nakon 12 sati skladištenja u uvjetima za ispitivanje (21°C, 50% relativne vlažnosti) i u mokrim uvjetima kako je određeno NIJ Standardom 0101.04.

**Tablica 2.3.** NIJ razine zaštite [5]

Tip oklopa	Test runda	Testni projektl	Težina projektila (g)	Referentna brzina ( $\pm 30$ m/s) (m/s)	Udaraca po oklopu pod kutom upada 0°	Max. dubina prodiranja (mm)	Udaraca po oklopu pod kutom upada 30°	Hitaca po ploči	Hitaca po uzorku	Ukupno hitaca
I	1	.22kalibar	2,6	329	4	44	2	6	12	48
	2	.380 ACP	6,2	322	4	44	2	6	12	
IIA	1	9 mm	8,0	341	4	44	2	6	12	48
	2	40 S&W	11,7	322	4	44	2	6	12	
II	1	9 mm	8,0	367	4	44	2	6	12	48
	2	357 Mag.	10,2	436	4	44	2	6	12	
IIIA	1	9 mm	8,2	436	4	44	2	6	12	48
	2	44 Mag.	15,6	436	4	44	2	6	12	
III	1	7,62 mm	9,6	838	6	44	0	6	12	12
IV	1	.30kalibar	10,8	869	1	44	0	1	2	2
Specijalno	-	-	-	-	-	44	-	-	-	-

Ploča = Prednja ili stražnja ploča oklopa; Uzorak = Cijeli oklop, uključujući sve komponente;

**Tablica 2.4. Veličine projektila i njihove brzine [5]**

Klasa opasnosti	Kalibar	Streljivo	Težina metka (g)	Brzina (m/s)
HG – 1 Laki pištolj	9 mm	9 mm FJM Dynamit Nobel	8,0	360 ± 10
	0,357'' Magnum	Norma Meka točka ravnog vrha	10,2	385 ± 10
HG – 2 Teški pištolj/ Karbina	9 mm	9 mm FJM Dynamit Nobel	8,0	425 ± 10
	0,357'' Magnum	Norma Meka točka ravnog vrha	10,2	450 ± 10
	0,44'' Magnum	Remington Meka točka ravnog vrha	15,6	440 ± 10
RF1 Puška	7,62 mm	Royal Ordnance Nato kugla	9,3	830 ± 10
SG1 Sačmarica	Sačma Kalibar 12	Winchester 1 oz Olovno zrno	28,4	435 ± 10

## 2.4. Stanag standard 2920 [5]

### Sporazum NATO standardizacija, balistička test-metoda za tjelesne oklope

Cilj ovog standarda je standardizirati smjernice za određivanje balističkih granica zaštite tjelesnih oklopa, kaciga i materijala koji se koriste u proizvodnji tih predmeta. Standard je namijenjen za pokrivanje ispitivanja i usporedbu probijanja balističkih materijala od metaka malih (ručnih) oružja i simuliranih fragmentnih projektila (šrapnela).

#### 2.4.1. Metoda ispitivanja [5]

Uvjeti za testiranje oklopnog materijala moraju biti u skladu s ISO 554-1976. Temperatura  $20 \pm 2$  °C i relativna vlažnost  $65 \pm 5$  %. Najmanje šest projektila mora biti pušteno na oklop i njihova brzina mora biti mjerena. Samo pogodeni projektili će biti uključeni u testiranje, koji su pogodili oklop pod određenim kutom, manjim od 5° na normalu. Udarac se mora ostvariti sa udaljenosti veće od 30 mm od steznih i pričvrstnih točaka, rubova, prethodnih udara, deformacija ili poremećaja materijala. Na tkanom tekstilu se dva projektila ne smiju ispaliti na istu pređu (liniju isprepletenih niti).

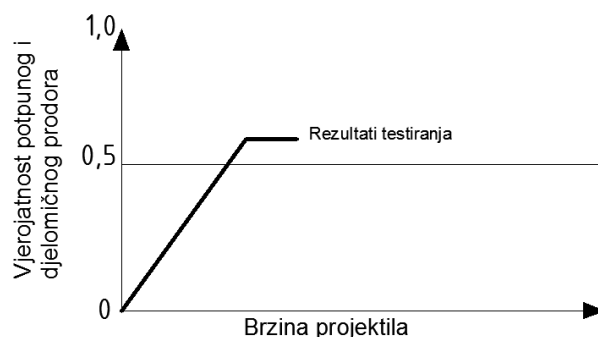
Svaki projektil koji prođe kroz materijal ili ga materijal zadrži na samom izlazu (većina projektila je prošla kroz materijal) smatra se kao potpuni prodor. Svi ostali udarci smatraju se kao djelomični prodor.

## 2.5. Balistička granica V50 <sup>[5]</sup>

### V50 testiranje

V50 testiranje je jedna od četiriju metoda ispitivanja koja se koristi kako bi se utvrdila vjerojatnost prodora balistički otpornih materijala, koji su izloženi za ispitivanje - ne nužno oklopa - koji se koristi u jednom ispitivanju, od nemjerljive reakcije do stimulirane varijable; tj. hoće li se šibica zapaliti ili ne, osigurač funkcionira ili ne, itd. Višestruki identični ispitni uzorci podvrgnuti su promjenjivim podražajima, „go/no-go“ rezultatima, koji se koriste za uspostavljanje krivulja sa „go/no-go“ rezultatima s obzirom na cijeli niz stimuliranih varijabli. Ovi postupci se često koriste u utvrđivanju vjerojatnosti prodora oklopnog materijala kao funkcije brzine projektila (slika 2.11.). Prilagodba ove metode za procjenu balistički otpornih materijala je, uglavnom, nepraktična i daje samo akademske vrijednosti. Precizna kontrola stimulacije - u slučaju testiranja oklopa gdje je stimulacija brzina projektila - predodređene vrijednosti je uvjet koji se ne može postići bez suvišnih i skupih troškova streljiva i uzorka oklopa.

V50 balističko ograničenje materijala ili oklopa je definirano kao brzina za koju je vjerojatnost prodiranja odabranih projektila točno 0,5. To će se postići „up and down firing“ metodom mijenjajući količinu pogonskog plina koji će generirati povećanje ili smanjenje brzine za 30 m/s. Brzine projektila koje ulaze u balističko ograničenje po V50 biti će tri najviše sa potpunom i djelomičnom penetracijom u razmaku od  $\pm 40$  m/s, odnosno pet najviših sa potpunom i djelomičnom penetracijom u razmaku od  $\pm 50$  m/s, odnosno sedam najviših sa potpunom i djelomičnom penetracijom u razmaku od  $\pm 60$  m/s.



*Slika 2.11. Utvrđivanje granice V50 [5]*

### 3. PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu završnog rada provodi se ispitivanje utjecaja temperature prešanja aramidnih ploča na njihovu V50 brzinu zadržavanja ispaljenih projektila (šrapnela). Ispitivanje se vrši u ispitnom laboratoriju, gdje se na prethodno prešane aramidne ploče na različitim temperaturama, uz isti pritisak i režim prešanja, ispaljuju projektili različitih brzina.

Za provedbu eksperimenta koristi se:

- Aramidno vlakno – izrezano i sastavljeno u 19 slojeva,
- Preša,
- Temperiralo,
- Kalup,
- Mjerni uređaji – za mjerenje temperature kalupa, pritiska preše, debljine prešanih ploča, brzine ispaljenog projektila te mase baruta i
- Ispitni laboratorij – projektili, držači te osobna zaštita.

#### 3.1. Preša

Preša (slika 3.1.) koristi se za prešanje aramidnih slojeva, sedam minutnim procesom prešanja na različitim pritiscima uz proces odzračivanja, EBSP postupkom, razvijenim u tvrtci Šestan-Busch d.o.o..

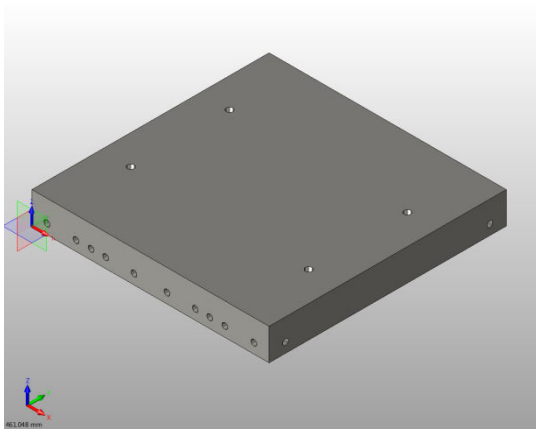


*Slika 3.1. Preša sa kalupom*

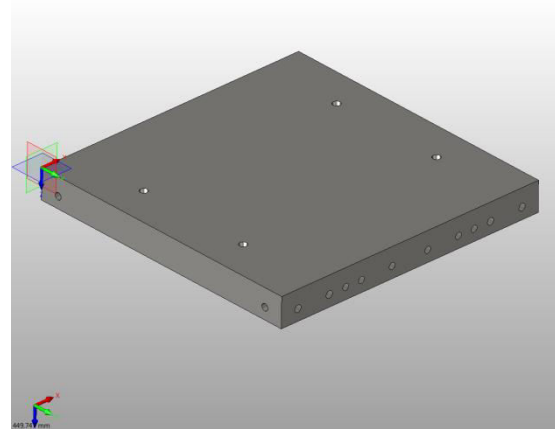


## 3.2. Kalup

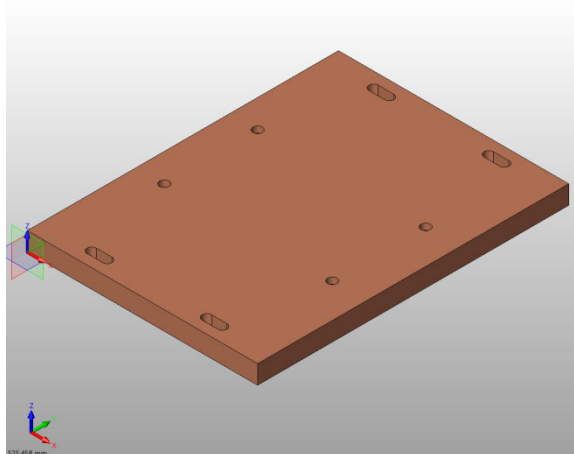
Koriste se gornji (slika 3.2.) i donji (slika 3.3.) kalup te dvije izolacijske ploče (slika 3.4.). Oba kalupa izrađena su od alatnog čelika (S18-0-1) sa kanalima za strujanje vrućeg ulja. Kod sastavljanja kalupa, montira se ulazni ventil na jednoj strani, a izlazni na drugoj strani kalupa. Na drugom kalupu, ventili su izmijenjeni radi postizanja što ujednačenije optimalne temperature prešanja po cijeloj površini kalupa. Izolacijske ploče izađene su iz poliamidnog materijala (PA66\_30%GF), a koriste se i montiraju između kalupa i preše zbog što manjeg gubitka topline potrebne za prešanje.



*Slika 3.2. Gornji kalup*



*Slika 3.3. Donji kalup*

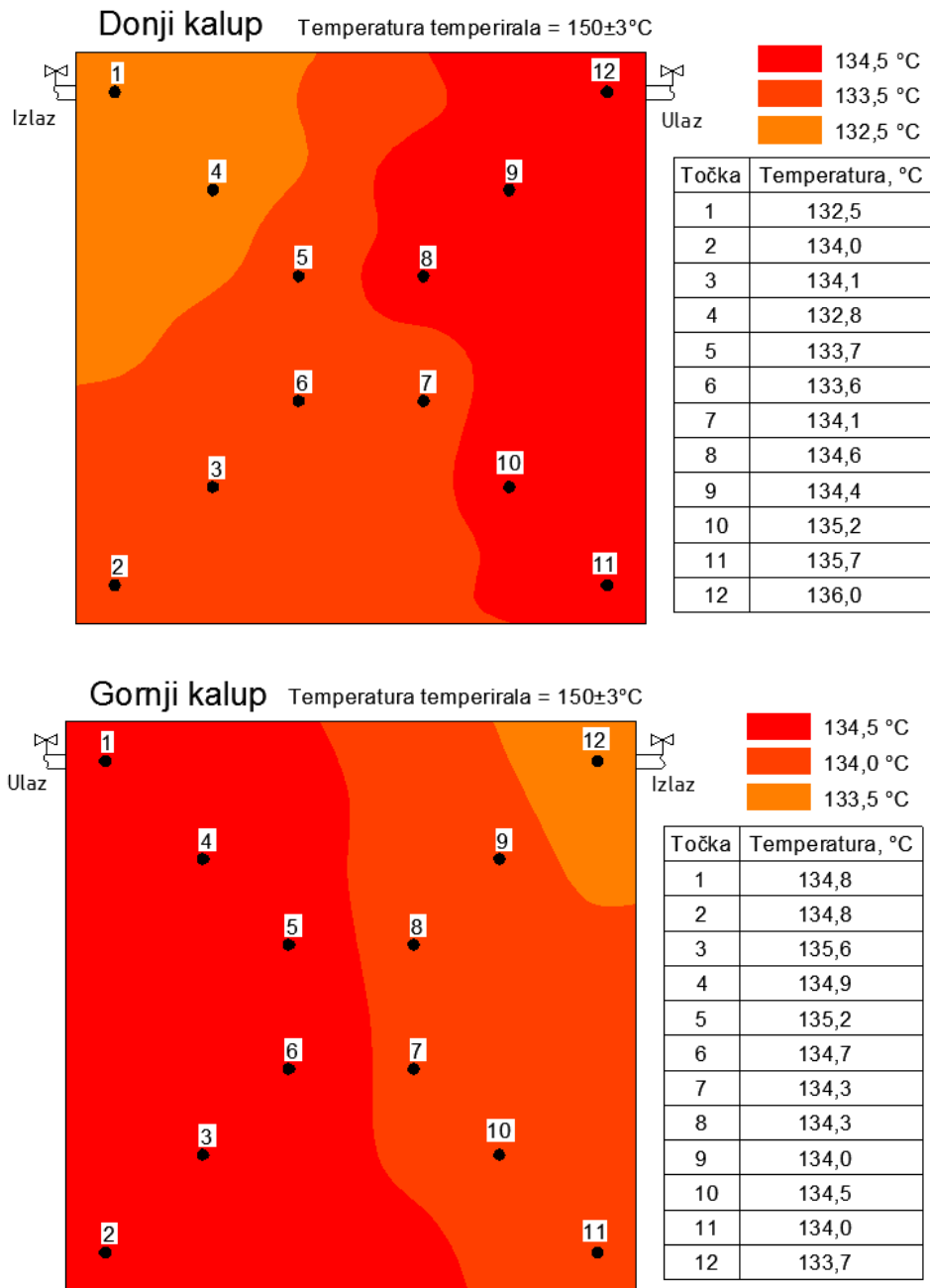


*Slika 3.4. Izolacijska ploča*

Radionički crteži i sklopni crtež nalaze se u Prilogu 1.

### 3.3. Temperiralo

Temperiralo je uređaj za zagrijavanje i pumpanje (tj. strujanje) ulja u kalupe. Mjerenjem temperature ulja na izlazu iz temperirala i na samoj površini prešanja na kalupu, ustanovljeno je da dolazi do gubitka topline kroz cijevi kojima se ulje dovodi. Temperatura izmjerena na temperiralu je  $150 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , dok je na kalupima izmjerena srednja temperatura od  $134 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Slika 3.5. Promjena temperature na površini kalupa

Iz slike 3.5. vidljiva je promjena temperature površine kalupa od ulaza ulja do izlaza. Zamjenom mjesta ulaza i izlaza na gornjem i donjem kalupu, dobiva se ujednačenija temperatura prešanja na lijevoj i na desnoj strani kod zatvaranja kalupa, tj. kod početka prešanja.

Velikim gubitkom topline preko dovodnih cijevi pa samim time i velikom razlikom temperature temperirala i kalupa, potrebno je namještanje temperature ulja na temperiralu. Pokusnom metodom odrede se temperature temperirala potrebne za prešanje šest ploča određenih temperatura (tablica 3.1.).

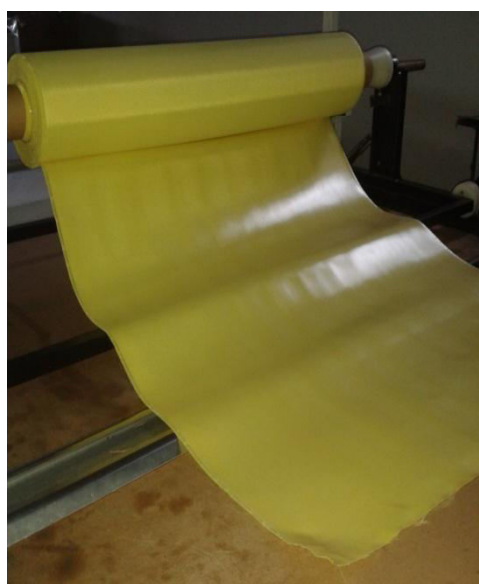
*Tablica 3.1. Temperature temperirala*

Potrebna temperatura prešanja, °C	Temperatura temperirala, °C
150	164
160	175
170	188
180	201
190	210
200	222

### 3.4. Aramidne ploče

Iz aramidne role (slika 3.6.) reže se po devetnaest (19) slojeva aramida na određene dimenzije i slaže u aramidne ploče (sloj na sloj). Za ispitivanje se koristi šest ploča istih dimenzija i različitih temperatura prešanja.

Dimenzije izrezanih, sirovih ploča su 500 mm x 500 mm sa 19 slojeva, a masa pojedine ploče je 2,230 kg.



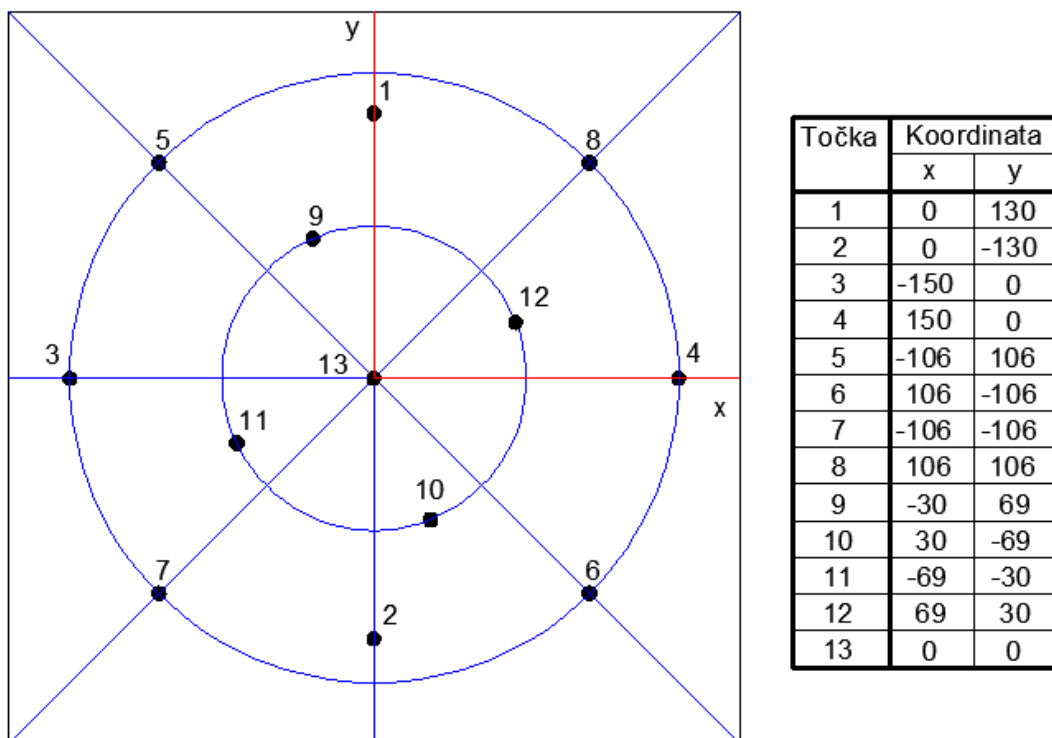
*Slika 3.6. Rola aramida*

## 4. REZULTATI

### 4.1. Prešane ploče

Ploče prešane EBSPP postupkom prešanja na različitim temperaturama imaju masu od 2,210 kg (500 mm x 500 mm x 19 slojeva). Mala razlika u masi (0,02 kg), prije i nakon prešanja, događa se zbog otapanja i isparavanja male količine smole koja na određenim temperaturama reagira s vlaknima te se spajaju u čvrsti spoj. Na različitim temperaturama, smola drugačije reagira. Zbog toga se provodi ispitivanje utjecaja temperature prešanja. Ploče se prešaju na temperaturama od 150, 160, 170, 180, 190 i 200 °C.

Prije testiranja, prešane ploče režu se na dimenzije 360 mm x 360 mm i na njima se ucrtava 13 ispitnih točaka. Inače, točke se proizvoljno odabiru, ali zbog isključivanja faktora nepravilnosti kalupa i preše, točke su zacrtane na svakoj ploči na određenom mjestu (slika 4.1.), radi bolje usporedbe dobivenih rezultata.



*Slika 4.1. Točke testiranja i koordinate u mm*

Na zacrtanim mjestima rade se daljnja ispitivanja ploča.

#### 4.1.1. Debljine ploča

Na naznačenim mjestima za testiranje mjeri se debljina prešanih ploča. Iz tablice 4.1. vidljivo je da su male razlike između debljine prešanih ploča na različitim temperaturama.

*Tablica 4.1. Debljine ploča*

Debljine ploča [mm]						
Točka	Temperature prešanja					
	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C	200°C
1	7,62	7,54	7,48	7,51	7,49	7,51
2	7,25	7,20	7,14	7,16	7,11	7,10
3	7,52	7,46	7,41	7,33	7,38	7,46
4	7,36	7,28	7,24	7,24	7,21	7,24
5	7,58	7,54	7,54	7,49	7,47	7,51
6	7,26	7,22	7,17	7,18	7,13	7,11
7	7,34	7,28	7,19	7,19	7,24	7,20
8	7,51	7,44	7,39	7,42	7,35	7,41
9	7,59	7,49	7,44	7,43	7,40	7,44
10	7,38	7,31	7,25	7,25	7,27	7,21
11	7,50	7,46	7,36	7,37	7,32	7,31
12	7,50	7,39	7,33	7,31	7,33	7,35
13	7,52	7,42	7,31	7,41	7,35	7,34

Razlika debljine između najdebljeg i najtanjeg ispitnog mjesta je 0,52 mm, a razlika debljine na jednom ispitnom mjestu je manja od 0,20 mm. Time se potvrđuje neznatan gubitak smole prilikom povećanja temperature tokom prešanja te neznatne deformacije.

## 4.2. Rezultati V50 ispitivanja

U ispitnom laboratoriju (slika 4.2.) vrši se ispitivanje prešanih ploča na brzinu V50 prodiranja. Pripremljene ploče se stežu na ispitno mjesto (slika 4.4.), a uređaj za mjerenje brzine projektila (slika 4.3.) stavlja se na 1,6 m ispred ispitne ploče i 0,8 m iza cijevi za ispaljivanje.



*Slika 4.3. Ispitni laboratorij*



*Slika 4.2. Brzinomjer i stegnuta ploča*



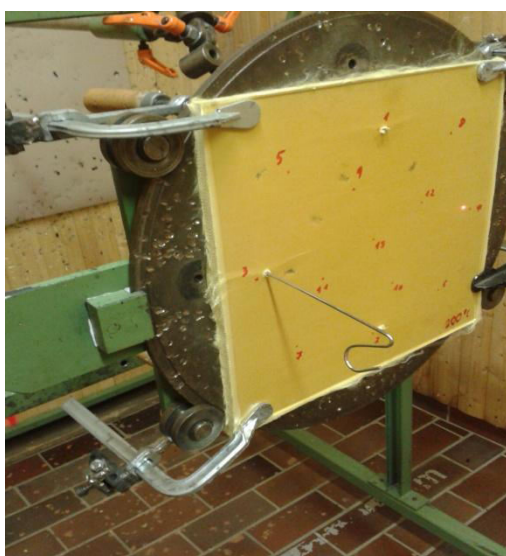
*Slika 4.4. Stezanje i namještanje ploče*



Promjenjivim punjenjem čahura ispitnih projektila, promjenom količine baruta u čahurama, dobivaju se različite brzine ispaljivanja projektila. Svaka ploča ima zacrtanih 13 ispitnih točaka, a za izračunavanje brzine V50 potrebne su tri brzine projektila koji su zadržani u ploči i 3 brzine projektila koji su probili ploču. Prodiranje projektila provjerava se nakon svakog hitca, vidom, opipom, a ako je potrebno i ispitnom iglom (slika 4.5. i slika 4.6.). Potrebno je najmanje 6 hitaca po ploči da bi se mogla izračunati V50 brzina, ali zbog što boljih rezultata ispaljuje ih se 7 ili više. U izračunavanje ulaze tri najmanje probijene brzine i tri najviše zadržane, s time da razlika između najmanje probijene i najviše zadržane ne smije biti veća od 40 m/s.



*Slika 4.5. Probijanje ploče*

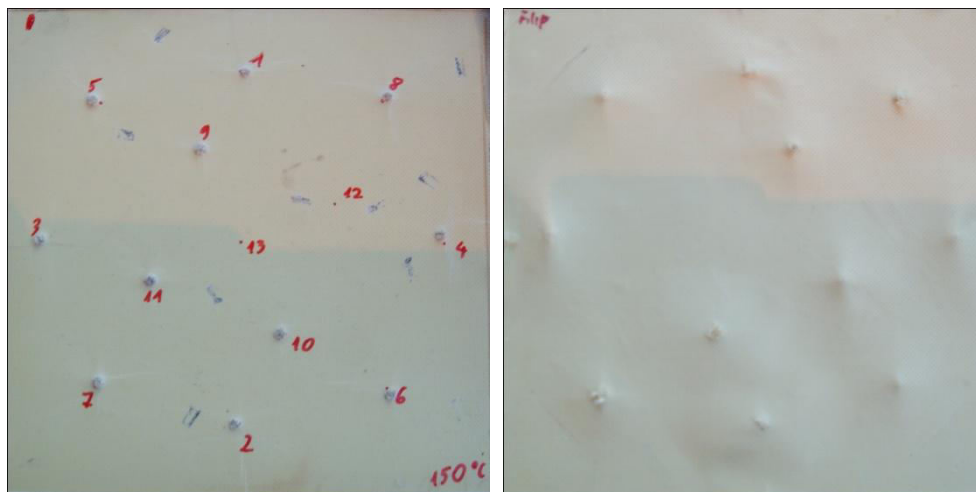


*Slika 4.6. Zadržavanje projektila*

Nakon dobivenih i odabranih brzina, izračunava se srednja brzina tih šest brzina. Za izračunavanje V50 brzine, srednjoj brzini se oduzima 2,7% brzine zbog udaljenosti uređaja za mjerenje brzine od ispitne ploče i zbog sigurnosti.

#### 4.2.1. Rezultati ploče 150

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 150 °C. Na slici 4.7. vidimo ispitivanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.7. Ispitana ploča 150*

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.2.

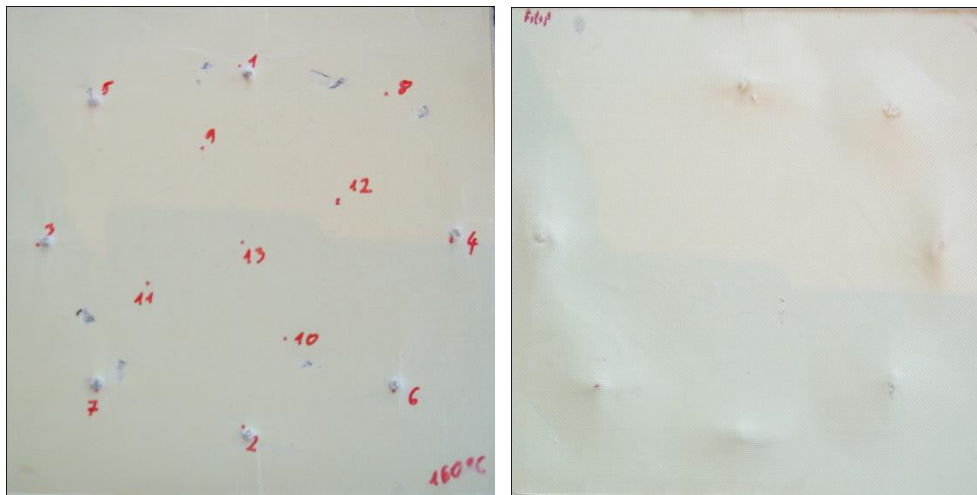
*Tablica 4.2. Rezultati ispitivanja ploče 150*

Minimalna probijena brzina, m/s	664,7
Maksimalna zadržana brzina, m/s	659,9
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	4,8
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	663,68
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>645,76</b>



#### 4.2.2. Rezultati ploče 160

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 160 °C. Na slici 4.8. vidimo ispitivanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.8. Ispitana ploča 160*

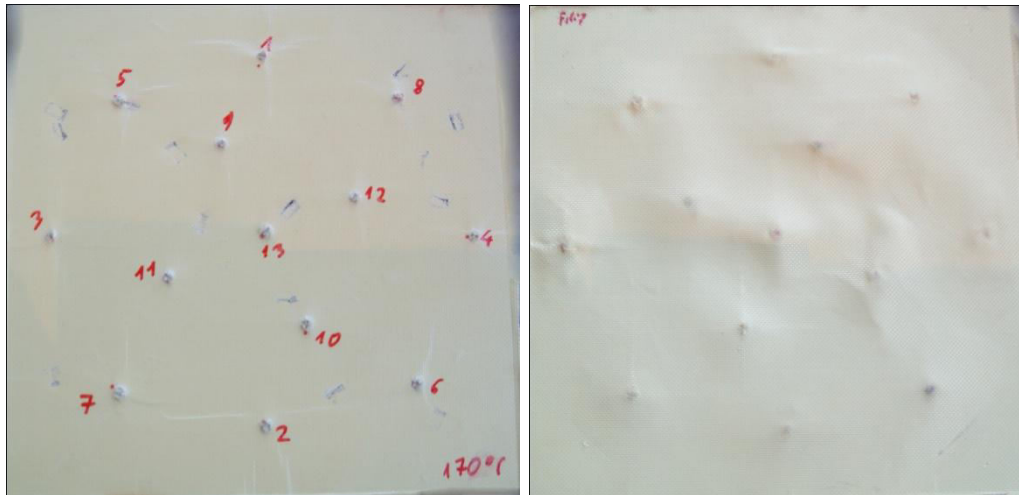
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.3.

*Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja ploče 160*

Minimalna probijena brzina, m/s	665,8
Maksimalna zadržana brzina, m/s	666,0
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	0,2
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	664,10
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>646,17</b>

#### 4.2.3. Rezultati ploče 170

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 170 °C. Na slici 4.9. vidimo ispitivanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.9. Ispitana ploča 170*

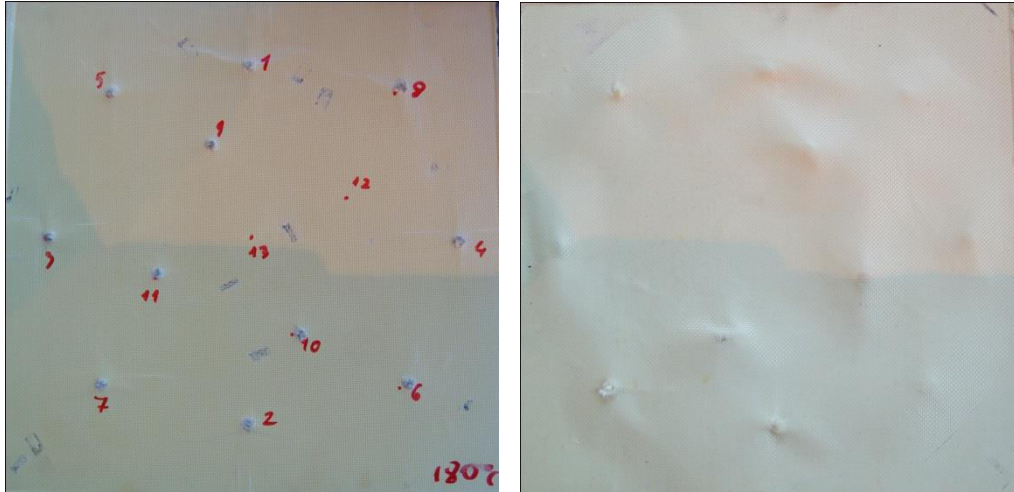
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.4.

*Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja ploče 170*

Minimalna probijena brzina, m/s	683,3
Maksimalna zadržana brzina, m/s	679,2
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	4,1
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	678,40
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>660.00</b>

#### 4.2.4. Rezultati ploče 180

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 180 °C. Na slici 4.10. vidimo ispitanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.10. Ispitana ploča 180*

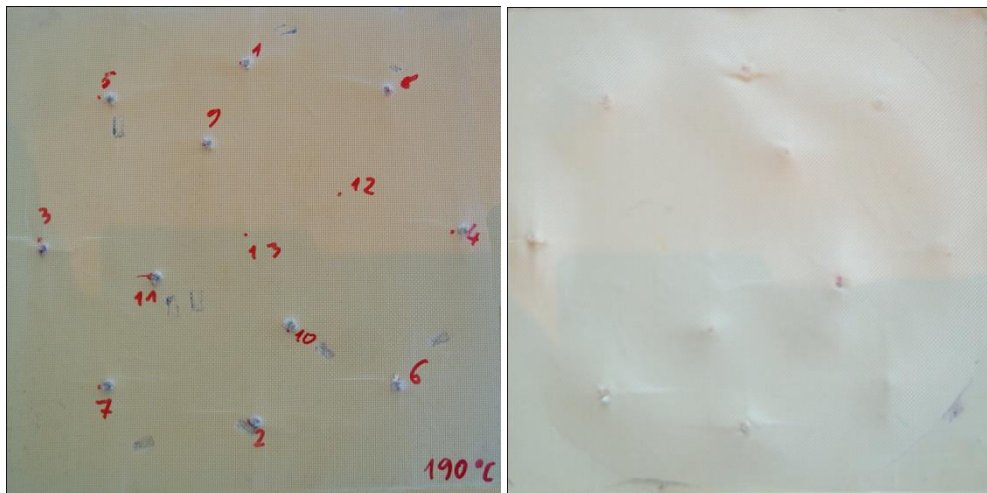
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.5.

*Tablica 4.5. Rezultati ispitivanja ploče 180*

Minimalna probijena brzina, m/s	683,0
Maksimalna zadržana brzina, m/s	677,9
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	5,1
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	677,90
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>659,59</b>

#### 4.2.5. Rezultati ploče 190

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 190 °C. Na slici 4.11. vidimo ispitanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.11. Ispitana ploča 190*

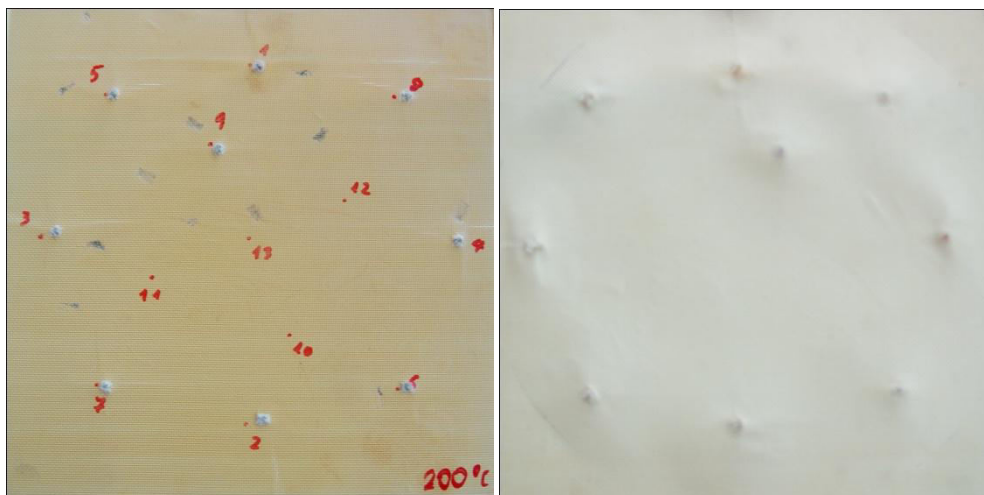
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.6.

*Tablica 4.6. Rezultati ispitivanja ploče 190*

Minimalna probijena brzina, m/s	665,1
Maksimalna zadržana brzina, m/s	684,6
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	19,5
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	672,33
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>654,20</b>

#### 4.2.6. Rezultati ploče 200

Rezultati V50 ispitivanja ispitne ploče prešane na temperaturi od 200 °C. Na slici 4.12. vidimo ispitanu ploču sa prednje i stražnje strane.



*Slika 4.12. Ispitana ploča 200*

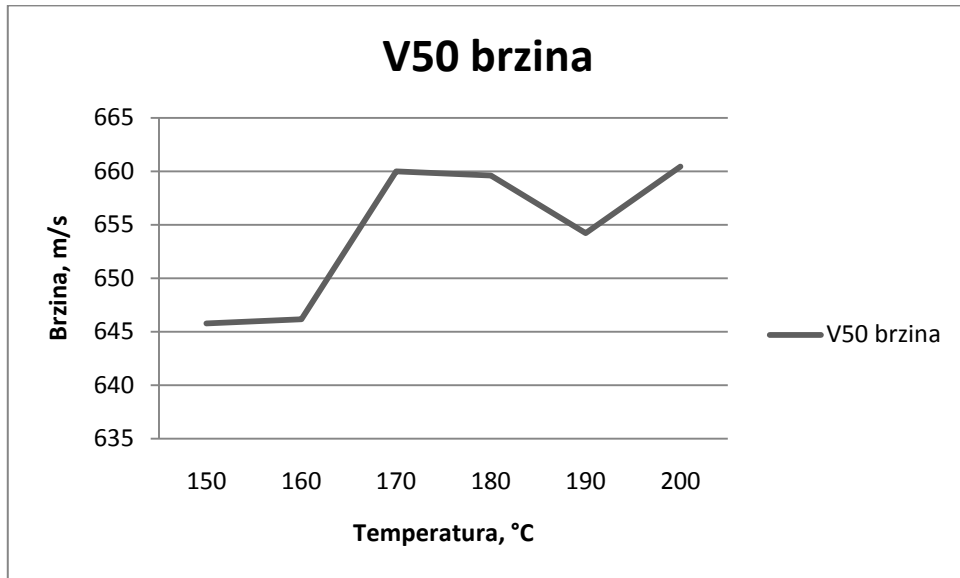
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.7.

*Tablica 4.7 Rezultati ispitivanja ploče 200*

Minimalna probijena brzina, m/s	685,8
Maksimalna zadržana brzina, m/s	672,1
Razlika, m/s (maksimalno 40 m/s)	13,7
Srednja brzina odabranih brzina, m/s	678,76
<b>Brzina V50, m/s</b>	<b>660,44</b>

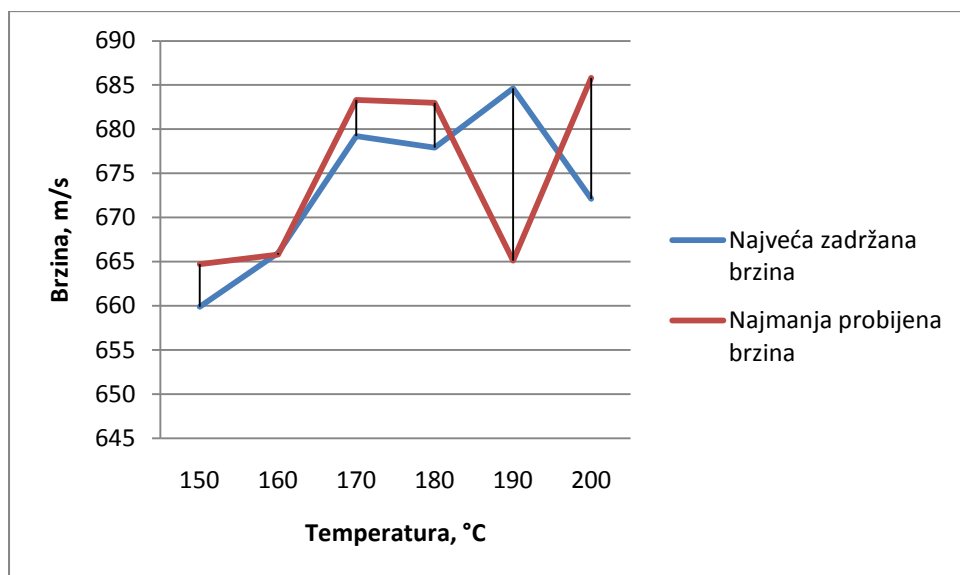
## 5. ANALIZA REZULTATA

Rezultati ispitivanja brzine V50 dijagramski su prikazani na slici 5.1.



*Slika 5.1. Dijagram brzine V50*

Iz dijagrama je vidljivo da su brzine V50 na temperaturama 150 °C i 160 °C znatno niže nego na ostalim ispitnim temperaturama. Na temperaturi 190 °C dolazi do manjeg pada brzine V50, ali je zadržana brzina znatno veća nego kod temperature od 200 °C, što je prikazano u dijagramu na slici 5.2.



*Slika 5.2. Dijagram zadržane i probijene brzine*

Iz dijagrama zadržane i probijene brzine vidljivo je da je najmanja probijena brzina na temperaturi 190 °C znatno niža od brzine na temperaturi 200 °C. Kod temperatura manjih od 170 °C postepeno raste brzina V50 i ne dolazi do neočekivanih razlika između probijene i zadržane brzine. Rezultati brzine V50 na temperaturama 170 °C i 180 °C su približno jednaki i znatno veći od rezultata na nižim temperaturama uz malu razliku između probijene i zadržane brzine. Na temperaturama višim od 180 °C brzine V50 se malo razlikuju, ali su razlike između probijene i zadržane brzine znatno veće nego na prethodnim temperaturama, tj. dolazi do oscilacija u brzinama.

Po dobivenim rezultatima i analizi, može se zaključiti da su optimalne temperature prešanja aramidnog vlakna, uz sedam minutni proces prešanja, između temperatura 170 °C i 180 °C.

## 6. ZAKLJUČAK

Rezultatima dobivenim ispitivanjem prešanih ploča na različitim temperaturama, dolazi se do zaključka da temperatura prešanja ima veliki utjecaj na veličinu brzine V50. U dijagramima pod točkom 5. prikazana je usporedba dobivenih rezultata V50. Prikazano je da kod određenih temperatura prešanja aramidna ploča drugačije reagira na ispitivanje. Vidi se da je kod manjih temperatura brzina V50 mala u odnosu na ostale, a kod visokih postoji velika razlika između zadržane i probijene brzine. Analizom rezultata dobiveno je da su temperature između 170 °C i 180 °C najbolje za prešanje aramidnih vlakana. To je veliki raspon između temperatura, ali se detaljnijim i preciznijim prešanjem i ispitivanjem može odrediti užu raspon između temperatura. Ali pošto je razlika brzine V50 na temperaturama 170 °C i 180 °C relativno mala (svega 0,41 m/s), može se zaključiti da je raspon temperature od 10 °C zadovoljavajuć.

Prilikom prešanja moglo je doći do grešaka, ali su se, zacrtavanjem ispitnih točaka na svakoj ploči na određenom mjestu, te greške svele na minimum.

Uzimanjem u obzir svih rezultata može se zaključiti da je utjecaj temperature prešanja aramidne ploče na V50 ispitivanje velik, a da je optimalna temperatura prešanja aramidnih vlakana između 170 °C i 180 °C.

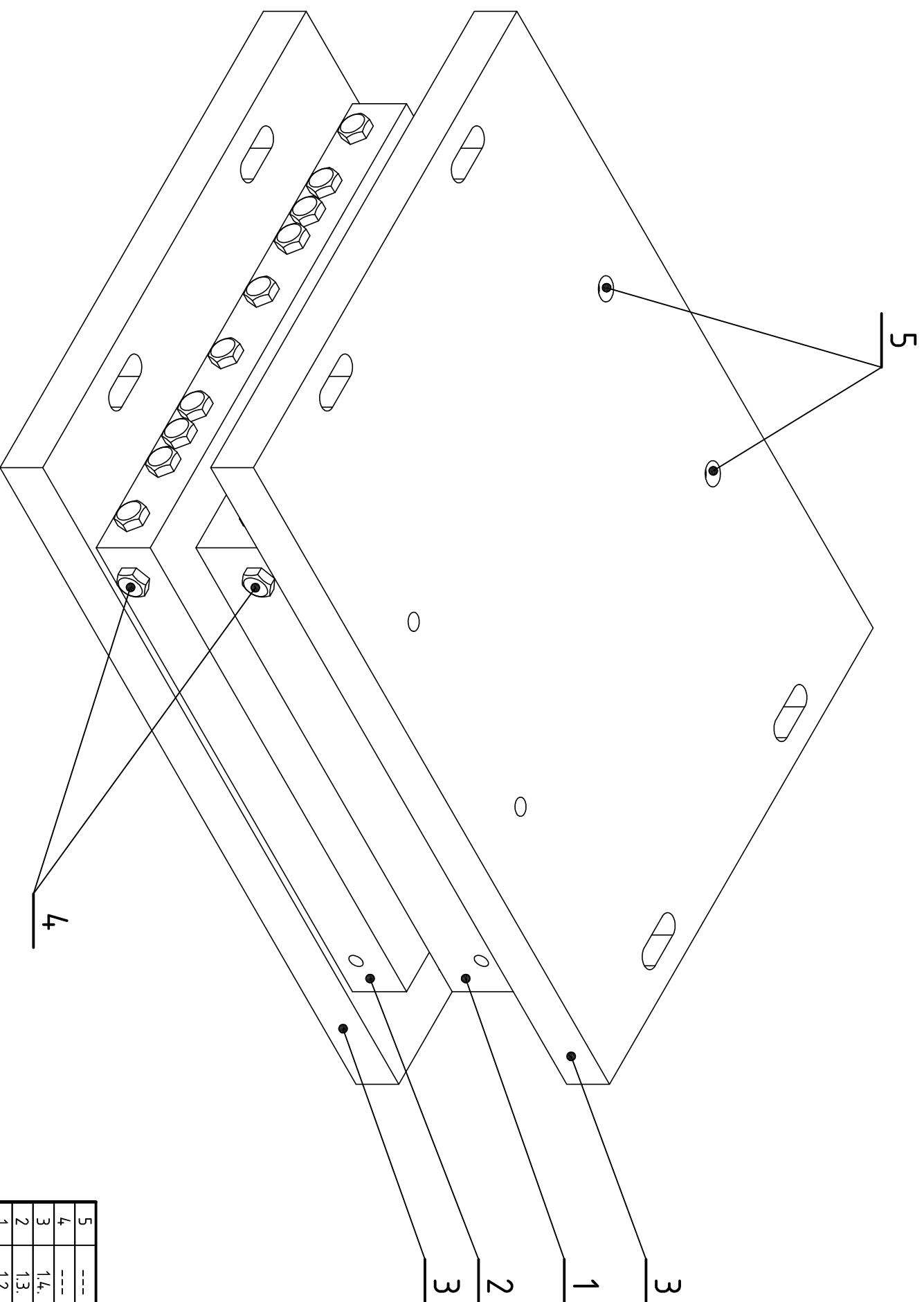


## 7. LITERATURA

- [1] <http://www.specijalac.net/pancirni-prsluci-zastita/>, svibanj 2015.
- [2] <http://www.teijinaramid.com/2013/09/new-twaron-t765/>, svibanj 2015.
- [3] <http://www.enciklopedija.hr/Balistika/>, svibanj 2015.
- [4] FSB Zagreb, *Komoziti*, Materijali II, Literatura za učenje, Zagreb, 2011.
- [5] A.Bhatnagar: *Lightweight Ballistic Composites for Military and Law - enforcement*, Applications-Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 2006.
- [6] J. Magdalenić Bujanić, B. Bujanić: *Aramidna vlakna*, Kategorizirani radovi, Polimeri, Stručni rad, Str. 130-134, Prelog, 2011.

## **8. PRILOG 1.**

- Sklop kalupa,
- Gornji kalup,
- Donji kalup i
- Izolacijska ploča

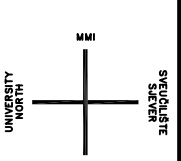


5	---	---	M12_30mm	8	Imbusni vijak
4	---	---	M18x1_18mm	4,4	Šesterokutna glava
3	1.4.	PA66_30%_GF	Izo. ploča	2	
2	1.3.	S18-0-1	Kalup donji	1	
1	1.2.	S18-0-1	Kalup gornji	1	

Poz. Crtež br.	Materijal	Masa	Naziv	Kol.	Napomena
Datum					
Ime i prezime					
Potpis					
Projektirao					
Razradio					
Crtao srpanj'15. Mesarić Filip					
Pregledao					

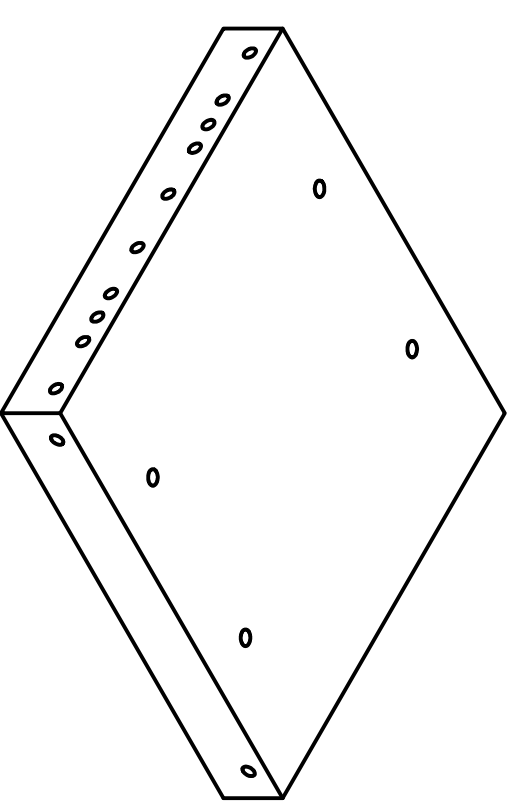
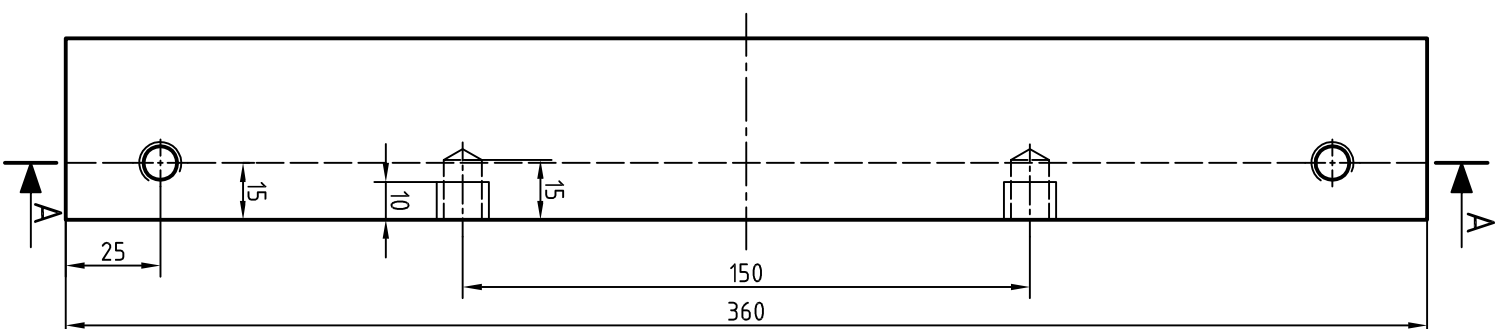
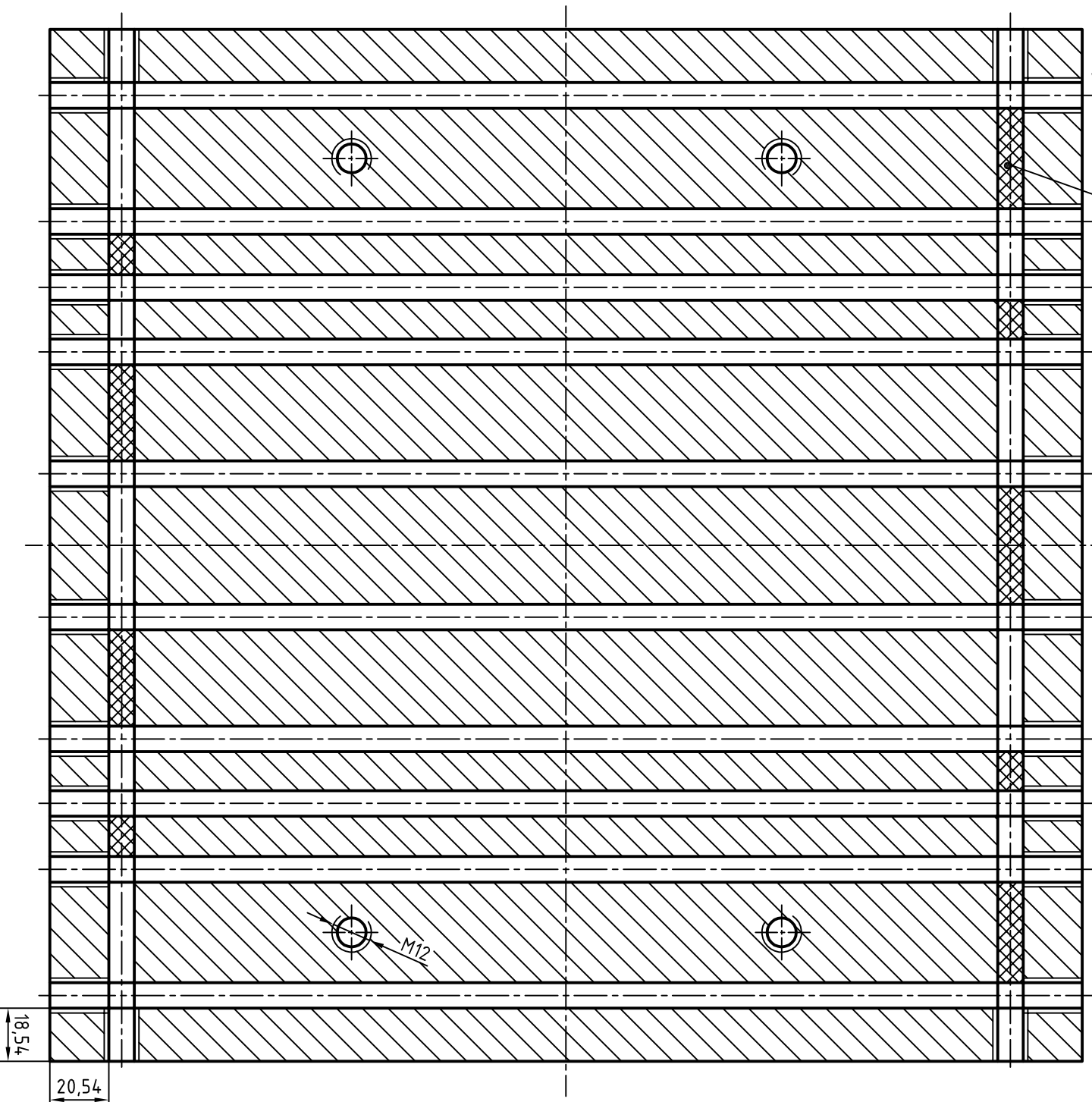
Objekt:		Objekt broji:	
Napomena:		R. N. broji:	
Materijal:		Kopija	
Masa:			

Naziv: <b>Sklop kalupa</b>		Pozicija:	
Mjerilo originala M 1:2		Format: A3	
Crtež broji: Prilog 1.		Listova: 4	
		List: 1	



Presjek A-A

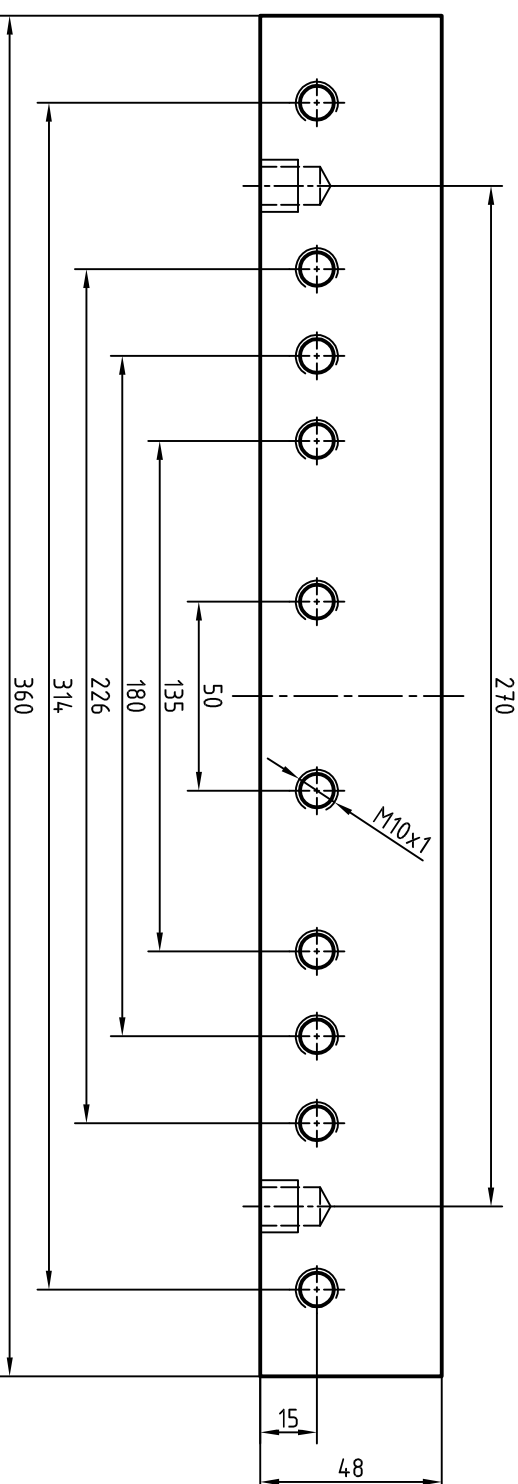
Zatiki



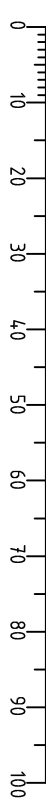
Izometrija M 1:5

Napomena: Zatnici se uprešavaju u  
uljne kanale  
Zatnici:  
 $\phi 10 \times 13 = 4$  kom.  
 $\phi 10 \times 35 = 4$  kom.  
 $\phi 10 \times 45 = 1$  kom.

Ra 3.2

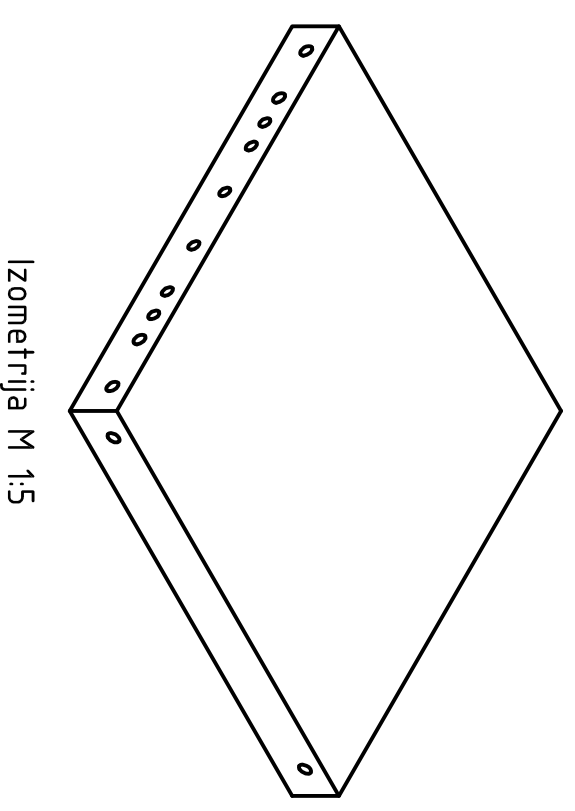
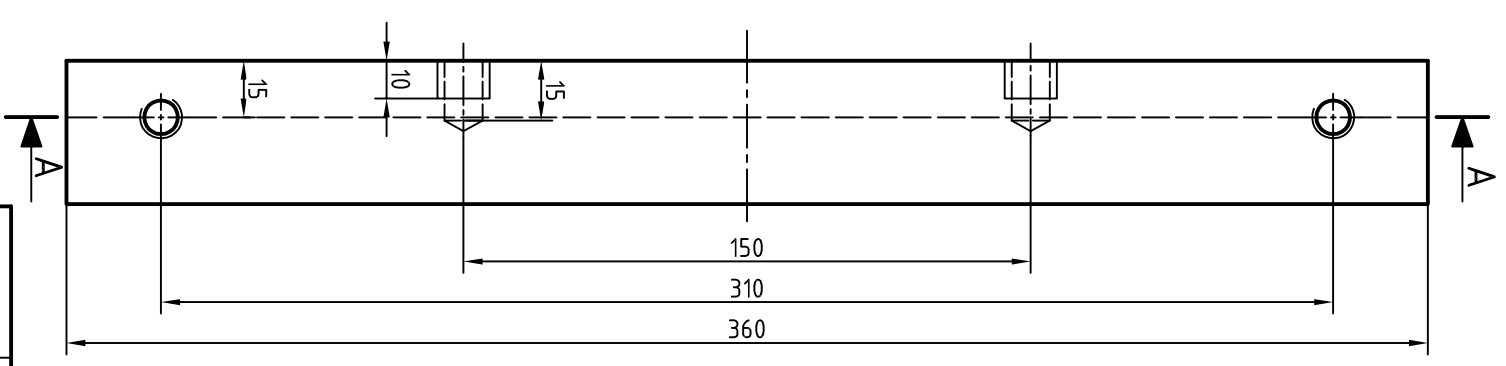
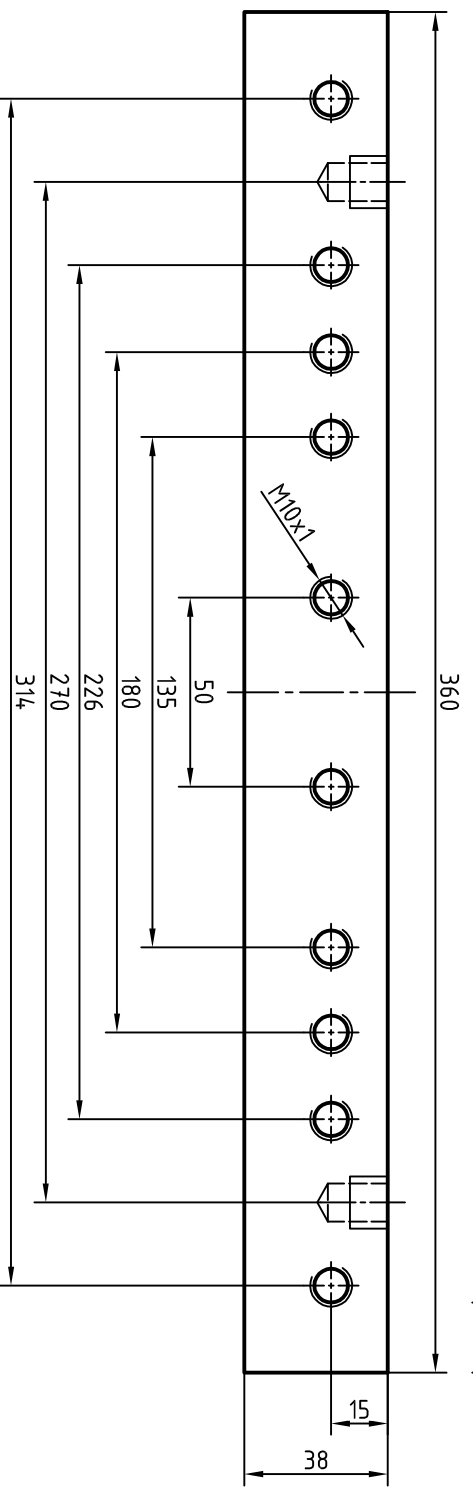
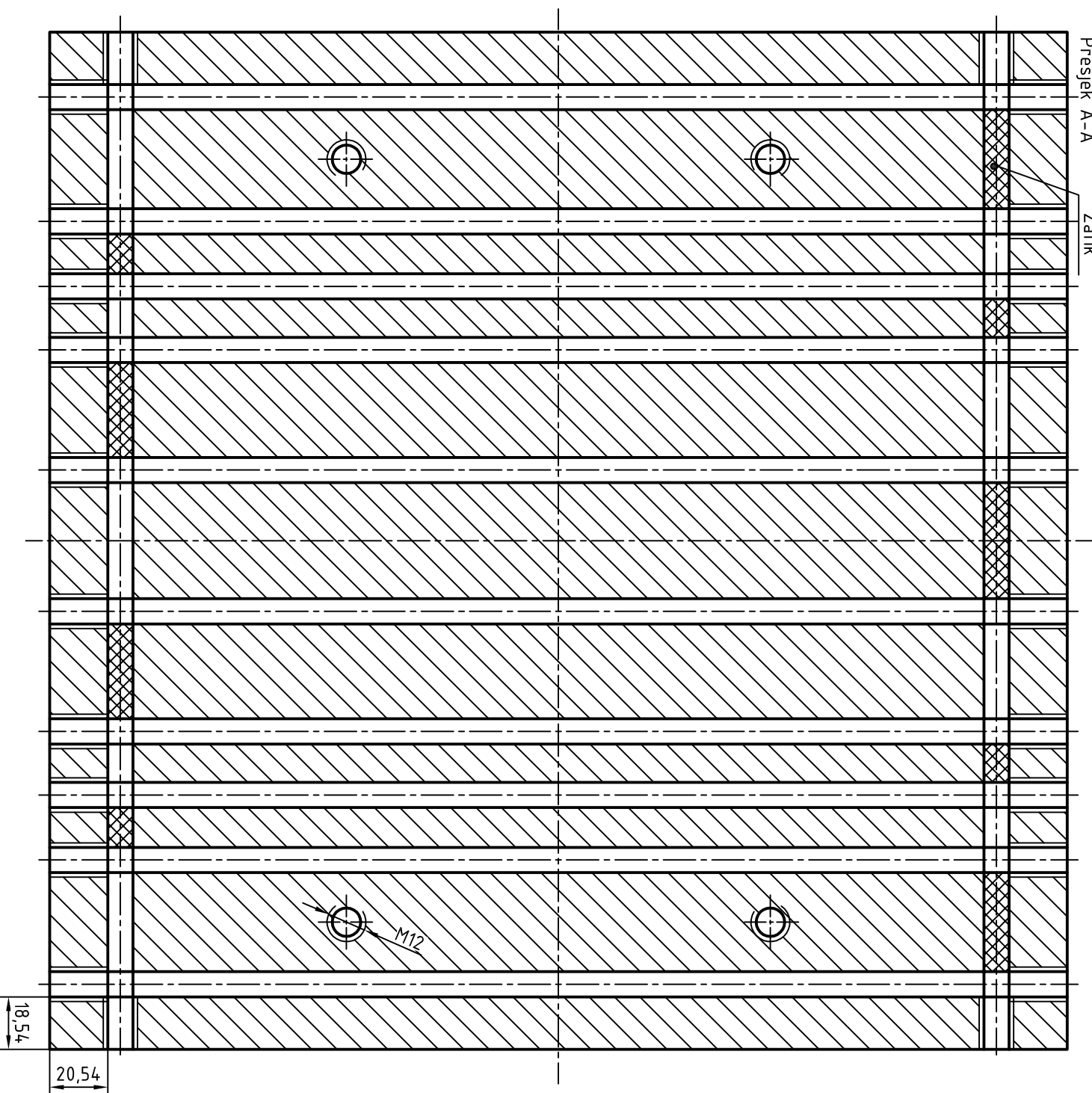


Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
Razradio			
Crtao	srpanj'15.	Mesarić Filip	
Pregledao			
Objekt:	Objekt broji:		
Napomena:	R. N. broji:		
Materijal: S18-0-1	Masa:	Kopija	
Mjerilo originala	Naziv:	Pozicija:	Format: A3
M 1:2	<b>Gornji kalup</b>	1	Listova: 4
	Crtež broji: 1.2. - Prilog 1.	List:	2



Presjek A-A

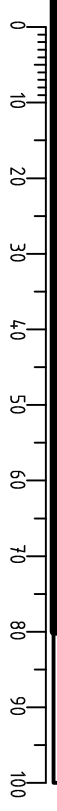
Zatiki

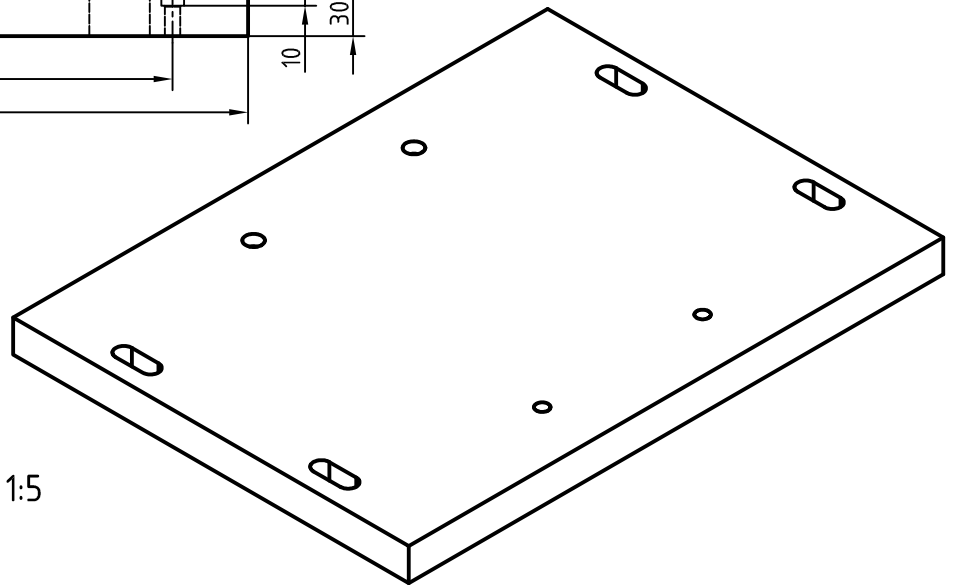
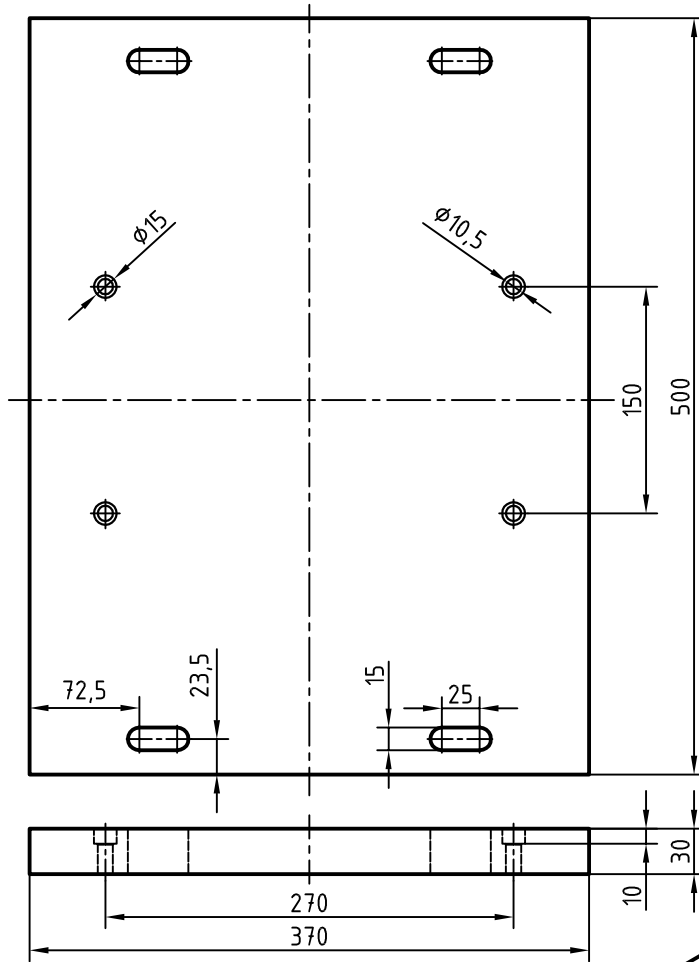


Napomena: Zatici se uprešavaju u uljne kanale  
 Zatici:  
 $\phi 10 \times 13 = 4$  kom.  
 $\phi 10 \times 35 = 4$  kom.  
 $\phi 10 \times 45 = 1$  kom.

Ra 3.2

Projektirao		Datum		Ime i prezime		Potpis	
Razradio		srpanj'15.		Mesarić Filip			
Crtao		Pregledao		Objekt broj:		R. N. broj:	
Materijal: S18-0-1		Masa:		Napomena:		Kopija	
Naziv: Donji kalup		Mjerilo originala: M 1:2		Pozicija: 2		Format: A3	
Crtež broj: 1.3. - Prilog 1.		List: 3		Listova: 4			





Izometrija M 1:5

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao				
Razradio				
Crtao	srpanj 15.	Mesarić Filip		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal: PA66_30%_GF		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Kopija
	Izolacijska ploča		3	
Mjerilo originala	Crtež broj: 1.4. - Prilog 1.			Format: A4
M 1:5				Listova: 4
				List: 4

**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, \_\_\_\_\_ (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom \_\_\_\_\_ (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, \_\_\_\_\_ (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom \_\_\_\_\_ (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)