

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Технологије прераде пластичних маса

Број индекса: 537/2011

Марко С. Миљковић

Примена полимерних композита за војне намене

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. ред. проф. др Богдан Недић - председник

2. _____ - члан

3. _____ - члан

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, октобар 2015.

У оквиру овог дипломског рада извршити прикупљање и систематизацију података о композитним полимерима који се користе у индустрији производње опреме наоружања и опремања војника. Описати карактеристике и области примене полимерских композита. На крају рада извршити моделирање примера примене полимерског композита на делове наоружања. Урадити температурну анализу облоге изграђене од дрвета и од полимерног композита, а затим извршити њихову компарацију.

Препоручена литература:

[1] др Богдан Недић, Владислав Ђукић, „Пластичне масе“, Машински факултет, Крагујевац, 2004. Године

[1] Sandra K. Young, Frederick L. Beyer, and Matthew S. Bratcher, „Exploiting Polymer Nanomaterials Technology for the U.S. Army's Objective Force“, САД, Април 2002. године

[1] др Момчило Севановић, „Влакнима ојачани полимерни композити“, Београд, 2002. године

[1] U.S. Department of Commerce, „Critical Technology Assessment of the U.S. Advanced Composites Industry“, (Washington, DC: U.S. Government Printing Office), Децембар 1993. године, пп.27-49

[1] U.S. Department of Defense, „Low HAP/VOC Compliant Resins for Military Applications“, САД, Септембар 2011. године

Крагујевац, октобар 2015.

ментор:

Ред. проф. др Богдан Недић, дипл. маш. инж.

Садржај:

УВОД.....	4
1. ПРИМЕНА ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА У ВОЈНОЈ ИНДУСТРИЈИ – ВОЈНИК БУДУЋНОСТИ.....	7
2.1. Полимер-слојевити силикатни (ПСС) нанкомпозити	9
2.2. Примена угљеничних наноцеви за војску	9
2. ОПШТЕ О ПОЛИМЕРИМА	12
3. КОМПОЗИТИ ОЈАЧАНИ КОНТИНУАЛНИМ ВЛАКНИМА.....	17
3.1. Дефиниција композита	17
3.2. Карактеристике композита.....	18
3.3. Класификација композита.....	19
3.4. Композити континуална влакна/пластика	20
3.5. Технике израде композита	21
3.6. Примена композита са полимерским матрицама.....	21
3.7. Грађа композита	22
3.8. Механичке карактеристике композита	23
4. ТЕХНОЛОГИЈА И УПОТРЕБА КОМПОЗИТА СА ПОЛИМЕРСКИМ МАТРИЦАМА У ВОЈНОЈ ИНДУСТРИЈИ.....	25
5. ВЛАКНА	29
5.1. Угљенична влакна.....	30
5.2. Стаклена влакна	32
5.3. Органска влакна	33
5.4. Тестирање влакана	34
6. ПОЛИМЕРНЕ МАТРИЦЕ.....	35
6.1. Термореактивне смоле.....	35
6.1.1. Полиестарске смоле	35
6.1.2. Епоксидне смоле	36
6.1.3. Карактеристике термореактивних смола.....	36
6.2. Термопластичне смоле	38

6.3. Тестирање чврстих смола.....	39
6.3.1. Тестирање матрица чврстих смола затезањем	41
7. ПРИМЕНА ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА У СТРЕЉАЧКОМ НАОРУЖАЊУ	42
7.1. Развој полимерских композита за примену у стрелачком оружју	42
7.2. Делови који се израђују од полимерских композита	43
7.3. Делове од полимерских композита које израђује фабрика „Застава оружје“ у Крагујевцу.....	50
8. ПРИМЕР ИЗМОДЕЛИРАНОГ ДЕЛА	53
9. ТЕМПЕРАТУРНА АНАЛИЗА ОБЛОГЕ ОД ДРВЕТА И ОБЛОГЕ ОД ПОЛИАМИДА ЗА ПУШКУ М21	57
9.1. Компаративна анализа добијених величина мерења.....	59
10. ЗАКЉУЧАК.....	61
ЛИТЕРАТУРА.....	63

Резиме

Због све веће тежње да се метални делови замене материјалом мале тежине, отпорнијим на корозију, лаким за израду и притом да обезбеде исте карактеристике односно исту намену, почела је израда делова од полимерних композита. Развој хемијске индустрије последњих година 20-тог века, посебно у области полимерних материјала довео је до развоја читавог низа нових производа и масовне производње најразличитијих материјала специфичних механичких и других карактеристика. У раду биће приказана тенденција примене полимерних композита за војне намене (војник будућности и остало наоружање) како у свету тако и у нашој наменској индустрији. Представљене су основне карактеристике полимера, подела полимера, полимерних композита и њихова структура. Приказани су основни делови који се израђују од полимерних композита у стрељачком наоружању, њихова конструкција и намена коју обављају у самом скопу оружја. У наставку ће бити приказани делови стрељачког наоружања које наша наменска индустрија израђује од полимерних композита, односно фабрика „Застава оружје“. Биће приказан пример моделирања дела стрељачког наоружања од полимерног композита. Такође, биће извршена температурна анализа облоге цеви која је израђена од дрвета и облоге цеви која је израђена од полимерног композита.

Кључне речи:

полимер, композит, војник, наоружање, облога.

Because of the increasing tendency for the metal parts for me small material weight, resistant to corrosion, easy to produce and thereby to provide the same characteristics and the same use, has started production of parts made from polymer composites. The development of chemical industry in recent years of the 20th century, especially in the field of polymeric materials has led to development of a number of new products and massive manufacture of various materials specific mechanical and other characteristic. The paper presents the tendencies of application of polymer composites for military purposes (soldier of the future and other arms) both globally and in our defense industry. Basic characteristics of the polymer division of the polymer, polymer composites and their structure. Shown are the basic parts that are made of polymer composites in sreljačkom arms, their construction and purpose they serve in the Skop weapons. Below will be shown parts of infantry weapons which our dedicated technical industries made of polymer composites or factory "Zastava Arms". It will be shown an example of modeling part of infantry weapons of polymer composites. There will also be carried out temperature analysis lining tube which is made of wood and clad tubes, made from polymer composite.

Key words:

polymer, composite, soldier, armament, covering.

УВОД

Развој хемијске индустрије последњих година 20-тог века, посебно у области полимерних материјала довео је до развоја читавог низа нових производа и масовне производње најразличитијих материјала специфичних механичких и других карактеристика. Захваљујући могућности испуњења најразличитијих захтева, полимерни композити налазе примену у практично свим областима људске делатности, првенствено на основу своје мале тежине и карактеристикама које им дозвољавају њихову експлоатацију у различитим конструкцијама [1].

Са појавом композитних материјала долази до нове технолошке револуције, јер се нови материјали могу пројектовати и производити тако да имају знатно боље карактеристике од појединачних особина полазних материјала или нама познатих материјала. Посебан значај нови материјали на бази полимера добијају применом у аутомобилској, авио и космичкој индустрији, грађевинарству, војној индустрији, електротехници, телекомуникацијама, медицини, у производњи амбалаже и спорту. Такође полимери и њихови композити имају све већу употребу и у војној индустрији, пре свега зато што они омогућавају да конструкција буде лакша и њихова производња је јефтина, а при томе обавља тражену функцију [1].

Развој машинске технологије полимерних влакана је започео тек почетком 20 века. Термин полимер први је увео Barcelijus. Године 1909. др Hendrik Bekeland, је успео после многобројних покушаја да добије контролисану реакцију између фенола и формалдехида. То је била прва синтетичка смола и представљао је почетак индустрије синтетских пластичних материјала. Врло брзо после уследило је добијање других полимерних материјала. Проналаском полиетилена у Енглеској начињен је пробој у индустрији паковања [1].

Након многобројних истраживања откривене су нове технологије за добијање потпуно нових материјала, као и проширење примене постојећих. Пластичне масе су материјали који као основну компоненту садрже полимерно једињење. Под одређеним условима, у извесном стадијуму производње, ови материјали су пластични. То значи да се могу обликовати под утицајем топлоте и притиска. После хлађења задржавају облик добијен обликовањем.

Полимерни материјали имају веома разноврсну структуру што представља основне проблеме при анализи утицаја полазних сировина и технолошких параметара на њихове карактеристике. Да би се ови утицаји одредили, потребно је познавање хемијских, механичких, термичких, електричних и других својстава пластичних маса, што подразумева обимна истраживања као и усавршавање метода за истраживања.

Пластичне масе спадају у групу материјала који се у стручној литератури називају вештачким материјалима. Вештачки материјали обухватају, поред пластичних маса и производе као што су вештачки каучук, текстилна једињења и разне смоле. По свом саставу то су молекулска једињења добијена хемијском синтезом или модификовањем природних материјала. [1]

Производња пластичних маса у свету се сваке године вишеструко увећава. Данас производња знатно прелази 100 милиона тона, док је 1950. године износила испод једног милиона тона. Овакав раст производње није забележен ни код једног другог материјала, тако да је производња пластичних маса превазишла производњу свих метала заједно [1].

Упоредо са експерименталним истраживањима у индустрији, текао је рад из области експерименталне и теоријске физике и хемије у многим научним установама, тако да је дошло до развоја теоријских модела добијања полимерних материјала. Низом експерименталних метода омогућено је да се макромолекули "виде" и на тај начин учине могућим за изучавање динамике полимерних система.

Век трајања зависи од интензивности тока процеса старења под утицајем светла, топлоте, влаге, кисеоника, као и од њиховог хемијског састава.

Израда предмета од пластичних маса има читав низ предности [1]:

- ниска цена коштања,
- мала густина у односу на метале (не прелази $1,5 \text{ kg/dm}^3$),
- лака израда делова, посебно производа сложене конфигурације, као и висока продуктивност при њиховој изради,
- добра диелектрична својства, због чега налазе примену као добри електро-изолатори,
- висока отпорност на киселине, растворе и друге агресивне средине,
- добра прозачност и способност бојења,
- добра пригушујућа својства, односно висока отпорност на вибрације, због чега се користе као добри изолатори вибрација,
- добра својства апсорпције звука, односно добри су звучни изолатори,
- добре антифрикционе особине, а по потреби и добра фриктиона својства.

Недостаци пластичних маса су [1]:

- ниска чврстоћа на повишеним температурама,
- смањење чврстоће у току дуготрајног оптерећења,
- кратак век трајања, што је у директној вези са процесом старења под утицајем светлости, топлоте, влаге и кисеоника.

Ради даљег повећања примене пластичних маса, потребно је обезбедити развој у три правца [1]:

- развој нових материјала пластичних маса,
- развој технологија прераде, уређаја и алата за прераду и
- развој примене нових материјала и развој нових производа од пластичних маса.

Поступци прераде пластичних маса се могу поделити на [1]:

- основне операције прераде,
- прераде полуфабриката и
- помоћне операције прераде.

Проналаском веома јаких, стабилних и трајних полимерних материјала, топлотно издржљивих арамидних влакана, вискоеластичних еластомера и биокompatibilних материјала, крајем 20-тог века учињен је значајан напредак у индустрији полимера [1].

Због широке примене ових материјала, њихов обим производње значајно премашује производњу свих метала заједно. Основно њихово преовлађивање се налази у ниској цени, малој специфичној тежини и захвалан у раду на високим температурама.

У првом подглављу биће приказана примена полимерних композита у војној индустрији – војник будућности, а у њему ће бити описана примена полимер – слојевитих силиката (нанокомпозити) и угљеничних наноцеви у пројекту војник будућности. Друга глава представља општи опис полимера, његове структуре и састојке композита на бази полимера. Трећа говори о дефиницији композита, његовим карактеристикама, класификацији, композитима на бази полимера и његовој примени. У наставку трећа глава говори о грађи и техници израде композита. Четврта глава представља технологију и примену композита на бази полимерних матрица у војној индустрији. Пошто су главни састојци полимерних композита влакна и полимерне матрице, у петој глави ће се говорити о влакнима (угљенична, стаклена и органска) и о њеном тестирању, док у шестој биће говора о полимерним матрицама. Под полимерним матрицама биће описане терморективне (полиестарске и епоксидне) и термопластичне смоле, као и њихово тестирање. Седма глава приказује примену полимерних композита у стрељачком наоружању, развоју и примењеним деловима у стрељачком наоружању како у свету тако и код нас - фабрика „Застава оружје“ у Крагујевцу. Пример измоделираног дела и поступак моделирања је приказан у осмој глави. Следећа, глава девет описује температурну анализу облоге израђене од дрвета и облоге израђене од полимерског композита. Последња глава десет, представља закључак рада, односно говори о томе шта се закључује на основу овог дипломског рада.

1. ПРИМЕНА ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА У ВОЈНОЈ ИНДУСТРИЈИ – ВОЈНИК БУДУЋНОСТИ

За последњих 20 година, војска је начинила велики напредак у истраживању наноматеријала, од дендритских наномолекула у наночестице за наноцеви, за примену у следећим генерацијама војних системи. Међутим, многи други наноматеријали ће морати да се и даље развијају за примену у будућим војним достигнућима (слика 1.1.). Циљане апликације су у дијапазону од електронике, осећајући потребу за хемијском заштитом агенса, па све до оклопа и наоружање. Бројни програми истраживања су у току код свих војска света у лабораторијама за испитавање наноматеријала и оружја. У лабораторији за истраживање полимерских материјала и оружја многи програми су усмерени ка унапређењу материјала за ове и друге технологије. Један од актуелних пројеката данашњице је војник будућности, представља примену насавременијих материјала за побољшавање квалитета и безбедности војник при извршавању различитих задатака. Неки недавних успеха су изузетно лагани керамички панцири на основу наночестица керамике, трајни ватроотпорно премази за балистичку заштиту окулара, низ примена селективних полимерних мембрана за дисање одеће, пречишћавање ваздуха за дисање и компактан извор снаге. Многи полимерни наноматеријали су под испитивањима за употребу у пешадијском наоружању, а такође се примењују и за напредну одећу, сензоре, погоне, медицинску технологије, горива и ефикасане енергетске системе међу другим потребама војске (слика 1.2.) [2].



Слика 1.1. Правци и циљеви наноматеријала у војним снагама [2]



Слика 1.2. Неке од тренутних програма полимерских наноматеријала који се примењују у циљу пројектовања ратника будућности [2]

Полимер-слојевити силикатни нанокомпозити су материјали који имају битан интерес у апликацијама војске. Ови материјали пружају могућност значајног побољшања физичка својства са додатком малих количина јефтиних пуниоца, али технологија се још усавршава због критичне празнине која настаје у тренутку разумевања њиховог равнотежног понашања. Карбонске наноцеви имају висок потенцијални примене у нанотехнологије и истражују се. Рани напори обухватају квантификовање и функционализацију дефеката знаменитости са полимерима. Познавање природе полимерске структуре, под којим условима полимерска структура може да се промени и да ли се полимерска структура може контролисати кроз модификацију су многа од важних питања за које је потребно добити одговоре да би имали успеха у стварању наноскалне структуре у оквиру полимера. Много експеримената је урађено како би се разоткрила компликована структура материјала. За балистичку заштиту код војника будућности (панцирне кошуље, шлемови, оклопи, облоге) користе се композити са арамидним влакнама/пластичном матрицом (нарочито они са хибридним ојачањем арамидна карбонска влакна), изузетне жилавости и отпорности на удар, велике чврстоће и доста добре крутости (слика 1.3.) [2].



Слика 1.3. Приказ балистичког прслука (а) и балистичког шлема (б) [3]

1.1. ПОЛИМЕР-СЛОЈЕВИТИ СИЛИКАТНИ (ПСС) НАНКОМПОЗИТИ

ПСС наноконтропозити су од великог интереса током последње деценије као резултат значајних побољшања у механичким и термичким особинама, истраживања су вршена на Тојоти за најлон од шест базираних материјала. ПЛС наноконтропозити се састоје од полимерне матрице са малом количином слојевитих силиката глине минералних пунила, обично по налогу између 2 и 5 процента тежине. За пуњење у истраживању се најчешће користи монтморилонит, који има нешто негативније наелектрисање у кристалној структури слојеви. Негативно наелектрисање је компензовано присуством природно насталих катјона пронађене у галеријама између појединачних глиних листови, а ови катјона обично су замењене аминим-прекинутим алкилним ланаца помоћу компатибилизе глине са органским матрицама [2].

Ови поступци обухватају унутршњу полимеризацију мономера, обраде глине и полимера у растварачу и вршиће топљења, мешање механичким техникама обраде као што је двопужно истискивање. Нажалост, ове технике постављају ограничења за материјала при настанку наноконтропозита. Обрада захтева да полимер и глина буду растворљиви у истом растварачу. На лицу места полимеризација утиче на молекуларне карактеристике полимера. Основна истраживања врше драгоцене напоре како би имали увид у понашању равнотеже полимера-слојевити силикатни наноконтропозитни материјали. Циљ ових истраживања је да омогући израду ПСС наноконтропозита из постојећих полимера са специфичним, добро дефинисаним особинама [2].

Очекивано трајање живота скромног војника се повећава не само Кевларовим прслуком, већ полимерним композитним шлемом, напредним вишеслојним полимерним наочарима, рукавицама и ефикаснијим, лакшим оружјем користећи композиту у њиховој изградњи. Генерално смањење тежине стандардне опреме није умањило његов (или њен) рад, он једноставно мора да носи додатну опрему.

Међутим, оно што се променило је да постоје многи војници који су данас жив, захваљујући само напредном полимерном композитном оклопу и прслуку.

1.2. ПРИМЕНА УГЉЕНИЧНИХ НАНОЦЕВИ ЗА ВОЈСКУ

Откриће угљеничних наноцеви (УНЦ-и) 1991. године је подстакло да се огромна количина материјала базираних на угљен истражује широм свет. УНЦ-и су синтетисани под сличним условима као фулерен попут методе изливања графитне и хемијске таложене паре. Потрага за идеалног синтетичким приступа је и даље у току, али се много напредовало од првог открића. Жеља за синтезу „УНЦ-и“ је несумњиво мотивисан њихов јединственим својствима. Проналаском овог такорећи новог

материјала са високом електричном проводљивошћу, свакако је привукао велику пажњу, као и хемијска отпорност УНЦ-и и топлотна проводљивост, што га представља конкурентом дијаманту [2].

Јединствена структура и својства УНЦ-и их чине идеалним кандидатима за многе примене како у војсци тако и у комерцијалном сектору. Иако је још у развоју, многи научници желе да искористе овај нови материјал. Примене ови материјала имаће нека од важних улога у пројекту војника будућности.

Нека од сегмената војника будућности, где се примењују угљеничне наноцеви су:

- енергетски извор

Војник будућности је предвиђено да има систем напајања који је лаган и веома ефикасно. УНЦ-и могу искористити у овом систему као компонента батерије. Литијум је познато постављен у УНЦ-и с и са својим полупроводничким / металним особине може понудити непредвиђене предности у овој примени. Осим тога, слаба густина УНЦ-и ($1,3 \text{ g/cm}^3$) чини УНЦ-ма идеалним материјалом за лагане батерије [2].

- Електромагнетна заштита (ЕМ)

ЕМ заштита је кључни елемент за заштиту у војничким системима. Висока електрична проводљивост УНЦ-и представља нову алтернативу за ЕМ заштитом, а њихов велики потенцијал су и проводна влакна УНЦ-и која би могла бити уграђена у самом униформи војника [2].

- Оклоп

Због високе затезне чврстоће УНЦ-и очекује се да имају утицај у области текстилних влакана која се користе за балистичку заштиту. УНЦ - полимер композита ниске густине који би се могао са слојем керамичких материјала да направи нови хибрид систем високе чврстоће и крутости за заштиту оклопа [2].

- Топлотна регулација

Потреба за топлотну регулацију је кључ будућих војних система. Висока термичка проводљивост УНЦ-и ће драматично повећати ефикасност у системима грејања/хлађења како војник, тако и за потребе возила [2].

- Равних дисплеја

Визија војника будућности указује да ће се количина информација саопштавати на дисплеју на кациги. Тако да истраживачи врше истраживања у погледу УНЦ-базних екране [2].

- Филтрација

УНЦ-и као активираним угљенику имају потенцијалне употребе у оба течности и гаса филтрације. УНЦ-и материјали су већ показали да ће бити једнаки ако не и

ефикаснији од обрнуте осмозе при филтрирању воде, а такође и у филтрирању тканине као и ваздуха [2].

➤ Погони

Иако је већи део интереса погона лежи у стварању вештачких мишића који су способни да раде свој посао, али поред тога могу бити уграђени у мембране за филтрацију материјала [2].

2. ОПШТЕ О ПОЛИМЕРИМА

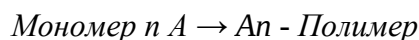
Пластичне масе су материјали код којих је основна компонента полимер. Термин полимер (настао од грчког предлога *poli* - много и именице *meros* - део) је синоним за макромолекулска једињења. Развојем хемијске индустрије последњих деценија, дошло је до изузетно брзог и значајног продора њихове примене у машинству [1].

Једномолекуларна једињења - мономери имају својство да се под одређеним условима (одговарајућој температури и притиску) у присуству катализатора, спајају у макромолекуларна једињења која се називају **полимери**.

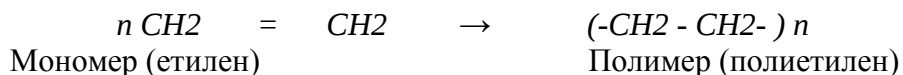
Разликују се природни полимери, који су саставни део биљака и животиња, нпр. целулоза, скроб, беланчевине, каучук као и једињења у облику силицијум диоксида и др, и синтетички полимери добијени хемијском прерадом и синтезом нискомолекуларних једињења (мономера).

Синтетички полимери се добијају синтезом мономера, а основне методе су: полимеризација, поликондензација и полиадиција. Полимеризација је стварање макромолекула спајањем мономера без издвајања споредних продуката и прегруписавања атома у молекулу. Процес полимеризације се не сме прекидати јер се не може на исти начин и наставити [1].

Полимеризација се може изразити једначином:



Односно, у случају етилена [1]:



У наведеним једначинама n је степен полимеризације.

Посебан случај синтезе је полимеризација различитих мономера која се назива **кополимеризација**, при којој се стварају макромолекули састављени од основног састојка који се у полимеру углавном правилно понављају. Својства добијеног полимера се битно разликују од својстава компоненти (мономера), или од својстава њихове смеше.

Поликондензација је метода синтезе већег броја мономера у макромолекуле, уз издвајање споредних продуката, најчешће воде, амонијака и др. Синтеза при поликондензацији се може изводити ступњевито, па и са прекидима, који се могу у одређеним условима и наставити [1].

Полиадиција је метод синтезе која се одликује одсуством издвајања споредних продуката и могућношћу извођења у ступњевима, што указује да је то метода синтезе која се налази између полимеризације и поликондензације [1].

Пластичне масе, у највећем броју случајева, се састоје из полимера - синтетичких смола као основних компоненти и у мањем или већем обиму додатних материјала као што су пластификатори, пунила, боје, а понекад и мазива,

стабилизатори и очвршћивачи. Такође, пластична маса може бити састављена само из полимера.

Пластификатори, омекшивачи, су материје у којима се полимери растварају, односно набубре, што изазива промену њихових својстава, првенствено повећање еластичности на рачун затезне чврстоће и тврдоће, као и измену неких физичко-хемијских својстава, у првом реду снижења температуре топљења [1].

Пунила се пластичним масама додају како ради побољшања механичких својстава, тако и због смањења цене коштања пластичних маса.

Боје се пластичним масама додају према потреби, а задатак им је да поред обојености масе, утичу и на хемијску и термичку стабилност.

Стабилизатори се додају пластичним масама у циљу продужавања, тј. очувања отпорности на топлоту и штетно зрачење, чиме се донекле смањује опасност од старења и пропадања [1].

Овим средствима припада мазиво које се додаје пластичним масама ради побољшања пластификације и ради одстрањивања лепљења за калуп. У ову сврху најбољи су парафин, стеарин и калцијум - стеарат.

Зависно од понашања на повишеним температурама пластичне масе се деле на:

1) Термопластичне пластичне масе

Одликују се могућношћу поновне еластичне деформације у загрејаном стању. Ове пластичне масе углавном не садрже пунила, осим средстава за бојење и пластификатора којим се постиже измена својстава чврстоће [1].

Основне одлике термопластичних пластичних маса су [1]:

- осетан утицај повишене температуре на својства чврстоће,
- оптичка провидност код многих пластичних маса је висока,
- могућност бојења углавном неограничена,
- ниска цена обликовања за производњу великих серија, а отпатци се могу поново употребити,
- могу се неограничено обликовати и спајати на топло али углавном са лепљивим раствором.

2) Термореактивне пластичне масе

Одликују се тиме да повишењем температуре очвршћавају услед структурних промена, а поновним загревањем не омекшавају. Ове пластичне масе скоро увек садрже пунила, очвршћиваче и стабилизаторе са циљем да се побољшају својства садржане смоле путем хемијских реакција [1].

Основне одлике термореактивних пластичних маса су [1]:

- повећана температура нема велики утицај на механичка својства,
- ниска оптичка проводљивост,
- могућност бојења ограничена,
- висока цена обликовања, а отпатци се не могу поново користити, и
- неспојиви су на топло и нелепљиви са растворима.

Анализа пластичних маса изводи се праћењем општих карактеристика, начина обликовања, додатних материја као и њихов задатак, а најзначајнија класификација пластичних маса је према главним хемијским фамилијама и према њиховој природи (табели 2.1.).

Табела 2.1. Преглед основних врста пластичних маса [1]

Врста пластичне масе	Фамилија - Хемијска природа	Врста пластичне масе	Фамилија - Хемијска природа
Термопластичне пластичне масе	Полиетилени	Термореактивне пластичне масе	Феноли
	Полипропилени		Аминопласти
	Епоксидне смоле		Епоксидне смоле
	Полистироли		Полиестери *
	Полиамиди		Урелици
	Полиформалдехиди		
	Поликарбонати		
	Целулозе		
	Метакрили		
	Политетрафлуорети лени		
	Ацетати		

Напомена: * Припадају и једној и другој групи пластичних маса.

Опште карактеристике зависе од тога да ли је пластична маса термопластична, односно термореактивна. Карактеристична својства термопластичних маса дата су у табели 2.2., а термореактивних у табели 2.3.

Табела 2.2. Карактеристике термопластичних пластичних маса [1]

Општи подаци	Карактеристике	Утицај
*Пластичне масе које не трпе неку хемијску промену приликом обликовања	Механичка својства	На које утиче температура
	Обликовање	Са могућношћу понављања
	Трошкови обликовања	Мали за велике серије
	Могућност бојења	Обично добра
	Провидност	Обично добра због полимера*
	Заваривање	Обично је могуће топљењем**
	Лепљење	Обично помоћу растварача
	Рециклажа	Отпатци се могу поново користити

* Додатак кополимера стирол-акрилонитрата и поликарбоната и метакрила

** Могуће је ултразвучно заваривање

Табела 2.3. Карактеристике термореактивних пластичних маса [1]

Општи подаци	Карактеристике	Утицај
*Пластичне масе које трпе неку хемијску промену приликом обликовања	Механичка својства	Мало утиче температура
	Обликовање	Не може се понављати
	Трошкови обликовања	Већи због пресовања са сабијањем
	Могућност бојења	Обично добра
	Провидност	Никаква
	Заваривање	Не могу се заварити*
	Лепљење	Само специјални лепкови
	Рециклажа	Отпатци се не могу поново користити

* Практично нерастворљива под дејством топлоте и разних растварача.

Додатни материјали, које пластичној маси побољшавају одређена својства, су веома бројни и њима се број применљивих квалитета пластичних маса знатно увећава.

Главне додатни материјали у термопластичним пластичним масама дате су у табели 2.4., а за термореактивне у табели 2.5.

Табела 2.4. Главни додатни материјали у термопластичним пластичним масама [1]

Општи подаци	Додатни материјали	Утицај
*Пластичне масе које не трпе повратне хемијске трансформације при обликовању	Калцијум-карбонат	Ради побољшања димензионалне стабилности у зависности од температуре
	Силикати	
	Талк	
	Азбестна влакна	Ради побољшања одређених механичких и термичких карактеристика
	Стаклена влакна	
	Графит	Ради побољшања коефицијента трења
	Политетрафлуоретилен	

Табела 2.5. Главни додатни материјали за термореактивне пластичне масе [1]

Општи подаци	Карактеристике	Утицај
*Пластичне масе које трпе повратне хемијске трансформације при обликовању	Струготина	Општа примена
	Мешавина органско-неорганске материје	Ради побољшања електричних карактеристика
	Органска влакна	Побољшавају ударну жилавост
	Органске тканине	Побољшавају ударну жилавост , а имају добре механичке и електричне карактеристике
	Лискун	Мали губици при високој фреквенцији
	Азбест	Велика термичка отпорност
	Стаклена влакна	Одличне механичке, термичке и електричне карактеристике

3. КОМПОЗИТИ ОЈАЧАНИ КОНТИНУАЛНИМ ВЛАКНИМА

Фокус овог рад је на композитнеса полимерном матрицом. Материјали направљени комбиновањем кратких или дугих влакана односно честица и једаног органског једињења на бази материјала матрице, који сједињава влакна или честице заједно. Нормално, ојачања (влакна) се користе за да носе структурна оптерећења, а материјали матрица односно смоле се користе да држе влакна заједно, да заштити влакна и да преносе структурна оптерећења између арматура влакна. Ова рад описује потенцијал војне интеграције у индустрији полимерних композита [4].

3.1. ДЕФИНИЦИЈА КОМПОЗИТА

Композитни материјали су сасвим уобичајене данас и користе у скоро сваком сегменту цивилне и војне индустрије. Композитни материјали се састоје од два или више идентификациона састојак, а који заједно испољавају својства која су уопштено супериорнија од особина појединачних састојака. Ови материјали су свакако не представљају неку новину, рани становници Египат, на пример, користили су сложене цигле од блата и сламе у изградњи многих кућа. Армирани бетон, угљеник-епоксид се користи у неким штапови за пецање и тениски рекети, лагани композит се користи у неким оклопима, стаклена влакна-епокси користе се у рибарским бродовима и делови аутомобили за трке су од разних врста примерних композитних материјала. Међутим, прихваћено је да се под композитин материјалом подразумева само онај вишефазни материјал чије фазе поседују физичке особине које се међусобно значајно разликују, па композитни материјал има својства која су различита од својстава конституената. Тако се метали и легуре са нежељеним нечистоћама или са легирајућим елементима, пластика са незнатним садржајем пунилаца, лубрификаната или ултравиолетних апсорбера као и класична керамика, не класификује као композити, иако представљају вишефазне материјале. Ови материјали имају фазе сличних физичких особина (сличних карактеристика еластичности и облика зрна), а често је једна од фаза присутна у значајно мањој мери од осталих [4].

Модул еластичности челика је неосетљив на садржај карбидне фазе. Зато се челици, као низ других легура, не сматрају композитима. Са друге стране, неке двофазне легуре или кермети представљају честицама ојачане композите у правом смислу. Пластика са мањим садржајем ојачања као адитива је композит и све док садржај ојачања не пређе границу од 10 % v, овакав материјал се назива ојачана пластика.

Класификација материјала као композита може бити базирана на критеријуму дали долази или не до значајне промене услед спајања конституената (пример алумине ојачане цирконијум оксидом). До овакве промене особина најчешће долази када је једна од фаза обочно од плочица или влакана, али и када је запреминска фракција једне од присутних фаза ваћа од 10 % v.

Композитима се могу сматрати материјали који се састоје од две или више хемијских различитих фаза уочљивих на макро скали, са видљивим међу површинама које раздвајају фазе. Ова дефиниција се односи, у пуној мери, на влакнима ојачане композите, који представљају сигурно највећу и најзначајнију групу композитних материјала [4].

3.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТА

Композит представља континуалну фазу у коју је уграђена једна или више дисконтинуалних фаза. Дисконтинуална фаза је обично крућа, тврђа и јача од континуалне фазе и назива се ојачање или ојачавајући материјал, док је континуална фаза матрица. Композити са кућном матрицом од ојачања су гумом модификовани полимери, док су композити са крутим матрицама и крутим ојачањем карбон-карбон композити и композити са керамичким матрицама [4].

➤ Композити са керамичким матрицама

Керамичким матрицама композита настаје јачањем керамике интегрисане у керамичким матрицама. На пример, појачања могу бити дуга континуирана влакана, кратка влакна или тромбоцити, а типични појачивачи су алуминијум-оксид, кордиерит, мулит, силицијум-карбид, силицијум-нитрид, цирконијум-диоксид, титанијум-диборид, топљени силицијум-диоксид и графит, док уобичајени материјали матрице су алуминијум-оксид, кордиерит, мулит, силицијум-карбид, силицијум-нитрид, цирконијум-диоксид, титанијум дибориде. Композити са керамичким матрицама имају одличну отпорност на корозију, одличну издржљивост на високим температурама, високи ниво тврдоће, релативно висок модул еластичности и релативно малу тежину. За разлику од полимерских матрица композита, којој треба појачање, пре свега, како би побољшала структурне карактеристике, керамичка матрица композита користи појачања ради побољшања жилавост, поузданости и трајности, као и да унапреди структурне карактеристике [5].

➤ Композити са металном матрицом

Метална матрица композита (ММК) се састоји од материјала, као што су лаке легуре алуминијума, магнезијума, титанијума, односно ојачане са керамичким честицама или влакнима. Као што је случај са керамичким матрицама композита, појачања могу бити континуална или дисконтинуална. Угљенична и керамичка влакна се користе као континуална појачања у металним матрицама композита. Типична керамичка влакана која се користе као континуална појачања су алуминијум-оксид, силицијум, бор, алуминијум-силицијум, цирконијум, магнезијум, мулит, бор-нитрид, силицијум-нитрид и титанијум-диборид. Најчешћи примењиване честице су алуминијум, титанијум-карбид, силицијум-карбид, карбид и волфрам-карбид [5].

➤ Угљеник - Угљеник композити

Угљени - Угљеник композити састоји од угљеничних влакана као влакна за ојачање и угљеничних материјала као материјала матрице. Угљеник-угљеник композит се обично класификују у две врсте: структурни и неструктурни. Влакна за ојачање може имати разне облике: исецкани, континуални, дводимензионалне тканине и тродимензионалне тканине. Избор ојачања зависи од примене, а процес депоновања угљеника у угљенична влакна предформе, који делује као материјал матрице, се зове згушњавање. Депортавање се врши на два општа начина, најчешћи метод је таложење хемијских пара (KVB), такође познат као хемијско-испаривање инфилтрацијом (CVI), а други метод се назива течна импрегнација. Оба процеса се морају поновити више пута како би се постигао уобичајени ниво згушњавања, што чини угљеник-угљеник композита доста скупим. Микроструктура материјала угљеника матрице има важан

утицај на карактеристике коначног композита. Значајан износ истраживачког рада је у току развијања квантитативне корелације између микроструктуре и механичких и топлотних својстава угљеник-угљеника композита [5].

Особине композита су битно одређене особинама њихових конституената, расподелом конституената и њиховом интеракцијом. Особине композита могу бити дате сумом производа конституената и њихове запреминске фракције (такозваним правилом мешања) [4].

$$P_c = \sum \lambda_i P_i \quad (3.1)$$

или конституенти међусобно реагују на синергистички начин па се особине композита не могу изразити правилом мешања.

$$P_c \neq \sum \lambda_i P_i \quad (3.2)$$

Облик дискретне јединице дисконтинуалне фазе често се апроксимира сфером (честице), цилиндром (vlakна), правилом призмом или штапић (лискун, глина, честице стакла). Величина и расподела величине ојачања дефинишу текстуру, а заједно са запреминском фракцијом ојачања одређују врсту и опсег интеракције између ојачања матрице [4].

Садржај ојачања представља се преко запреминске или фракције масе и он је сигурно најважнији параметар који, уз особине конституената, одређује особине композита. Он представља лако контролисану променљиву, преко које се мењају особине композита. Расподела садржаја ојачања је мера хомогемости и униформности система. Неуниформност композита треба избегавати, јер она смањује вредност оне особине система које одређује најслабија веза у материјалу. Тако, на пример, укупну чврстоћу композита одређује његов најслабији део.

Оријентација ојачања утиче на изотропију система. Ојачање од еквиаксијалних честица одређује потпуну изотропију особина композита. Ако димензије честица нису индентичне, композит је изотропан само када су честице наумично орјентисане, какав је случај код композита ојачаних насумично орјентисаним, каратким vlakнима. Ако се у току израде (на пример, ливења композита са кратким vlakнима) све честице орјентишу у истом правцу, индукује се анизотропија. Композити ојачани дугим vlakнима показују изразиту анизотропију особина, али се исто може контролисати пројектовањем и фабрикацијом [4].

3.3. КЛАСИФИКАЦИЈА КОМПОЗИТА

Највећи број композита је развијен и производи се с циљем да се побољшају њихове механичке особине, као што су крутост, чврстоћа, жилавост или високотемпературне карактеристике. Логично је да се композити класификују према заједничком механизму ојачања, а како овај последњи зависи од геометрије ојачања, композити се класификују према геометрији репрезентативне јединице ојачања. Опште прихваћена шема класификације композита приказана је на **слици 3.1**. Према овој класификацији, битна карактеристика честица је да су оне по својој природи невлакнасте. Оне могу бити: сферичне, кубне, тетрагоналне, плочасте или неправилног облика, али су све прилично еквиаксијалне. Vлакна одликује велики однос дужине према димензијама попречног пресека. Честицама ојачани композити називају се често честични (engl. partikulate), а vlakнима ојачани композити vlakнасти (engl. fibrous)

композити. Ови последњи представљају велику групу нових конструкционих, композитних материјала [4].



Слика 3.1. Приказ класификације композитних материјала [4]

3.4. КОМПОЗИТИ КОНТИНУАЛНА ВЛАКНА/ПЛАСТИКА

Композити са металним и керамичким матрицама су усавершени материјали. Међутим, композити континуалним влакнима ојачана пластика представљају сад и биће дуго у будућности најзначајнија и највећа група усавершених композита, с обзиром на обим и раст њихове фабрикације и примене [4].

Ламинарни композити влакна/пластика представља класу врло атрактивних конструкционих материјала. Изузетна предност ових материјала су њихове извредне механичке карактеристике, посебно њихове специфичне механичке карактеристике, као и могућност уношења флексибилности при пројектовању конструкционих елемената од ових композита. Структура и природа ламинарних композита су другачија него исте код класичних поликристалних конструкционих материјала. Исто тако, иницирање и простирање лома, као и критеријуми разарања и отпорности материјала су другачији него у класичним конструкционим материјалима.

Произведени филаменти и влакна од неорганских материјала имају чврстоћу у правцу влакана већу од чврстоће масивних материјала, јер су велике пукотине, критичне за иницирање катастрофалног лома, присутне у масивним материјалима, минимизирани у влакнима, због малих димензија попречног пресека влакана (од n до $n \times 10^1 \mu m$). Високе вредности чврстоће и крутости у органским, полимерним влакнима последица су оријентација молекуларне структуре [4].

Због малих димензија њихових попречних пресека сама влакна нису посебна за манипулацију и инжењерске примене. Уграђена у погонске матрице она представљају влакнасте композите. Матрица служи да повеже влакна, пренесе оптерећење, спречи утицај околне средине и оштећења при манипулисању.

3.5. ТЕХНИКЕ ИЗРАДЕ КОМПОЗИТА

У зависности од врсте и особина система развијен је низ различитих техника израде композитних материјала. Тако се композити стакло/полиестар довијају техником ручног слагања (engl. hand lay-up), уз умрежавање на собној и одређивање на температурама до 100 °C. Композити са епоксидним термопластичним матрицама добијају се техникама врућег пресовања на повишеним температурама, препрека или стока слојева влакана и матрица у калупима или у аутоквалима, или пак, техником контактеног вакум пресовања. Цилиндрични или сферични делови од композита добијају се техником механичког намотавања (engl. filament winding), а композитни делови ојачани континуалним влакнима узграђују се и техникама екструзије, пултрузије и пулформинга [4].

3.6. ПРИМЕНА КОМПОЗИТА СА ПОЛИМЕРСКИМ МАТРИЦАМА

Усавршени композити на бази континуалних влакана и полимерских матрица прогресивно замењују у многим областима класичне конструкционе материјале, нарочито метале.

Из више разлога (повољне особине за примену, једноставна и јефтина технологија добијања, уштеде у инвестицијама, трошкови производње и експлоатације) композитни материјали постали су веома атрактивна група конструкционих материјала, а биће незаменљиви материјали у будућности. Поред низа погодних особина за другу и безбедну примену, према неким, њихова најбоља особина је цена, поготову када се има у виду производња, експлоатација и замена делова. С обзиром на уштеде у потрошњи енергије, чак и цена композита са угљеничним влакнима није тако велика, упркос чињеници да су карбонска влакна по јединици количине најмање двадесет пута скупља од стаклених влакана [4].

Скупи композити карбонска влакна/епоксидна матрица изузетних карактеристика (високе вредности чврстоће и крутости, ниске густине, изваредне отпорности на замор и корозију) налазе своју примену за специјалне намене: васионска и ракетна техника, судови под притиском, антене, ротори центрифуга, цеви и осовине подвргнуте цикличним оптерећењима, делови мотора, тркачких аутомобила, спортских реквизита. Највећа примена ових композита су примарни и секундарни делови авионских конструкција. У авионе који се данас производе уграђују се до 40 % делова од ових композита. Висока цена компонената од ових композита компензује се уштедама у потрошњи горива, јер су композити карбон/епоксид лакши 5 до 7 пута од челика.

Пораст производних капацитета, цена и експлоатација примене угљеничних влакана су тесно повезани. Сматра се да ће се производна цена угљеничних влакана са садашњег нивоа од 30 US\$/ kg са повећањем производних капацитета ових влакана на 120-130 t/годишње, спустити испод границе од 20 US\$/ kg.

Развој и примена композита са угљеничним влакнима поспешила је развој и примену усавршених композита са другим континуалним влакнима, пре свега, са арамидним и стакленим влакнима [4].

Композити стаклена влакна/полиестарска или епоксидна смола поседује низ дивних карактеристика: велика чврстоћа, изваредну отпорност на удар, корозиону стабилност, ниску густину, једноставне поступке производње, лакоћу израде комплексних облика. Са повољним односом између цене са особина, уз коришћење континуалних влакана, увођење нових технолошких поступака израде (инјекционо

пресовање, механичко намотавање, пултрузија, пулформинг, индустријска производња нетканних трака) примена ових композита се јако повећава и обухвата следеће области:

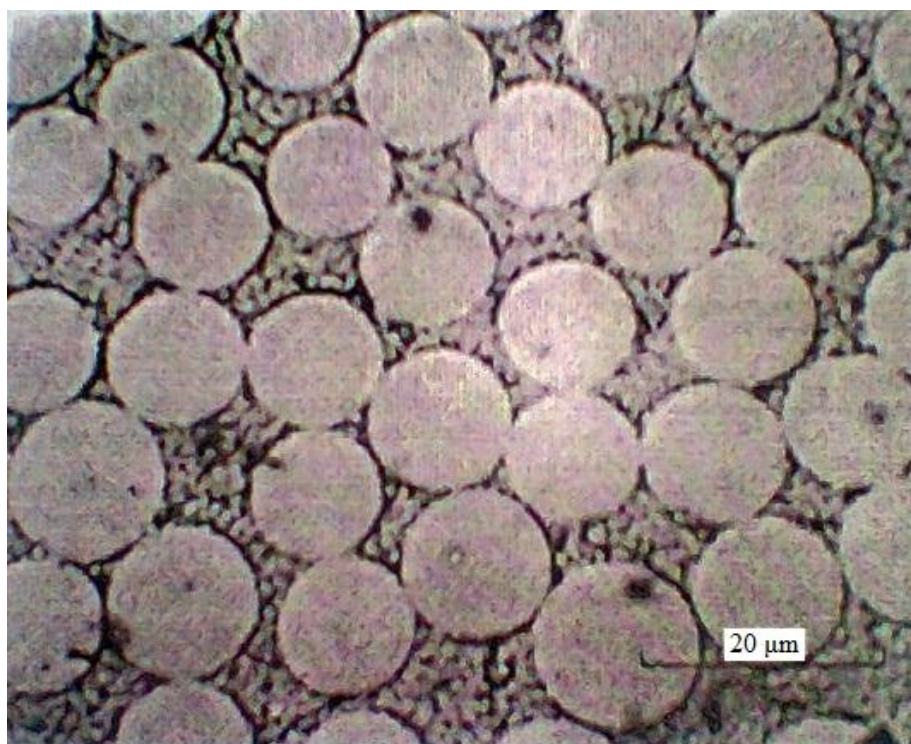
- хемијску индустрију;
- електронику и информационе технологије;
- бродоградњу, приморска и постројења на мору (платформе за експлоатацију нафте);
- грађевинарство и инфраструктура;
- аутомобилску и индустрију вагона;
- војној индустрији (оружја, оруђа, борбена возила и остала наоружања), итд [4].

Огромна експанзија примене ових композита, која је у току, наставиће се и у будућности, нарочито у грађевинарству и у инфраструктури.

Композити арамидна влакна/пластична матрица, изузетне жилавости и отпорности на удар, велике чврстоће и доста добре крутости, налазе примену (нарочито они са хибридном ојачањем арамидна карбонска влакна), пре свега, за балистичку заштиту (панцирне кошуље, шлемови, оклопи, облоге), као и за носеће каблове [4].

3.7. ГРАЂА КОМПОЗИТА

Основни тим композита ојачаних континуалним влакнима су унидирекциони композити (УДК). У овим композитима влакна (филаменти), уграђена у матрицу су паралелна, хомогено распоређена кроз запремину и сва усмерена у истом правцу (**слика 3.2.**). Унидирекциони композити се добијају пултрузијом или пресовањем унидирекционог препрега или смолом натопљених нетканних трака истоусмерених влакана у алуру или аутоклаву [4].



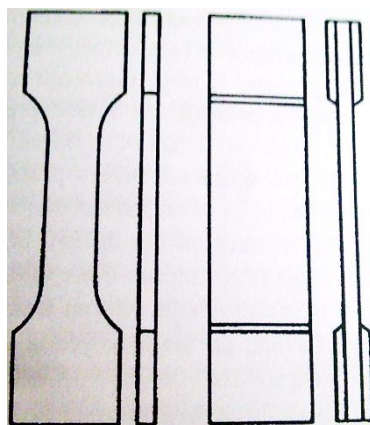
Слика 3.2. Микрографија попречног пресека унидирекционе ламине стаклена влакна/полиестарска смола [4]

3.8. МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТА

Особине од интереса за конструкционе композите се механичке и физичке особине компонената, унидирекционих композита и ламината као и особине конструкционих елемената од композита. Методе којима се одређују особине композитних материјала калсификују се као методе у којима се добијају подаци од значаја за квалитетно поређење (методе за квалитетно поређење) и методе у којима добијене вредности представљају апсолутне карактеристике материјала (методе за апсолутне особине) [4].

Методе за одређивање механичких особина композита морају се тако реализовати да се жељена врста оптерећења примењују униформно у тестираном делу епрувете, тако да резултујуће напрезање буде празнато, да се елиминишу остала напрезања и да буде могуће мерење деформације у мерном делу епрувете. Овакви тестови за композите ојачане влакнима се тешко изводе, због сложености изазване услед анизотропије чврстоће и еластичних особина. Број еластичних константи потребних да се карактерише композит је већи од два, колико је довољно за карактеризацију изотропног материјала. Исто тако, спрезање смичућих и аксијалних напрезања (екстензије) ствара додатне тешкоће при достизању граничних услова на ивицама у испитиваном делу епрувете. Апсолутне вредности механичких особина из исправно планираног теста треба да буду независне од геометрије узорака и начина оптерећивања. Ламинати који су анизотропни дуж правца примене оптерећења, као и они који су несиметрични у односу на средишњу раван, захтевају примену посебних прибора (engl. fixture) да би се избегло сузбијање природне деформације. Високе вредности модула и ниске вредности деформације кртог лома повећавају тешкоћу центрирања и ефекте концентрисања напона. Мала вредност интерламинарне чврстоће отежава проблеме учвршћивања епрувете у чељустима и изискује специјално разматрање проблема трансверу оптерећења у делу епрувете учвршћеном у чељусти. Ламинати који поседују високе вредности Поиссоновог односа стварају велика попречна напрезања на местима промене пресека епрувете. При компесије неједнака и сломљена влакна доводе до ниских вредности чврстоће и разарања типа „метле“ (engl. brooming type failure). Методе истезања, компресије, смицања и биаксијалних оптерећења развијене су, имајући у виду горње напомене [4].

У тестовима затезања унидирекционих композита могу, у принципу, да се користе косколике и паралелопипедне епрувете (слика 3.3.). Код косколиких епрувета унидирекционих композита на крајевима мерног дела није пукотине које се преносе у делове учвршћене у чељустима. Ово се нарочито дешава код композита ниских вредности чврстоће смицања. Концентрисање напрезања на овим местима проузрокује превремени лом и због тога се косколике епрувете не користе у тестовима затезања унидирекционих композита. Код паралелопипедних епрувета константног попречног пресека на крајевима се постављају подметачи (engl. tab), преко којих се епрувете учвршћавају у чељусти и преко којих се преноси оптерећење на епрувете. На местима где се завршавају подметачи, у површинским слојевима епрувете може доћи до концентрисања напона. Ефекат концентрације напона се смањује искошавањем ивица подметача, коришћењем нискомодулних материјала за подметаче и повећавање дужине подметача. Оваква епрувета је осетљива на лоше центрирање и да би се избегло савијање и увијање епрувета у току теста користе се самоцентрирајуће чељусти.



Слика 3.3. Могући облици епрувета за затезање УДК [4]

Епрувете за компресију унидирекционих композита су сличне епруветама за затезање, само је дужина подметача већа, а мерни део епрувете мањи. За извођење теста компресије унидирекционих композита користе се посебни прибори (engl. fixture).

Карактеризација систем композитних материјала захтева да се тестови изводе тако да се добију вредности чврстоће и модула као „интринсик“ особина материјала. Много напора је учињено у циљу развоја метода испитивања која су погодна за процену промена особина композитних материјала услед промене параметара полазних материјала или промене параметара поступка добијања. Међутим, ове методе „осигурања квалитета“ нису дале податке којима би се могли директно повезати са карактеристикама материјала. Мада су методе испитивања развијане с циљем да се у тестовима добију вредности карактеристика као интринсик карактеристика материјала, достизање тог циља варира од методе до методе и од особине до особине.

При развијању метода испитивања ламинираних композита водило се рачуна да је унидирекциона ламина изграђивачки блок мулти дирекционих композита, а да карактеризација материјалних особина ламина треба изводити тако да се омогући предвиђање особина ламината [4].

У пракси ово је могуће само кад се ради о еластичним карактеристикама као што су ефективни модул еластичности и Поиссонов однос. Предвиђање карактеристика чврстоће ламината из вредности чврстоћа ламината је много теже. Због тога је потребно директно експериментално одређивати вредности чврстоће ламината.

4. ТЕХНОЛОГИЈА И УПОТРЕБА КОМПОЗИТА СА ПОЛИМЕРСКИМ МАТРИЦАМА У ВОЈНОЈ ИНДУСТРИЈИ

Композити са полимерним матрицама (ПМК) су материјали направљени комбиновањем полимера са другом класом материјала, као што је керамика. Генерално, намера прављења полимерних композита је да се добију материјали мале тежине, високих перформанси који су супериорни у односу на појединачне компоненте. Делови аутомобиле и тениски рекети су примери комбинације полимера са стакленим влакнима. Композитни са полимерском матрицом користе у одбрамбеној индустрији због мале тежине и одличним особинама, омогућавајући производње мање тежине и јача возила, бродова, оружја и објеката. На пример војска САД је покренула програме који иницирају замене металне компонентата на возила (Хамер) и друга возила и поморске бродове армије са полимерским композитним деловима (слика 4.1.). Будућа класа возила, бродова и наоружања ће користити знатно веће количине полимерних композитних материјала, што их чини лакшим, бржим и покретанијим. Међутим, аспекти ових технологија имају негативан утицај на животну средину. Израда композитних материјала може произвести велике количине лако испарљивих органских једињења (VOC) и опасан загађивач ваздуха (HAP). Извори загађења из ових материјала укључују одлагање опасних полимерских састојака, растварачи се користе за смањење вискозности, гасове еволуирају током и после обраде, и одлагање контаминираног отпадног материјала [6].



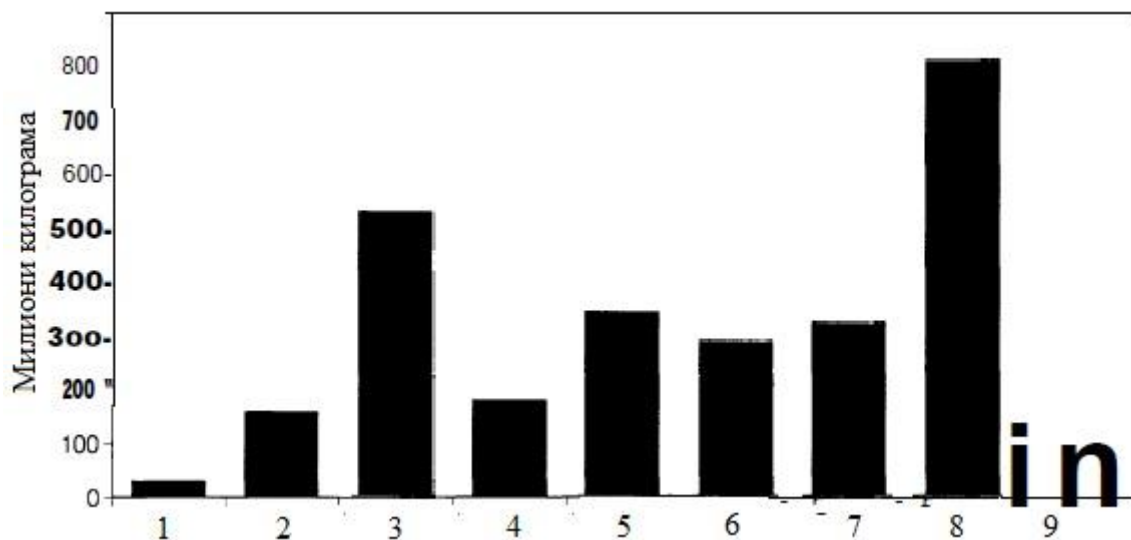
Слика 4.1. Садашња и будућа примена полимерских композита у наоружању [6]

Полимерни композита се користе у широком спектру апликација одбране и налазе се у готово сваком већем система наоружања произведеног. У многим случајевима, системи наоружања не могу обављати своје задатке без полимерних композитних материјала. Неки примери полимерних композита због јединствених перформанси су у функцији одбрамбених система и због смањене тежине, транспарентности електромагнетног зрачења (стелт), димензионалне стабилности, и отпорност на балистичку пенетрацију. Војска користи композите у својим хеликоптерима, копненим возилама, ракетама, муницији, оружју и опремама подршке. Одличне на замор, реалних и амортизованих карактеристике композита чини их идеалним за хеликоптере. Угљен-епоксид материјале, на пример, користе у изградњи хеликоптера ваздушних рамова, места за сипање горива, кожне панела различитих типова, антенских стубова и муниције. Арамид-епоксид се користи у хеликоптерским лопатицама ротора, облогама (да заштити особље од гелера), покретање цеви, кациге и тактичких склоништа. Стакло-епоксид се користи у ставке као што су резервоари за

гориво, лопатице ротора, лансирне цеви, моторних делова и отвор за евакуацију. Композитима је повећан животни век лопатице ротора хеликоптера и омогућују дизајнерима да побољшају дизајн сечива. Коначно, ваздушни оквири нове генерације хеликоптера ће бити у великој мери направљен од полимерних композита. Морнарица користи полимерне композите на својим фиксним крилима авиона, бродове и подморнице, ракете и сателите. Композити се користе у многим поморским програмима због својих акустичних својстава. Такође, се користе у пешадијском наоружању, где се углавном примењују за предње рукохвате, кундаке, разне облоге, сандуке оружја и то првенствено због великих ослобађања топлоте и притисака у току циклуса рада самог оружја [6].

Добијање многих полимерских композитних материјала били су скупљи него делови изграђени од метала, посебно у погледу трошкова набавке. Међутим, недавни напредак у пракси дизајнирања и производним технологијама композита смањили су трошкове и сада су јефтинији од металних делова.

Још 1993. године министарство трговине САД-а утврдило је да вредности композита са полимерском матрицом, металном основом и карбон/карбон композита у 1993. години на тржишту износила 2,68 милијарди долара, што представља повећање од 5,2 одсто у односу на 1992. годину (слика 4.2.). Подаци су прикупљени из више од 410 фирми, укључујући произвођаче сировина, добављаче опреме и произвођаче композитних производа и одвојених у девет тржишних сегмената: ваздухопловство (1), авио и војне сегменте (2), конструкција (3), потрошачки производи (4), опреме отпорне на корозију (5), електрични и електронски уређаји (6), бродарство (7), транспорт (8) и друго (9). У свету је на основу прикупљених података укупна вредност била 4.7 милијарди долара [6].



Слика 4.2. Приказ испоруке композита са полимерском матрицом по сегментима, 1993. године [6]

Широк спектар комбинација влакана смола је данас у употреби и тржиште за композитима са полимерним матрицама поготово у ваздухопловним и војним производима има велику потражњу. Донедавно, војне примене полимерних композита засноване су углавном на предности перформанси. Међутим, у протеклих неколико година, трошкови су постали све важнији фактор у војној производњи. У неким случајевима, цена је сада важнији од допунских побољшања у перформансама. Као

продукт повећању конкуренције, трошкови ће играти важнију улогу у цивилном и војном тржишту. У комерцијалном сектору, трошкови заједно са јединственом функцијом, дуго је била главна оцена за употребу композите са полимерним матрицама. На пример, чамци стаклених влакана нису само супериорни у односу на дрвене чамце у многим мерама учинка, такође су јефтинији за куповину и одржавање од дрвених чамаца. Кућишта за електронске уређаје произведени су брызганим обликовањем композита, такође могу бити значајно јефтинија од металних материјала. Као што је речено композити са полимерским матрицама састоје се од вештачких влакана (неорганског и органског порекла) и полимерских матрица [6].

➤ Технологија влакна

Типична влакна која се користе у данашњим полимерним матрицама композита су карбонска, арамидна и стаклена. Влакна се користе у многим облицима, као што су честице, кратка и дуга влакна. Они су пре свега одговорани за структурне особине композита, као што су снага и крутост. Облик влакна је обично изабран како би испуњавао посебно структурне захтеве које се постављају пред сваки композит. Специфична затезна чврстоћа композита у односу на алуминијум је приказан у табели 4.1. Специфичну затезну чврстоћу представља основни параметар за приказ структурних карактеристика односно способност материјала [6].

Табела 4.1. Упоредна анализа својстава влакнастих појачања [6]

Материјал	Густина (lbs./in. ³)	Отпорност на истезање (KSI)	Модул отпорности (MSI)	Специфична затезна чврстоћа x10 ⁴ [(lbs/in ² /lbs/in ³)]
С-Стакло	0.09	665	12,4	73.8
Карбон(T-300)	0.06	450	34	75
Карбон(T650-42)	0.06	730	42	121
Арамид(K-49)	0.052	550	18	105
Бором	0.09	510	58	56.7
Силицијум карбид	0.086	400	28	46.5
Алуминијум(7075-T6)	0.101	81	10,4	8.1

➤ Технологија смоле-пластичних матрица

Органске матрице, односно смоле, најчешће коришћене у композитима могу се поделити у две главне класе: термореактивне и термопластичне. Избор смоле је у великој мери заснован на крајњој намени дела, односно његовим потребним карактеристима да би био отпоран на температуру, агресивну животну средину, потребна жилавост и лакоћа производње (табелу 4.2.) [6].

Табела 4.2. Својства термореактивних и термопластичних смола [6]

Тип смоле	Температура процеса	Време процеса	Сервисно време	Отпорност на раствараче	Жилавост
Термореактивни	Низак	Висок	Висок	Висок	Низак
Термопластични	Висок	Низак	Низак	Низак	Висок

Термореактивне смоле мењају хемијски састав када се загревају (очвршћавају) до формирања високе чврстоће, високе крутости и доста кртих укрштених мреже. Овај процес је неповратан. Термореактивне смоле су коришћене за многе структурне апликације. Најчешће коришћене термореактивне смоле су: епокси, полиестар, фенолик и полимиде, што укључује и бисмалеимиде (табелу 4.3.) [6].

Табела 4.3. Својства термореактивних смола [6]

Тип материјала	Механичке особине	Највећа радна температура (°C)	Процесност	Цена
Епокси	Одличне	93-121	Добра	Ниска-средња
Полиестар	Пристојне	82	Добра	Ниска-средња
Фенолик	Пристојне	176	Пристојна	Ниска-средња
Полимид	Добре	260-315	Пристојно-теже	Висока
Бисмалеимид	Добре	176	Добра	Ниска-средња

Термопластичне смоле значајно разликују од термореактивних смоле и добијају на популарности. Термопластичне смоле су обично прилично високе молекулске тежине материјала, да би се обликовао прво се загреју, а затим им се формира облик. Одвија се хемијска реакција у процесу производни. Процес производње је реверзибилан донекле и термопластике се могу поново користити и реформисана у друге облике. Термопластике се могу поделити у четири опште подкласе: аморфне, кристалне, течне кристале и квази-термопластичне [6].

5. ВЛАКНА

Као ојачање конструкционих композита са пластичним матрицама користе се вештачка влакна неорганског и органског порекла, а у највећој мери стаклена, угљенична и армидна влакна [4].

Неалкална стаклена влакна Е квалитета су јефтина, имају високу чврстоћу, али релативно ниску крутост. Производе се и користе као сецкана влакна, стаклени мат, континуална влакна (roving, yarn), тканине и неткане траке. Стаклена влакна се користе као ојачање композита са полиестарском и епоксидним матрицама, који имају велику и растућу примену, пре свега, као конструкциони материјали. За специјалне примене производе се и користе стаклена влакна високог модула, С квалитета.

Угљенична влакна се производе у три квалитета, височврста (HS), високо модулна (HM) и влакна лошијег квалитета (А влакна). Прва два квалитета представљају врло квалитетно ојачање конструкционих композита, а добијају се полазећи од континуалних полиакрилонитрилних влакана, поступцима оксидације (стабилизације) и карбонизације. То су скупа влакна, одличних механичких окарактеристика (чврстоће 2500-4500 МПа, а деформације кидања 1-2 %, модула 200-300 МGа) и ниске густине (1700-1800 kg/m³). „HS“ угљенична влакна у комбинацији са епоксидним матрицама користе се као конструкциони композити високих карактеристика за специјалне намене, нарочито и ваздухопловству и васионској техници. Због изузетних механичких карактеристика до високих температура (2000 °C) HM угљенична влакна користе се као ојачања угљеник- угљеник композита за примену у ракетној техници, али и као ојачање композита са металним и керамичким матрицама [4].

Мене угљеничних влакана су ниске вредности деформације кидања, релативно мала жилавост и мања отпорност на удар. Несумњиво велику ману угљеничних влакана представља њихова цена (20-30 пута већа од цене стаклених влакана), има за последицу примену угљеничних влакана у областима које могу да поднесу ту високу цену. У ваздухоплову високу цену угљеничних влакана компензују уштеде у потрошњи горива код ваздухоплова са уграђеним деловима од композита са карбонским влакнама, који су 5 до 7 пута лакши од таквих металних делова. Развој у области карбонских влакана је фокусиран на уклањања недостатака производње и примене карбонских влакана. Снижавање цене производње се постиже повећањем примене и производње и напорима да се развије јефтинија производња влакана побољшаних карактеристика, полазећи од мезофазе катрана или целулозних влакана. Влакна добијена од ових сировина су сад лошијег, А квалитета, која налазе своју примену као ојачање бетона и других грађевинских материјала. Развој усавршених поступака добијања карбонских влакана довео је до развоја влакана повећане деформације кидања (коришћењем полазних „PAN“ влакана мањег пречника и веће чистоће), а побољшање отпорности на удар композита са угљеничним влакнама се постиже коришћењем епоксидне смоле повећане жилавости или коришћењем хибридних комбинација угљеничних влакана са армидним влакнима.

Влакна од полиароматичних амида, такозвана арамидна влакна, комерцијалних назива „Kelvar“ или „Twaron“ су најчешће коришћена органска влакна као ојачења конструкционих композита. Ова влакна имају ниску густину, релативне велике вредности чврстоће и модула и велику деформацију кидања. Користа се као ојачање композита са полимерном (епоксидним) матрицом који имају извредне карактеристике

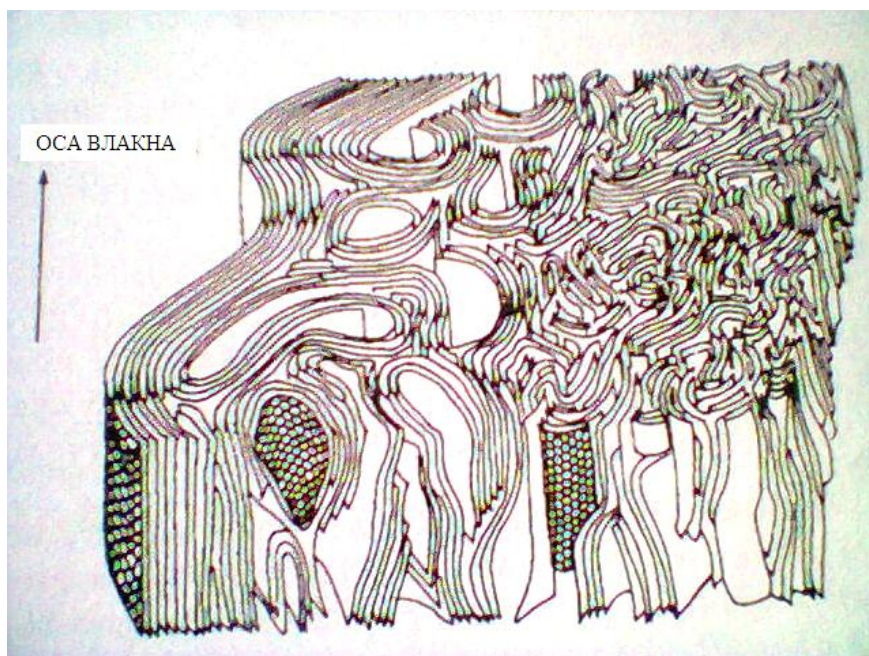
отпорности на удар и високу жилавост лома. Од ових композита се изађују панцирни делови одеће или друга средства анти балистичке заштите [4].

Таквозвани хибридни композити са пластичним матрицама као ојачање користе комбинацију стаклени, угљеничних и/или арамидних влакана. Оваквим хибридним комбинацијама ојачања могу се побољшати недостаци композита са само једном врстом влакана (ојачања) као што су ниска жилавост, лоша отпорност на удат, недовољна крутост или висока цена производње [4].

5.1. УГЉЕНИЧНА ВЛАКНА

Угљенична влакна великог модула и велике чврстоће, пречника 7 до 8 μm , израђена су од малих кристалиста турбостратичког карбона, структуре сличне графиту, са много дефеката паковања. У слојевима или основним равнинама монокристала графита атоми угљеника су повезане преко ковалентне σ везе (хибридне sp^2 везе) у хексагоналном расподелу. Паралелно и правилно слојеви у графиту су повезани мђусобно slabим π везама. Јединична ћелија кристала је анизотропна, са Јоунговим модулом у основној равни од 910 GPa и Јоунговим модулом од 30 GPa у правцу ц-осе. Турбо статички карбон је сличан графиту. Слојеви су поређани у правцу ц-осе паралелно, али са великим степеном неуређености. Растојање између слојева у турбо статичком угљенику (0,335 nm) је мање од оног у графиту (0,34 nm) [4].

Да би се добила високо модулни и високочврста структура слојеви графита треба да су орјентисани у правцу влакана. У карбонским влакнима јединични кристали су врло мали и орјентисани не потпуно правилно, са грешака и дефеката (слика 5.1.). Модул угљеничних влакана зависи од префектности орјентације кристали дуж правца влакана и битно зависи од поступака добијања влакана. Начин груписања слојева карбона кроз попречни пресек влакана одређује попречне и смичиће карактеристике влакана.



Слика 5.1. Приказ грађе угљеничних влакана [4]

Угљенична влакна добијена полазећи од полиакрилонитрила (engl. PAN based) типа и имају танку кору површинског слоја равни и унутршњост на насумично орјентисаних кристала. Насупрот томе карбонска влакна добијена из мезофазе смоле

имају структуру радијално орјентисаних слојева. Ове различите структуре влакана имају за последицу битно различите карактеристике влакана [4].

Постоје три у основи различита поступка добијања влакана са графитним слојевима преференцијално орјентисаним у правцу осе влакана.

У првом поступку полазна PAN влакна се затежу да се изведи орјентација молекулских ланаца дуж осе влакана. При загрвању затегнутих влакана у оксидационој средини долази до оксидације влакана и повезивања основних ланаца попречним везама. Оксидисана PAN влакна (PANOKS или PAN влакна) се редукују до структуре коју граде атоми карбона. Ова се на повишеним температурама (још увек у аргону као неутралној средини) трансформише у турбостатички графит. Модул и чврстоћа насталих влакана зависи од температуре финалног термичког третирања, која одређује величину и орјентацију кристала. Сличан поступак је коришћен при добијању влакана полазећи од вештачке свиле (engl. rayon), односно од непрекидних целулозних влакана.

У другом поступку, из растопа мезофазе катрана (изотопне и неизотропне фазе течних кристала, добијене полимеризацијом катрана нафте или каменог угља, при загревању на око 350 °C) „упредају“ се влакна пропуштањем растопа кроз бројне дужине. За време поступка „упредању“, при пролазу кроз отворе долази до узајамне оријентације предходно насталих течних кристала мезофазе. Снопови монофиламената се у току наредних процеса оксидације и карбонизације на око 2000 °C превode у угљенична влакна. Овако добијена влакна имају добијених полазећи од PAN влакана или од вештачке свиле [4].

У поступку термичког третирања на врло високим температурама карбонизована влакна добијена полазећи од мезофазе катрана, влакана вештачке свиле или PAN влакана под затежућим оптерећењем се „графитизује“. Клизањем графитних слојева повећава се орјентисаност кристала у правцу осе влакана. На тај начин се повећава крутост влакана. Вредност чврстоће влакана се, међутим, не повећава у току процеса „графитизације“. Композити са угљеничним влаканима када су постављени у искривљеним или савијеним позицијама не реагује добро на ударце [4].

Угљенична влакна типа I и II се добијају полазећи од PAN влакана. Притом се високо модулна влакна добијају у току описаног процеса графитизације. Модул високо модулних влакана од 450 GPa представља око 45 % теоријског модула графитних слојева у правцу а осе. Максимална чврстоћа високочврстих влакана од 3500 MPa је далеко од теоријске чврстоће (табела 5.1.). У складу са слојевитом структуром влакана трансверзални и модул смицања угљеничних влакана је знатно мањи од лонгитудиналног модула.

Табела 5.1. Карактеристике угљеничних, стаклених и Кевлар 49 влакана [4]

Карактеристика	Угљенична ХМ влакна	Угљенична ХС влакна	Стаклена Е влакна	Кевлар 49 влакна
Пречник влакна [μm]	7,9-9,7	7,6-8,6	8-14	11,9
Густина [kg/m^3]	1950	1750-1780	2560	1450
Јоунгов модул [GPa]	350-400	240-250	72,4	125
Попречни модул [GPa]	12	20	72,4	
Затезна чврстоћа [GPa]	2,0-2,8	2,5-4,5	2,1-3,5	2,8-3,6
Деформација кидања [%]	0,5-0,7	1,0-1,8	1,8-3,2	2,2-3,6
Коефицијент термичке експанзије [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	0,5- -1,2 (паралелно)	2,2-2,8 (паралелно)	4,9	-2 (паралелно)
	7-12 (радијално)	7-12 (радијално)		59 (радијално)
Термичка проводљивост [$\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	105		1,04	0,04

5.2. СТАКЛЕНА ВЛАКНА

Хемијски састав минералних стакала од којих су изграђена вештачка стаклена влакна чини SiO_2 са оксидима калцијума, бора, натријума, железе и алуминијума (табела 5.2.). Ова стакла су обично аморфна, мада извесан удео кристаличности настаје при загревању на повишеним температурама. То доводи до смањивања чврстоће [4].

Табела 5.2. Састав стакла (%) за израду влакана [4]

Састав	Е стакло	Ц стакло	С стакло
SiO_2	52,4	64,4	64,4
$\text{Al(Fe)}_2\text{O}_3$	14,4	4,1	25
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
$\text{Na(K)}_2\text{O}$	0,8	9,6	0,3
Be_2O_3	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

Е стакла се најчешће користе као ојачање композита, јер се добро извлаче, имају добру чврстоћу, модул, електричне карактеристике и добру отпорност на спољне атмосферске утицаје. Ц стакла имају повећану отпорност на корозију, али су скупља и имају лошију чврстоћу. С стакла имају већи модул и скупља су, а примењују се за специјалне намене, на пример, у ваздухопловству, где је повећана цена прихватљива. Континуална стаклена влакна се производе топљењем и континуалним напајањем резервоара основном сировином, топљеним стаклом. Дно резервоара од платине са

више стотина отвора омогућује да топљено стакло истиче кроз отворе услед гравитације. Тако се екструзијом аутоматски извлачи фини филаменти топљеног стакла кроз отворе. Стаклена влакна се вуку и намотавају на добош брзином од неколико хиљада метара на минут. Контрола пречника и механичких карактеристика влакана се регулише контролисањем хемијског састава, вискозитета растопа, пречника дужине и брзине намотавања [4].

Чврстоћа и модул стаклених влакана су одређени тродимензионалном структуром изграђивачких оксида. Тродимензијалну мрежу чине тетраеди са атомима кисеоника у рогљевима тетраедра повезани јаким ковалентним поларним везама са атомима силицијума смештен у центрима тетраедара. Каатјони осталих присутних оксида метала Me^+ су јонских везама повезани са јонима кисеоника $O^{\cdot}$. Ови јони нису директно укључену у мрежу. Структура везе и индивидуалних веза у може се мењати додавањем металних оксида и тако је могуће добити стаклена влакна са различитим хемијским и физичким особинама. Насупрот особинама карбонских и арамидних особине стаклених влакана су изотропне. Тако су Јоунгов модул у правцу влакана и онај управан на правац влакана исти. То је директна последица тродимензионалне мрежне структуре стаклених влакана [4].

Чврстоћа стаклених влакана зависи од услова добијања и ипитивања. Свеже извучена влакна са којима се врло пажљиво рукује да би се избегла оштећења површине влакана, имају чврстоћу од 3,5 GPa, са малом варијабилношћу појединачних мерења. Чврстоћа влакана опада када се влакна тестирају у влажној средини, услед адсорпције воде на површини влакана. До још значајнијег опадања чврстоће стаклених влакана долази кад стаклена влакна дођу у контакт са минералним киселинама. Чврстоћа и модул стаклених влакана су температурно врло зависне величине. Врло битан фактор који одређује чврстоћу стаклена влакна је њихово оштећење до којег долази због међусобног додира филамената у току операција процесирања. Прекривање влакана заштитним слојем (engl. size) у првим фазама поступка добијања влакана врши се прскање влакана воденим раствором са емулзирајућим полимером. Извесно оштећење стаклених влакана које најчешће представљају fine површинске пукотине је неизбежно. Утицај ових поршинских пукотина би могао да се смањи хемијским надгризањем, али то још увек нема практичног значаја. Нанети заштитни слој, „size“, зависи од будуће примене влакана и има више функција (заштита површина влакана од оштећења, повезивање влакана и олакшавање манипулације са њима, хемијско везивање између влакана и матрице) [4].

5.3 ОРГАНСКА ВЛАКНА

У последње време на значењу као ојачање конструкционих композита све више добијају органска влакна на бази врло добро извученог полиетилена велике густине, модула затезања од 60 GPa и затезне чврстоће од 1,3 GPa [4].

Неупоредиво већи комерцијалан значај имају влакна на бази ароматских полиамида, такозваних арамида, која су позната под комерцијалним називима „Kelvar“ или „Twaron“. Производе их фирме „Du Pont“ (САД) и „Enka“ (Немачака). Ова влакна се добијају поступком „испредања“ (engl. spinning) из раствора, али је врло мало детаља познато о технолошком поступку њиховог добијања. Производи Ди Понта на бази арамидних влакана су „Kelvar 29“ и „Kelvar 49“. Лошијих карактеристика, високе чврстоће и нижег модула, „Kelvar 29“ користи се као ојачање за каблове за вучу. „Kelvar 49“ има исту чврстоћу, али већи модул од Калвара 49 и користи се као висококвалитетно ојачање за конструкционе композите. Због велике деформације кидања ова влакна су дуктилна, а композити ојачани њима поседују велику жилавост и

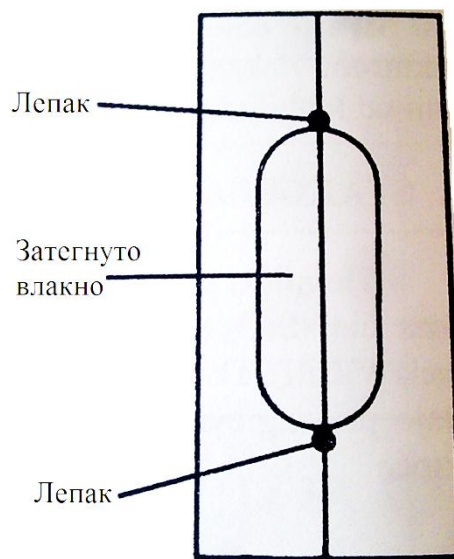
изузетну отпорност на удар, па се користе као материјали за антибалистичку заштиту. Влакна ароматичних полиамида имају мали модул смицања, слабе попречне карактеристике и врло малу отпорност на компресионо разарањ [4].

5.4 ТЕСТИРАЊЕ ВЛАКАНА

Влакна која представљају ојачања конструкционих композита испитују се у статичким механичким тестовима затезања у којима се одређују затезне карактеристике (чврстоћа, модул и деформација кидања) [4]:

- монофиламента и
- затегнутих снопова (по могућности неувијених) влакана импрегнисаних смолом.

Приликом вршења испитивања, влакна се постављају у носач који је приказан на слици 5.2.



Слика 5.2. Носач за тест затезања са монофиламентом [4]

Прорачуном карактеристика затезања добијају се [4]:

- затезна чврстоћа;
- деформација кидања влакана;
- модул затезања влакана;
- кориговане вредности деформације кидања и модула еластичности и
- константа пропустљивости система.

6. ПОЛИМЕРНЕ МАТРИЦЕ

Сваки од назива епоксидне, полиестарске, фенолне или полиимидне смоле односе се на мноштво полимерских супстанци, које имају заједнички начин добијања или неке заједничке елементе структуре. Да би се знало више о конкретној смоли треба знати полазне супстанце од којих је смола израђена и њихов однос, процедуру синтезе и хемијску анализу продукта. Ови подаци се могу рутински добити само од произвођача смоле, која носи своју комерцијалну ознаку. Потпун опис система смоле као матрице композита мора да садржи реагенесе за умреживање (engl. curing agents), њихов однос и режим умрежавања. Често, међутим, недостају неки детаљи о саставу смоле, као што су: количина непрореаговалих, невезаних супстанци у смоли, молекуларска маса и расподела молекуларске масе, температура дисторзије при загревању, однос изомеризације малеат-фуманат у полиестарској смоли итд. Недостатак информација о овим подацима може бити разлог за „необјашњиве“ разлике у резултатима из различитих лабораторија. Преко референтне комерцијалне ознаке смоле може се доћи до непознатих карактеристика и до потпуне спецификације смоле. Полимерне матрице конструкционих композита са влакнима су термореактивне (термоумрежавајуће) смоле или дуромери и термопластичне смоле или пластомери. При том се термопластичне смоле користе у композитима са кратким влакнима, а термореактивне смоле са континуалним; и то полиестарске са стакленим, а епоксидне смоле са карбонским, стакленим и/или са арамидним влакнима. У циљу елиминисања уочених недостатака епоксидних смола као матрица конструкционих композита, истраживања и развој смола били су усмерени у два правца: а) ка побољшању жилавости епоксидних смола и б) ка замени епоксидних смола као матрица термопластичних смола, у првом реду, полиетар-етаркетеном (ПЕЕК), полифениленсулфидном (ППС), полиетилен-сулфидом (ПЕС). Увођење ових термопластичних смола као матрица усавршених композита имало је предности, јер је тиме побољшана жилавост матрице па тако и карактеристике отпорности на удар композита. Увођењем термореактивних смола скраћен је поступак формовања композита, створена је могућност поправке оштећених делова и рециклирања матрица, препег од кога је добијен композит имао је неограничен век одлежавања. Недостаци матрица од термопластичних смола су остали: слаба адхезија влакно матрица и лоша хемијска и абразивна отпорност композита. Због тога замена епоксидних матрица термопластичним није добила своју практичну верификацију [4].

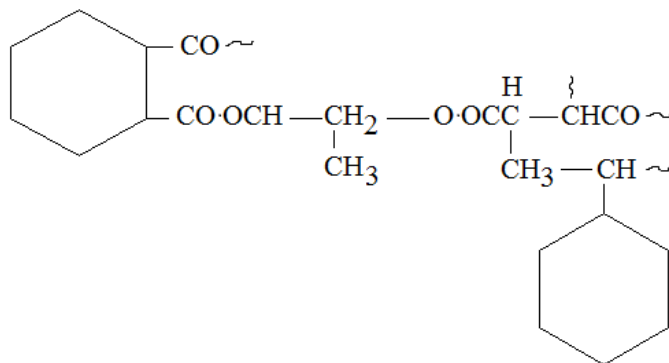
6.1. ТЕРМОРЕАКТИВНЕ СМОЛЕ

Као матрица усавршених композита од термореактивних смола (дуромера) углавном се користе епоксидне и полиестарске смоле. Течне смоле термореактивних полимера се превode у чврсте и крте смоле попречним везивањима полимерних ланаца, при чему долази до образовања стабилне тродимензионалне [4].

6.1.1. ПОЛИЕСТАРСКЕ СМОЛЕ

Најразноврснија класа термореактивних смола је класа незасићених полиестерских смола. Оне се добијају загревањем диола, на пример 1,2 пропилен

гликола, са смешом дикиселина или њихових анхидрида, у реактору на температурама 150-200 °С, у интерној атмосфери CO₂ или N₂. Смешу киселина представљају, на пример, малеинска и фумаринска као незасићене киселине, са местима за даљу полимеризацију и фтална и адипинска киселина као засићене киселине. Користи се мали вишак диола, а киселином катализована естерификација се изводи у присуству киселина који омогућује азеотропско уклањање воде. Кад се достигне степен полимеризације око 9, температура се спушта испод 140 °С. После издвајања ксилена у систем се додаје стирен, као незасићени мономер, који садржи довољни инхибитора превременог умрежавања. Смола охлађена на собну температуру је припремљена за примену. Стиреном третиран полиестар може се представити формулом (слика 6.1.).



Слика 6.1. Приказ формуле полиестарске смоле [4]

6.1.2. ЕПОКСИДНЕ СМОЛЕ

Као и полиестарске смоле, епоксидне смоле не ослобађају испарљиве продукте при умреживању и за умреживање није потребна опрема која би радила под високим притисцима. Епоксидне смоле садрже у структури епокси групе (два суседна атома угљеника повезана са атомом кисеоника)(слика 6.2.) [4].



Слика 6.2. Приказ структуре епоксидне смоле [4]

Најважније епоксидне смоле су оне које се добијају од бис-фенола А и епихлорхидрина. Мешају се у реактору на око 50 °С и лагано греју на 115 °С, када се као катализатор додаје алкални глицидилетар. После екстракције катализатора врелом водом, продукти се суше. Умрежавање епокси смола се врши у аутоклавима или калупима под ниским притиском (око 500 kPa), на повишеним температурама (од 120 °С за нискотемпературне смоле А типа и 117 °С за високотемпературне епокси смоле Б типа) уз додатак једињења са активним водоником: амина (посебно алифатских), полиалкохола, полифенола или органских киселина, односно њихових анхидрита. Попречно везивање при умрежавању реализује се преко епокси или хидрокси група [4].

6.1.3. КАРАКТЕРИСТИКЕ ТЕРМОРЕАКТИВНИХ СМОЛА

Термомеханичке особине чврстих термореактивних смола зависе од молекулске јединице и од величине и до густине настале макромолекулске мреже. Структура

чврстог полимера зависи од полазних супстанци и начина вођења процеса умрежавања. Треба истаћи да је процес умрежења неповратан, а да се настала чврста смола при загревању не топи, него разара [4].

Умрежавање може да се раелизује на собној температури (полиестарске смоле) или у току циклуса умрежавања на повишеним температурама, уз евентуалну примену притиска (епоксидне смоле). Циклус умрежавања обухвата дефинисани режим загревања система, држање система одређено време на одређеним температурама, уз примену одговарајућег притиска. Након циклуса умрежавања чврста смола (посебно полиестарска) се повргава накнадном термичком третману на одређеној температури (увек већој од максималне температуре у поступку умрежавања). Смисао овог третмана је да се минимизује евентуално накнадно умрежавање и промена особина смоле и композита у току примене. Скупљање у току умрежавања и термичко сакупљање при хлађењу, после умрежавања, могу да доведу до ницања напрезања у композитним материјалима [4].

Термореактивне смоле у чврстом стању су аморфне грађе и изотропних особина. Карактеристично је да се оне топе при загревању. На одрђеној температури, такозваној температуру прелаза у стакласто стање при загревању (engl. glass transition temperature) ове смоле губе крутост. Ова температура представља горњу границу применљивости конструкционих композита. Зато су композити са овим смолама променљиви испод температура од 100 до 150 °C. Треба рећи да су неке термореактивне смоле ка што су ароматични полиамиди и полиимиди стабилнији на већим температурама од епоксида и полиестара.

Епоксидне смоле имају супериорније карактеристике од полиестарских смола (табела 6.1.). Тако епоксидне смоле поседују веће вредности еластичних константи и чврстоће, мање скупље при умрежавању и мањи коефицијент термичке експанзије. Чрстоћа адхезионе везе влакно-матрица је већа са епоксидним него са полиестарским смолама, али су епоксидне смоле скупље и имају већи вискозитет у течном стању. Епоксидне смоле имају широку примену у композитних апликација. Они углавном нуде веома добру отпорност на хемикалије и раствараче, али су им механичке особине угрожене влагом.

Табела 6.1. Типичне карактеристике термореактивних смола [4]

Особина	јединица	епоксидна смола	полиестарска смола
Густина	g/sm ³	1,1-1,4	1,2-1,4
Јоунгов модул	GPa	3-6	2-4,5
Поиссонов модул		0,38-0,4	0,37-0,39
Затезна чврстоћа	MPa	35-100	40-90
Компресиона чврстоћа	MPa	100-200	90-250
Деформација кидања	%	1-6	2
Температура прелаза у стакласто стање	°C	50-300	50-110
Температура попуштања под 1,82 MPa	°C	60-65	75
Апсорција воде у току 24 h на 20 °C	%	0,03	1,3
Скупљање при умрежавању	%	1-2	4-8
Термичка проводност	w m ⁻¹ °C ⁻¹	0,1	0,2
Коефицијент термичке експанзије	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	60	100-200

Чврсте термореактивне смоле се тртирају као крти материјали, пошто се у тесту затезања разарају кртим ломом који се иницира на површинским дефектима на епруветама. У тестовима компресије ови смоле манифестују тачку попуштања и разарају се после значајне пластичне деформације. Отуда су вредности компресионе чврстоће ових смола веће од затезних чврстоћа [4].

Полиестарске смоле могу да очврсну на ниским температурама, да обезбеде добре механичке и електричне особине. Међутим, оне имају тенденцију да апсорбују воду, што може негативно да утиче на механичке перформансе, нарочито на повишеним температурама. Полиестари поседују изузетно добру отпорност на киселине. Користе се у производњи радарских купола, подморских структура, трупова и јарбола.

Постоје три основне групе поступака добијања композита са термореактивним смолама. У првој групи поступака, ручном слагању, машинском намотавању и убризгавању, процесима умрежавања, на собној или на повишеној температури под притиском, предходи импрегнације влакана смолом. Композити са епоксидним смолама добијају се поступком пресовања препрега у аутоклаву или у калупу, а композити са полиестарским смолама и кратким влакнама се добијају и преко израде полупроизвода SMC (engl. sheet moulding compound) и DMC (engl. dough moulding compound) – трака и композитне масе за пресовање (умрежавање) у калупима [4].

6.2. ТЕРМОПЛАСТИЧНЕ СМОЛЕ

За разлику од термореактивних смола, термопластичне смоле или пластомери не садрже у структури попречне везе. Њихова чврстоћа и крутост су последица инхерентних особина маномера и врло велике молекуларске масе полимера. Ови фактори обезбеђују да се у аморфним термопластичним смолама створи велики степен молекуларне „заплетености“ која има исте ефекат као попречне везе, док у кристалним термопластичним полимерима постоји молекуларна уређеност на великом растојању. У аморфним полимерима повећање температуре доводи до размршавања ланаца и прелаза из крутог чврстог стања у вискозну течност. У кристалним полимерима загревање доводи до топљења кристалне фазе, коа такође прелази у аморфну вискозну течност. Ови процеси су реверзибилни и при хлађењу долази до прелаза из вискозне течности у круто, чврсто стање [4].

И аморфни и кристални термопластични полимери (пластомери) могу имати анизотропне особине, зависно од услова при очвршћавању. У аморфним полимерима анизотропија је последица испаравања молекулских ланаца до којег долази за време течења растопа у калупу или доцније за време пластичне обраде. У кристалним полимерима, кристлане ламеларне јединице развијају преференцијалну орјентацију, услед униформне нуклеације на површини или у текућем растопу и переференцијалног раста у неким правцима, због температурног градијента у растопу. Ово ефекти имају битан утицај на особине композитних материјала [4].

Термопластичне матрице се користе са ојачањем од кратких влакана, при добијању производа ињекцијалним формовањем под притиском. Од три термопластичне смоле које се користе као матрице композита, полипропилен и најлон су семикристалне (са 25 до 50 % кристаличности), а поликарбонат је аморфан: Од особине термопластичних полимера (табела 6.2.) чврстоћа и отпорност на загревање (температура попуштања при оптерећењу) зависи од поступка добијања, молекулске масе, расподеле молекулске масе и састави и структуре макромолекула.

Табела 6.2. Типичне карактеристике три основне термопластичне смоле као матрице композита [4]

Особина	јединица	полипропилен	најлон 6	поликарбонат
Густина	g/sm ³	900	1140	1060-1200
Јоунгов модул	GPa	1-1,4	1,4-2,8	2,2-2,4
Поиссонов модул		0,3	0,3	0,3
Затезна чврстоћа пропуштања	MPa	25-38	60-75	45-70
Деформација кидања	%	>300	40-80	50-100
Температура топљења	°C	175	264	-
Температура попуштања под 1,82 МПа	°C	60-65	75	110-140
Апсорција воде у току 24 h на 20 °C	%	0,03	1,3	0,1
Термичка проводност	w m ⁻¹ °C ⁻¹	0,2	0,2	0,2
Коефицијен термичке експанзије	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	110	90	70

Ове, као и друге термопластичне смоле, пре финалног разарања подносе велику трајну деформацију, отпорни на влагу, а њихове механичке карактеристике битно зависе од температуре и брзине деформације. Битна особина карактеристична за све термопластичне смоле је да имају изражен крип, временски зависну деформацију при константном оптерећењу. Кристални термопластични полимери показују добру отпорност на раствараче, одличну толеранцију оштећења, међутим, често показују неке варијабилност у погледу механичких карактеристика и могу да имају боље механичке особине него чисти аморфни термопластични полимери [4].

Термопластичне матрице се користе претежно са кратким влакнима у композитима који се добијају поступком ињекционог обликовања у калупима.

6.3. ТЕСТИРАЊЕ ЧВРСТИХ СМОЛА

Механичке особине чврсте пластике (и термоактивне и термопластичне) могу се одредити у свим статичким механичким тестовима, тестовима затезања, компресије или савијања. За све ове тестове постоје интернационални ISO стандарди за пластику, као и за ојачану пластику. Међутим, за пластику као матрицу влакнима ојачаних композита од превасходног значаја је одређивање затезних карактеристика [4].

Методе за одређивање карактеристика савијања за пластика и за влакнима ојачане композите су исте, али су параметри за извођење теста савијања у три тачке за пластику и унидирекционе композите различити. Колико је метода савијања у три тачке тести за квалитетно упоређивање, а не тест у којем се одређују „апсолутне карактеристике“ материјала, резултати добијени у тесту савијања пластике нису од значаја за објашњења механичког понашања композита, нити дају податке о карактеристикама композита који би се могли користити при прорачунима.

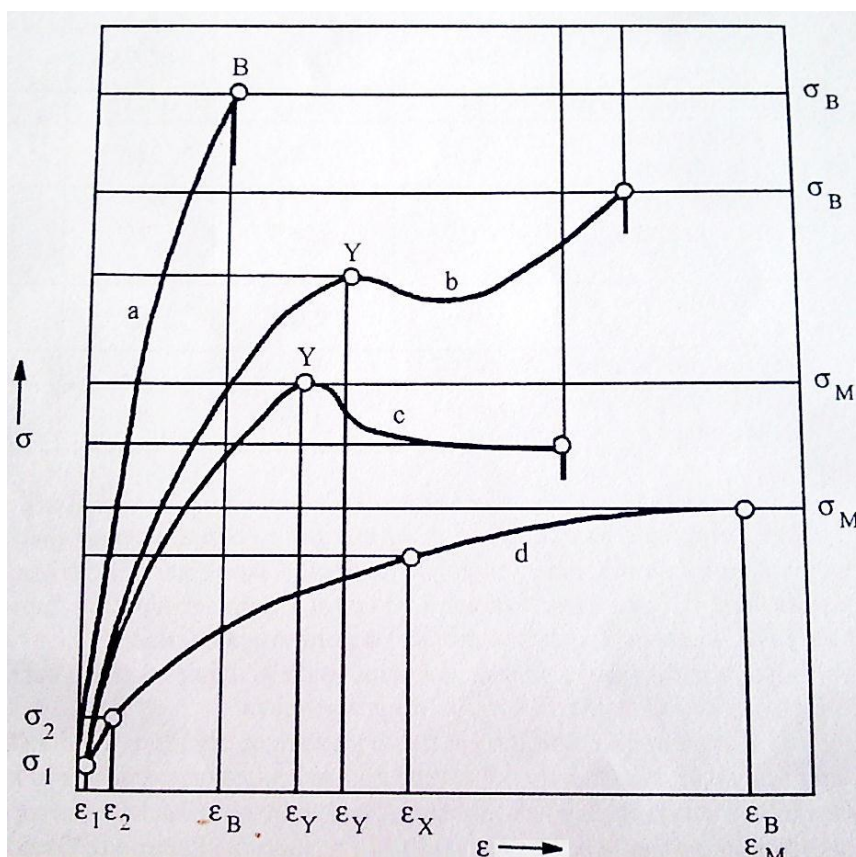
Карактеристике компресије чврсте пластике се одређују у једноставним тестовима који се битно разликују од тестова који се користе при одређивању карактеристика компресије унидирекционих композита. За чврсту пластику као изотропни материјал, метода компресије је аналогна методама за метале и керамику. Оваква је метода од интереса за композите са пластном матрицом ојачаном дисконтинуалним (кратким влакнима). У оквиру специјалних испитивања за

одређивање карактеристике компресије пластичне матрице може се користити метода компресије за униdireкционе композите [4].

Узроци чврсте пластике за тест компресије могу бити облика праве призме, цилиндра или цеви. Све површине епрувете за компресију (као, уосталом, и површине епрувете за затезање) треба да буду без огреботина, зареза или других површинских дефеката. Однос висине и пречника цилиндра (односно одговарајућих ивица призме) треба да буду већи од 2,5.

Услед структуре чврстих полимера, која се састоји од домена других ланаца макромолекула са попречним везама, понашање полимерне матрице под оптерећењем је високоеластичног типа. Дијаграм напон-деформација епрувете чврсте смоле под аксијалним (затезућим или компресионим) оптерећењем, представљен на **слици 6.3.**, састоји се од [4]:

- 1) области линеарне еластичности;
- 2) области нелинеарне еластичности или анеластичне десформације до тачке кидања (тачка Б - крива а.) или до тачке попуштања (тачка Y за дуктилне материје-крива б. и ц.) и
- 3) област сталне или пластичне деформације ($\epsilon > \epsilon_y$ – крива б. и ц.). [4]



Слика 6.3. Дијаграм напрезања-деформације епрувете чврстих смола при затезању [4]

Крива а је карактеристична за епрувете термореактивних смола. Криве б. и ц односе се на дуктилну и жилаву пластику са тачком пропуштања (engl. yield point), а крива д. Односи се на жилаву пластику без тачке пропуштања.

6.3.1. ТЕСТИТАЊЕ МАТРИЦА ЧВРСТИХ СМОЛА ЗАТЕЗАЊЕМ

Епрувета се истеже дуж веће, лонгитудиналне осе при константној брзини кретања моста, док се узорак не сломи или док напон (оптерећење), односно деформација, не достигне неку одређену вредност. За време извођења теста мере се оптерећење и издужење епрувете, при чему се добијају вредности следећих карактеристика:

- напона;
- деформације;
- модула затезања;
- поиссоновог односа;
- статичких параметара [4].

7. ПРИМЕНА ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА У СТРЕЉАЧКОМ НАОРУЖАЊУ

Војска је на прагу револуције материјала која ће се користити за израду стрелачког наоружања, што јачих, лакших и више трајнијих оружја, а кључ ове револуције јесу полимерни композитни материјали. Већина наоружања се и даље граде скоро у потпуности од челика, као што су већ више од једног века. Рад војске са композитним материјалима обухвата композите са металним матрицама, керамичким матрицама и угљеник-угљеник композите, поред полимерних матрица.

7.1. РАЗВОЈ ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА ЗА ПРИМЕНУ У СТРЕЉАЧКОМ ОРУЖЈУ

Један од основних карактеристика које треба да задовоље делови изграђени од полимерних композита је отпорност на топлоту. Топлота је једана од основних појава која се јавља у току процеса рада оружја и она је чест узрок хаварије система. Поред тога делови морају да издрже притике који се јављају и аресивно окружење у коме се оружје примењује. Поред способности полимерних композита да издржи високе параметре стања, још једна од предности је да су много лакши од метала [7].

Данас се све више тежи да се металне компоненте замена са полимерним композитима чиме се смањује тежина, која представља један од важних утицајних фактора током експлоатације оружја. Полимерни композити доносе и друге предности, као што је недостатак корозије, повећање укупне снаге и отпорност на временске услове [7].

Тестирање нових материјала се врши у комбинацији са стандардним стрелиштима и технологијом 21. века. Није довољно да само знати како је полимерни композит лаган, већ морамо да знамо како ће се полимерни композит понашати у самом окружењу. Тако се током конструисања морају испитати и друге излазне карактеристике, на пример: „Направи се пиштољ од пола килограма и пола килограма лакши од предходника, али мора да се види шта се жртвије зарад тога. Оружја премале масе теже је контролисати и већи трзај је усмерен на раме стрелца, оптику и друге додате на оружју, али оно представља и велика одговорност, јер ће то оружје користити много људи. Зато се током процеса развоја, оружје доводе у животну средину, директно испитују карактеристике оружја у средини у којој ће бити експлоатисане и на крају тражи оптимално решење које ће бити у оквиру тактичко-техничких захтева будућег оружја. Дизајнирање материјала у лабораторији се разликује од тестирања у условима експлоатације (морају да буду отпорна на спољне загађиваче, животну средину, на напоне, насилно кретања, и сурових услова складиштења). Компјутерски модели омогућују предвиђање понашања материјала и одредити његове слабости како механичких карактеристика материјала, тако и самог дизајна. Тестирања за која су некада биле потребне године, данас су потребни месеци, уз помоћ компјутерског моделирања и напредне технологије [8].

7.2. ДЕЛОВИ КОЈИ СЕ ИЗАЂУЈУ ОД ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА

Делови изграђени од полимерних композита се примењују у оружју за војне, цивилне и спортске намене. Све већи је потенцијал једноставних и поузданих решења виталних делова оружја израђених од полимера. Тежи се да што већи број делова буде изграђен од полимера. Полазећи од пушака, као и код већина опрема, лидери војске желе да пушка буде лакша, али трајнији и са што бољим карактеристикама у односу на тренутне. Са појавом Пикатини шине, калибара муниције, стандардизованих и нових пластичних материјала, јуришна пушка је еволуирао изнад очекивања.

Када се узме у обзир помак конвенционалних ратова у урбаним сукоба ниског интензитета, дошло се до радикалних промена у начину израде пушака и њиховог дизајнирања. То објашњава зашто су пушке које су се појавиле у протеклој деценији нису само препознате као изазовне идеје, већ су у реалном систему наоружања универзалне са изменљивим делови, а као подвиг генијалности сnose многа искуства која су стицана у ратовима протеклих деценија [8].

Када је први пут произведена полимер-челична пушка са хромирањем цеви и гасног клипна система била је прескупа за масовну примену у војсци, али приступачана за мање специјалне јединице. Почетак иградње ових пушака пратило је коришћење прилично најмодерније опреме и материјала, због чега су биле веома скупе, али данас је опрема „сазрела“, а цена је дошла на ниво са кога се може понудити целој војсци.

Данас основни делови пушака који се израђују од полимерних композита су:

- кундак;
- магацин;
- облога цеви;
- пиштољски рукохват;
- Пикатини шине и
- сандук.

Кундак је најчешћи део оружја који омогућава да се рука одржи и/или одмара у току пуцања. Тако рука остаје у стању мировања и вама омогућава прецизно гађање мете. Наслања се најчешће на раме, служи за повећање стабилност, прецизности и квалитетнијег нишањења. Обично пружа комфорност руке и спречава опекотине које би могле да се јаве на рукама или образу. Уколико је дизајн добар, онда можете дуго правити паузу како би сте лепо нациљали мету. У сваком другом случају, вероватно нећете имати довољно стрпљена да држите раме ослоњено о лоше одрађен кундак. Дobar кундак ће побољшати тачност у гађању и то кроз стабилност руке приликом трзаја.

Материјали који се користи најчешће за израду кундака су: **дрво и полимер**. Данас због развоја разноврсних полимерских композита, због мале тежине и бољих карактеристика, дрво се све више потискује из примене у оружју. Најчешће се дрвени кундаци израђују од ораховине и букве. Мана дрвених кундака је уколико се дрво не одржава како треба долази до појаве дефеката на кундаку, а такође се деформише услед утицаја влажности. Као резултат тога, дрво додирује цев, и може да има негативан утицај на прецизност. Невидљиви ефекти савијања кундака могу бити подједнако деструктивни [9].

На основу мана дрвених кундака кренуло се у изради кундака од **полимерских матрица са стакленим влакнима (слика 7.1.)**. Овакви кундаци су релативно лаки и не утичу на еколошке услове. Стаклена влакна спадају у две категорије. Оне са

алуминијумским кућиштем и оне без икаквог система шасија. Полимерски кундаци су изузетно чести и представљају најфлексибилније кундаке. Кундаци за чију израду се користи полимер се још називају и синтетички кундаци и по свом квалитету се могу доста разликовати од произвођача до произвођача. Исто тако, квалитет кундака умногоме зависи од којих синтетичких материјала су направљени. Ако је материјал квалитетнији, онда је наравно и цена доста већа. Чак, цена може бити већа и од дрвених кундака. Једна од најпознатијих произвођача пластичних кундака је фирма „McMillan“.



Слика 7.1. Приказ могућих решења склапања и расклапања кундака, као и приказ конструкцијских решења таквих кундака [11]

Због отпорности на влагу у екстремним климатским условима, синтетички односно полимерни кундаци нуде супериорну прецизност. Максимални резултати су постигнути у погледу квалитета.

Остале особине су:

- изузетно поуздани;
- водоотпорани;
- отпорни на огреботине;
- конзистентан облик;
- функционални;
- несаломиви;
- једноставни за руковање.

Предност пластичних кундака то што су често јако јефтини и лагани (мање материјала је потребно да се обезбеди потребна јачина кундака), а притом су јачи од дрвета.

Пластични кундаци држе предност над дрветом, када је реч о **стабилности**. Дрвени кундаци могу да се деформишу услед промена у влажности и могу се исто тако

проширити услед промене температуре. Примена лака на дрвеним кундацима може смањити утицај ових проблема, али синтетички кундаци су још увек најстабилнији. Пластични кундаци су популарни не само зато што су јефтинији, већ и зато што на њих не утиче влага као што је то случај код кундака направљених од ораховог дрвета. Њихови недостаци, како наводе поједини стручњаци, су: осетљивост на температурне промене, екстремне услове и недостатак ригидности који негативно утиче на прецизност пушке. Али опет, поред свих ових мана, остаје чињеница да су пластични кундаци добри за практичну примену [9].

На **слици 7.2.** и **7.3.** приказани су кундаци израђени су од ливених полимерских композита са различитом констукцијом, који се углавном користе у специјалним јединицама због својих педесивоти-универзалности (лако прилагођавање ергономији војника), преклапају се на леву страну и на чијим крајевима се налази гумени апсорбери.



Слика 7.2. Приказ телескопског кундака – типа М-4 (могућност подешавања по хоризонтали, са четири дужине развлачења) од полимерске матрице са стакленим влакнама и са опружним апсорбером [12]



Слика 7.3. Приказ кундака од полимерске матрице са стакленим влакнама, који има могућност подешавања обрзине по висини [12]

Магацини се такође уместо челика или легуре алуминијума израђују од полимерних композита са полупровидним телом (како би се имала боља прегледност броја метака унутар магацина) или мат црног полимера. Њихова основна намена је да обезбеди допремање метака до самог механизма за окидање и опаливање. Тако да полимерни композити морају бити отпорни на све услове експлоатације оружја како би сачували целовитост магацина и обезбедили допремање метака.

Магацини се деле на:

- Неодвојиви и
- Одвојиви.
 1. Оквири (прави и закривљени) и
 2. Добоши (аксијални, радијални и спирални).

На **слици 7.4.** и **7.5.** су приказани неки од примера магацина који су израђени од полимерских композита.



Слика 7.4. Приказ оквира израђеног од полимерних композита са полупровидним телом и мат црним полимером [13]



Слика 7.5. Приказ добоша израђеног од полимерних композита са провидним телом

Облоге цеви се такође израђује од полимерних композита са стакленим влакнима, чиме су својом лакоћом и одличним карактеристикама потиснуле облоге израђене од дрвета или других металних легура (алуминијумске, челичне). У овом раду биће приказана температурна анализа облоге од полимерног композита и од дрвета. На **слици 7.6.** биће приказане облоге цеви од полимерних композита са стакленим влакнима.



Слика 7.6. Приказ разних облога која се користи у свету [14]

Пиштољски рукохвати се готово увек израђују од полимерских матрица са стакленим влакнима и материјал мора да оптерећења која се јављају током експлоатације (издрже силе изазване стиском шаке, тежином пушке и услед пада пушке на сам рукохват). На слици 7.7. су приказана нека од решења пиштољских рукохвата која се користе.



Слика 7.7. Приказ примењених решења пиштољског рукохвата [15]

Пикатини шина која служи да би се на њој окачила додатна опрема, такође се израђује од полимерних композита и задатак јој је да сигурно причвршћује додатну опрему за само оружје (слика 7.8.). Неопходно је да издржи све силе и моменте који делују на њу, тако да полимерни композити са својим карактеристикама то испуњавају.



Слика 7.8. Приказ стандардне Пикатини шине од полимерних композита [16]

Сандук, такође може да се изradi од специјално отпорних полимерних композита, али поред полимера у већој мери је од легуре алуминијума. Тако је за пушку „Beretta ARX 100“ сандук начињен од ултра лаке, али невероватно отпорне пластике, познате као техно полимерска пластика, што доприноси лакој расклапању пушке (слика 7.9.).



Слика 7.9. Приказ пушке „Beretta ARX 100“ са полимерским сандуком [16]

Као што је приказано полимерски композити имају велики дијапазон примењености у изradi стрелачког наоружања. Поред примене у самој изradi делова оружја, полимерни композити се користе као заштитне превлаке металних површина. Тако су у току изrade ултра модерне пумп сачмаре „Remington Model 887 Nitro Magnum Tactical“ користили проверена и доказана знања и решења, конструктори су овде употребили армор локт поступак, којим су специјално отпорним полимером, пресвукли све металне спољашње површине (слика 7.10.). Цев и сандук су уместо спољашње заштите брунирањем, потпуно прекривеним одговарајућим, доста дебелим слојем отпорног полимера. Од истог полимера, који може да буде у црном или камуфлажном дезену израђени су кундак и подкундак Модела 887. Зоне које долазе у додир са руком стрелца су специјално рељефно дизајниране, како би се омогућио што чвршћи хват.



Слика 7.10. Приказ пумп сачмаре „Remington Model 887 Nitro Magnum Tactical“ пресвученом специјално отпорним полимером [16]

Што се тиче пиштоља, основни делови који се израђују од полимерних композита су:

- рам и
- оквир.

Један од првих пиштоља код којег је **рам** направљено од полимера, а не неког метала као код садашњих пиштоља био је немачки „Heckler & Koch VP70 9 mm“. Тежина пиштоља без магазина износи 820 грама, што је лакше од већине тадашних пиштоља (слика 7.11.) [17].



Слика 7.11. Први пиштољ „Heckler & Koch VP70 9 mm“. чији је рам израђен од полимера [16]

Рам се углавном израђује ливењем полимерског композита, тако је рам пиштоља „Smith&Wesson MP 9 Shield“ израђен од полимера „zytel“ ојачаног стакленим влакнима (слика 7.12.).



Слика 7.12. Приказ пиштоља „Smith&Wesson MP 9 Shield“, чији је рам израђен од полимера „zytel“ ојачаног стакленим влакнима [16]

Оквир пиштоља се такође израђује од ливења полимерског композита (слика 8.13.).



Слика 7.13. Проказ пиштољских оквира израђених од полимерских композита [16]

7.3. ПРИКАЗ ДЕЛОВА ОД ПОЛИМЕРНИХ КОМПОЗИТА КОЈЕ ИЗРАЂУЈЕ ФАБРИКА „ЗАСТАВА ОРУЖЈЕ“ У КРАГУЈЕВЦУ

У овом делу представљени делови оружја које фабрика "Застава оружје", које се данас налазе у производном програму фабрике како за војно, тако и за цивилно тржиште [18].

Производни асортиман подељен је на:

- наоружање и војна опрема и
- ловачко и спортско оружје.

„Застава оружје“ од полимерских композита израђује следеће делове оружја:

- кундак;
- пиштољски рукохват;
- оквири;
- облоге цеви;
- Пикатини шине и
- корице пиштоља [18].

Ови делови се раде у сарадњи са фабриком за производњу пластике „21. Октобар“ у Крагујевцу, а као материјал се користи полимер ојачан стакленим влакнима. Тако је на пушци М21 од полимера израђени кундак, пиштољски рукохват, оквир и облога цеви (слика 7.14.).



Слика 7.14. Приказ пушке M21 са полимерним кундаком, пиштољским рукохватом, оквиром и облогом цеви [18]

Поред оваквих концепција, делови се изарђују и према следећем дизајну (слика 7.15):

- а – кундак са подесивом образином;
- б - пиштољски рукохват и
- ц – облога са Пикатини шином.



Слика 7.15. Приказ друга концепције полимерског кундака, пиштољског рукохвата и облоге са Пикатини шином за пушку M21 [18]

Поред M21 полимерске делове израђује за далекометне пушке M93 „Црна стрела“ (слика 7.16.) и M12 „Црно копље“ – подесива образина и пиштољски рукохват је од полимера (слика 7.17.), али и на ловачком карабини M70PS кундак је изграђен од полимера ојачаног стакленим влакнима (слика 7.18.) [18].



Слика 7.16. Приказ далекометне пушке M93 „Црна стрела“ са кундаком, пиштољским рукохватом и облогом од полимера [18]



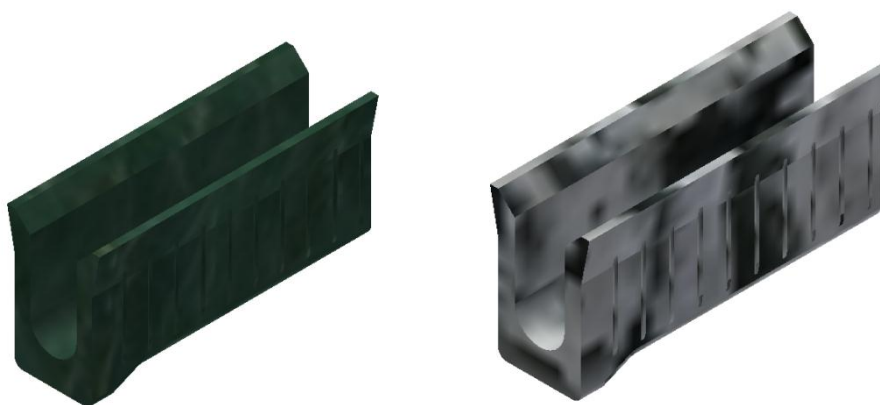
Слика 7.17. Приказ далекометне пушке M12 „Црно копље“ са полимерним пиштољским рукохватом и подешивом образином на кундаку од легуре алуминијума [18]



Слика 7.18. Приказ ловачког карабина M70PS са кундаком од полимера на чијем крају се налази гумени апсорбер [18]

8. ПРИМЕР ПРОЈЕКТОВАЊА ДЕЛА

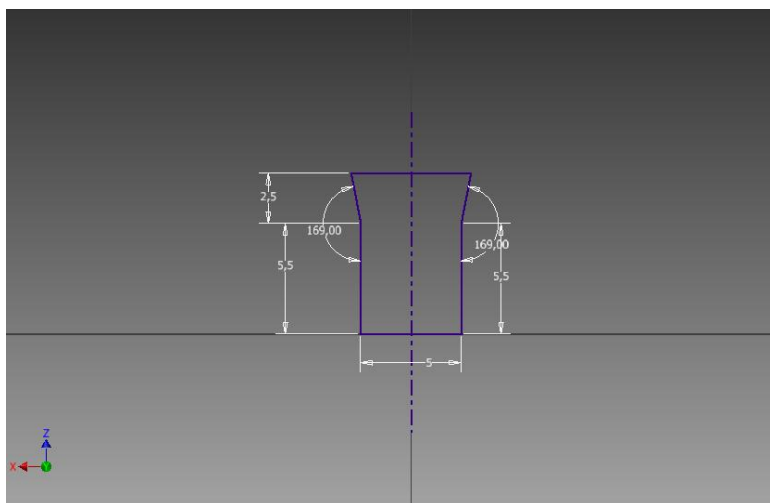
Предмет који се израђује техником екструзионог бризгања и представља саставни део пушке је **облога цеви** (слика 8.1). Пластична маса од које је начињен предмет је полимерни композит (**политетрафлуоретилен - тефлон** ојачаног са 15 % стаклених влакана) високе густине и постојаности на вишим температурама (PE-HD). Поступак моделирања урађен је у програмском пакету „Autodesk Inventor“.



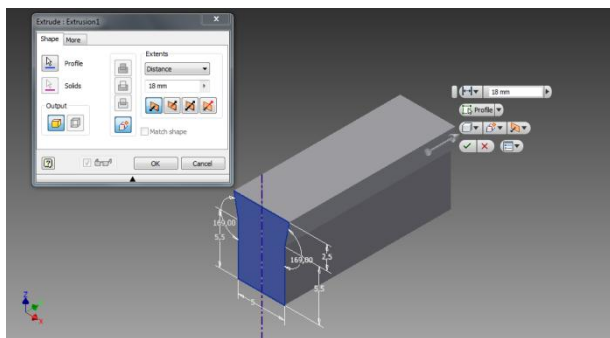
Слика 8.1. Приказ готове израде облоге цеви пушке са две варијанте камуфлажног премаза

Моделирање почиње отварањем „Sketch-а“ у XZ равни у којој се црта контура тј. база предмета.

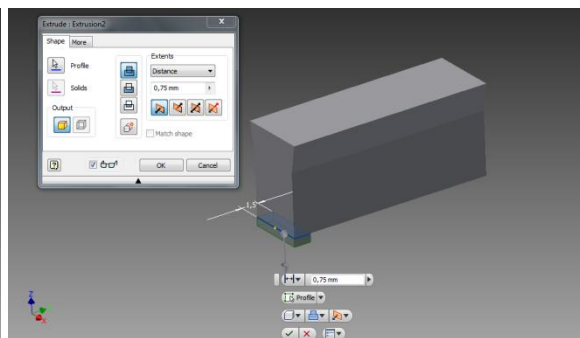
Нацртаној контури се додају коте и релације користећи функцију „Constraint“. Контуру је потребно дефинисати са довољно параметара (constraint-а) како би била потпуно дефинисана тј. док сви елементи контуре не буду љубичасте боје. Поступак моделирања биће илустрован **сликама 8.2 – 8.12**.



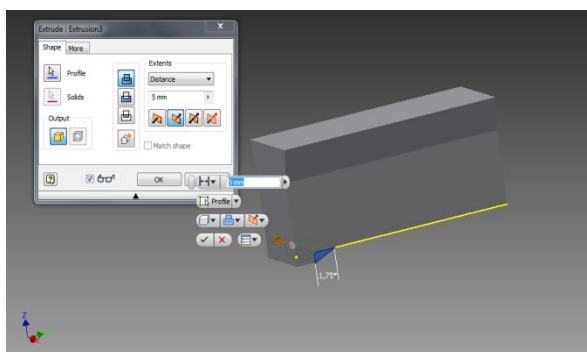
Слика 8.2. У „Sketch-у XZ“ нацртали смо скицу профила предмета



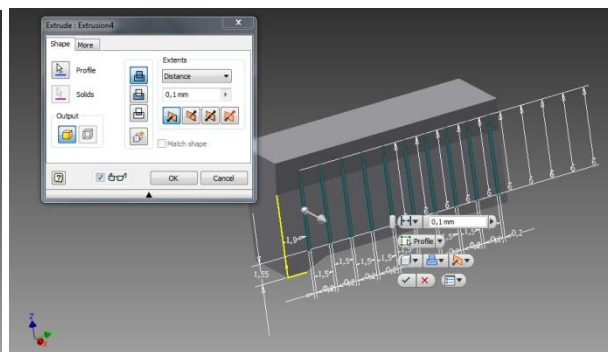
Слика 8.3. Опцијом „EXTRUDE“ направимо део дужине 18 mm



Слика 8.4. Затим истом опцијом правимо доњи испуст

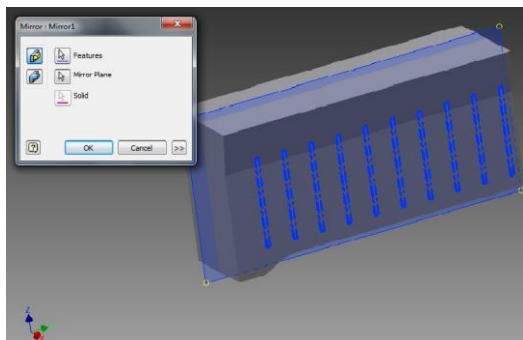


Слика 8.5. Истом опцијом правимо оборену ивицу

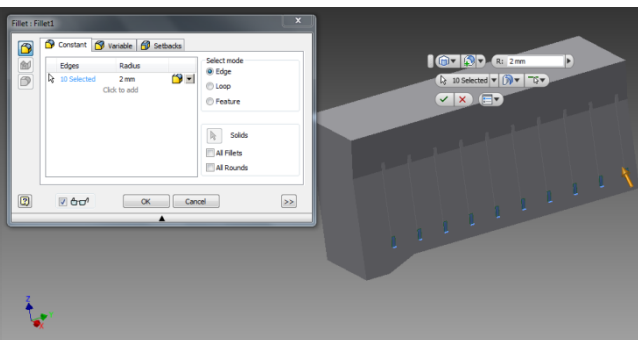


Слика 8.6. Опцијом „EXTRUDE“ правимо ребро

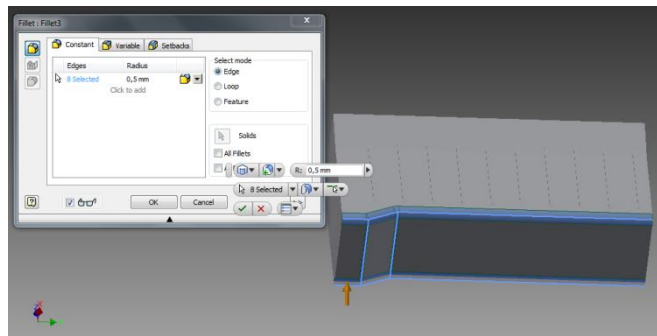
Ребра се постављају како неби дошло до проклизавања руке по облози током њене експлоатације и омогућује сигурну контролу пушке.



Слика 8.7. Опцијом „Mirror“ врши се постављање ребара и на другу страну рукохвата

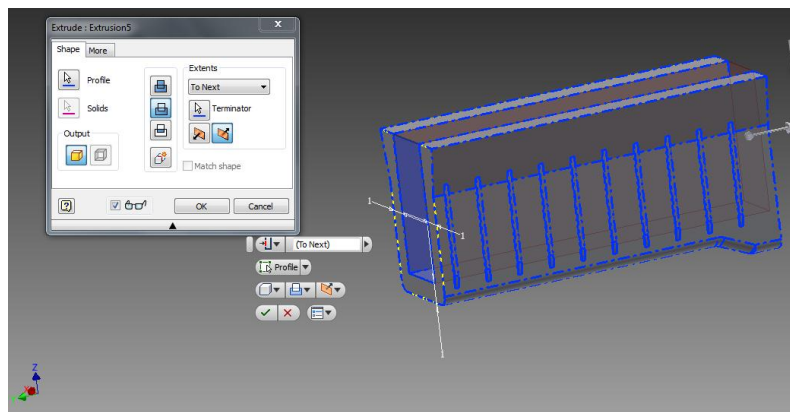


Слика 8.8. Приказује обликовање ивице ребара опцијом „Fillet“

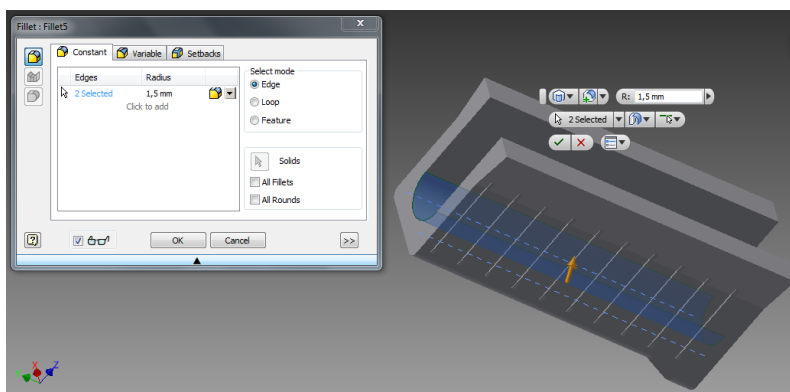


Слика 8.9. Опцијом „Fillet“ врши се обликовање ивица

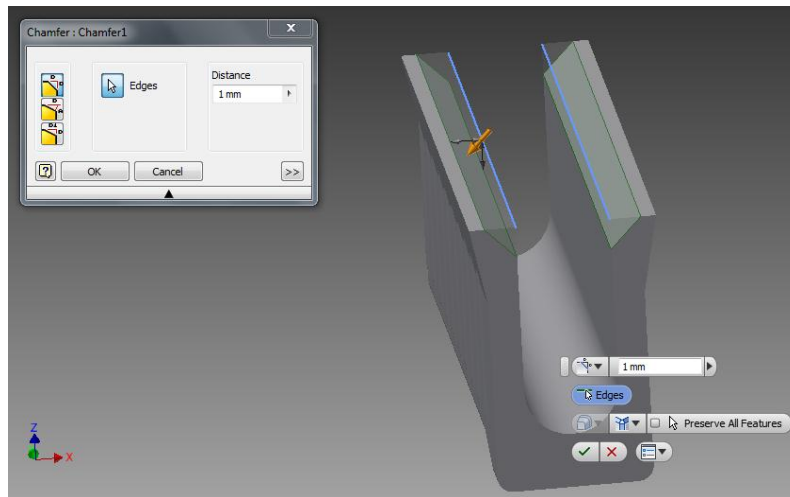
Обликовање ивица се врши ради добијања финијег облика облоге и да би се обезбедило лакше руковање и повећала њена прилагодљивост ергономији руке корисника.



Слика 8.10. Затим се врши исецање унутрашњости дела, откалањање материјала опцијом „EXTRUDE“



Слика 8.11. Врши се затим обликовање ивица унутрашњости дела, како би се прилагодила према цеви пушке



Слика 8.12. На крају се врши обарање ивица опцијом Chamfer како би се лакше демонтирала-монтирала облога са пушке и брже хладила цев

Главни разлог избора прераде полимерних материјала екструзионим бризгањем се огледају у уштеди материјала, кратком времену израде, мањем простору за производњу, као и одговарајућом за ову врсту полимерних композита. Одлука за **тефлон** је чињеница да су један од најотпорнијих полимерних материјала према деловању агресивних средина, јер је по бројним истраживањима отпоран према скоро свим агресивним срединама и одличне перформансе на екстремним температурама.

Приказан пример облоге цеви се може користити и прилагодити модификацијом на свим врстама пушке. Сам рукохват има предност у односу на конкурентне у својој малој тежини, јефтиној и лакој изради, горњим отвореним делом чиме се врши ефикасније хлађење цеви, као и својој конструкцији која је прилагођена ергономији руке корисника и којом се постиже безбедно коришћење.

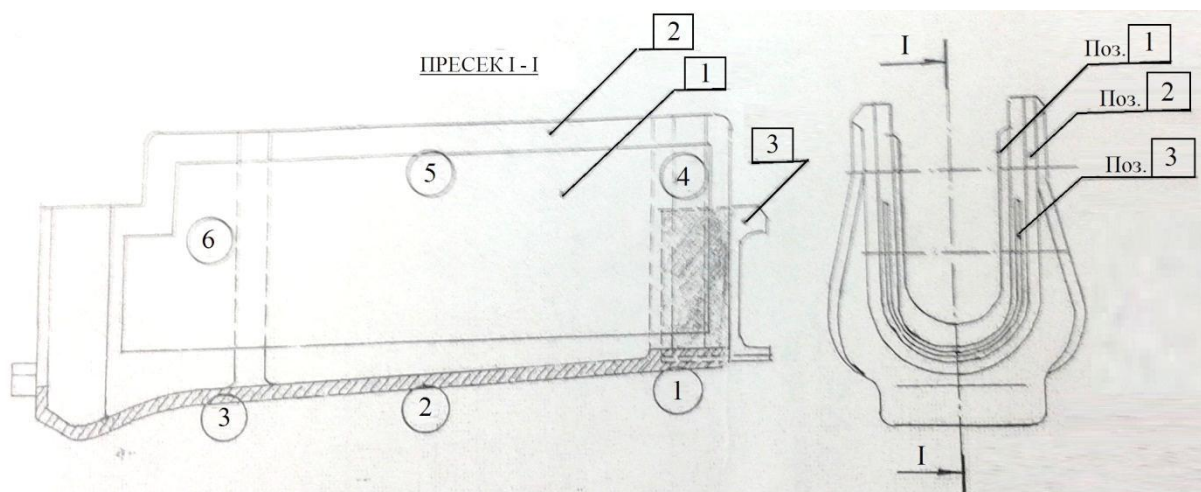
9. ТЕМПЕРАТУРНА АНАЛИЗА ОБЛОГЕ ОД ДРВЕТА И ОБЛОГЕ ОД ПОЛИАМИДА ЗА ПУШКУ M21

Захваљујући сарадњи са конструкторима из фабрике „Застава оружје“ извршио сам температурну анализу облоге израђене од дрвета – **ораховине** и облоге израђене од термоотпорне пластике (**полиамид РА6.6**). Испитивање је вршено при температури околине од 25 °С.

Уз извештај испитивања дати су следећи модели:

- модел термоотпорне пластичне облоге са приказаним мерним тачкама и
- модел доње дрвене облоге са приказаним мерним тачкама.

Функционални модел облоге израђене од термоотпорне пластике са уметком прохромских дебљина 0,8 mm уграђеним на ПА 5,56 x 45 mm M21A (**слика 9.1.**).



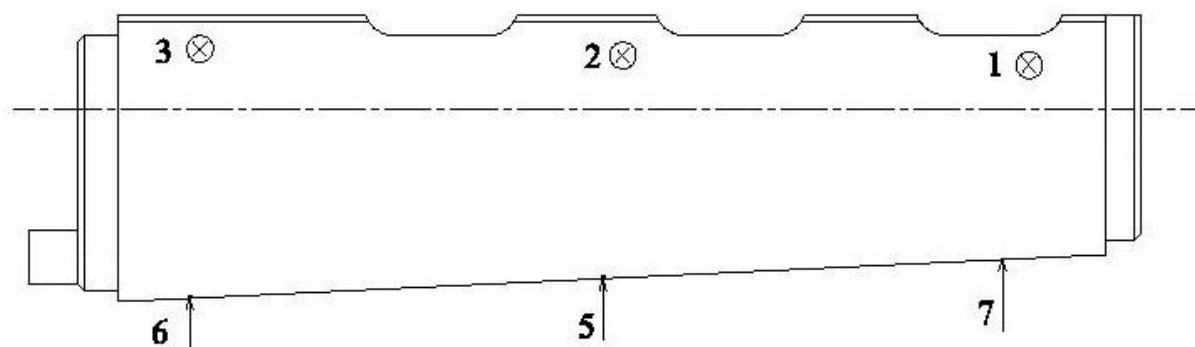
Слика 9.1. Приказ скице функционалног модела облоге од полимера са означеним тачкама мерења и позиција делова

Мерења температура су вршена после опаљених 150 мет. са спољне стране, а позиције представљају следеће елементе:

- поз. 1 – заштитни лим;
- поз. 2 – пластична облога и
- поз. 3 – лимени уметак.

Композитни материјал од кога је изграђена облога назива се **полиамид РА6.6** (трговачки назив **дуректин АКV 30** и **ВКV 30**)

Функционални модел доње облоге израђене у серијској производњи од дрвета за ПА 5,56 x 45 mm M21A (слика 9.2.).



Слика 9.2. Приказ скице функционалног модела облоге од дрвета са означеним тачкама мерења

Испитивање је извршено по програму испитивања опаљивања борбеног комплета од 150 метака у режиму паљбе по СОРС 800/00 и прогресивним мерењем температура до 7 минута после опаљења. Мерења су вршена у лабораторијској просторији опитног центра фабрике „Застава оружје“ у Крагујевцу (помоћу специјалних мерних трака).

Резултати мерења температура обе облоге су дате у табелама 9.1. и 9.2.

Табела 9.1. Приказ измерених температура на мерним тачкама облоге од полиамида РА6.6

Места температурног мерења [°C]	1	2	3	4	5	6
Одмах после гађања	34,8	32	32,9	71	46	47,5
После 1 мин.	60,5	36,2	38,7	90,1	63	56,8
После 2 мин.	80	40,3	42,9	100,2	78,3	60,3
После 3 мин.	80,3	44,3	47,4	99	74	59,4
После 4 мин.	84,5	47,2	48	99,5	78,3	59,2
После 5 мин.	80	46,7	51,2	81	72,2	53,6
После 6 мин.	71,8	46,6	47,6	78,7	70	52,5
После 7 мин.	64,7	45	46,7	66,3	61,3	49,2

* $t_{okoline} = 25^{\circ}\text{C}$

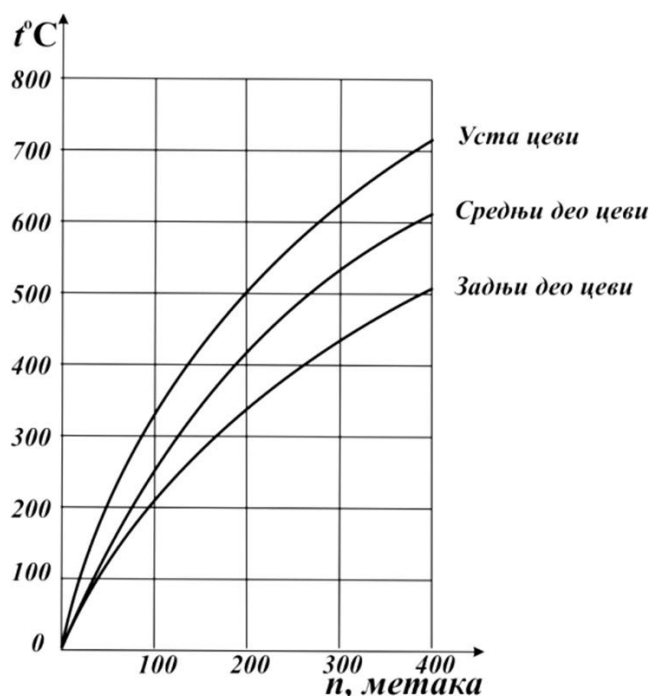
Табела 9.2. Приказ измерених температура на мерним тачкама облоге од **ораховине**

Места температурног мерења [°C]	1	2	3	4	5	6
Одмах после гађања	43,6	32,6	33,7	36,8	36,2	35,4
После 1 мин.	67,6	41,5	41,6	50	47,5	42,3
После 2 мин.	63,1	41,5	44,5	56,2	46	43,2
После 3 мин.	75,4	46	40,2	57,1	52,8	47,8
После 4 мин.	71	42,2	40,7	61	51,7	45,5
После 5 мин.	59	41,6	41	56,5	48,2	44,5
После 6 мин.	55,3	41,6	39,3	57	45	43,3
После 7 мин.	54,4	40	39	51,6	44	43

* $t_{okoline} = 25^{\circ}\text{C}$

19.1. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ ВЕЛИЧИНА МЕРЕЊА

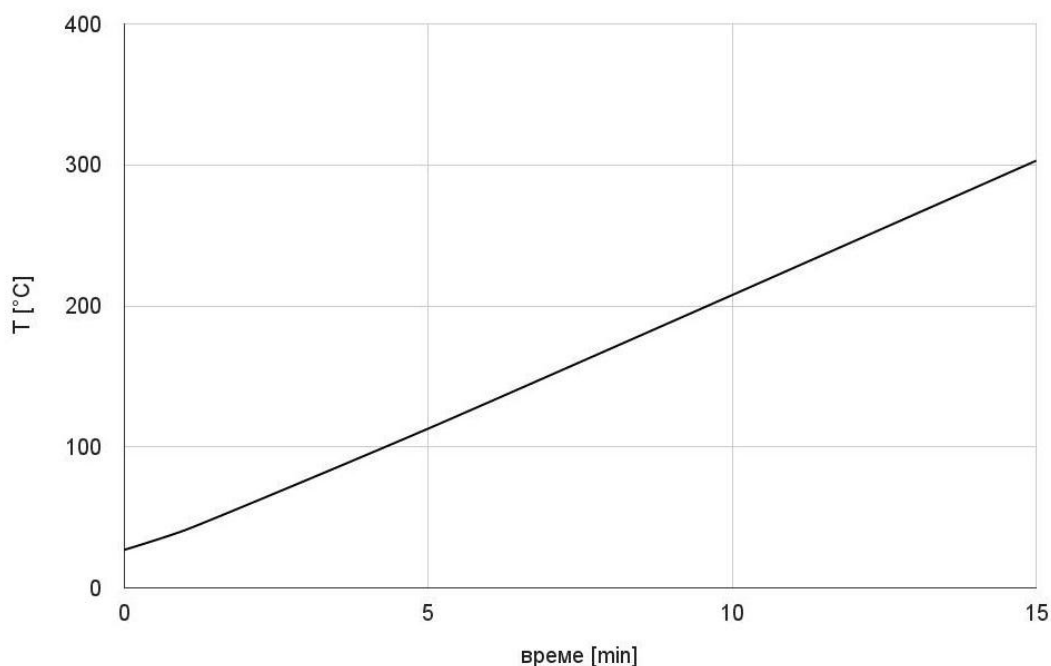
Величина температуре спољашњости цеви пушке М21 зависи од броја испаљених метака и променама по дужини цеви (слика 9.3.), а такође зависи и од режима паљбе, тако да је ово испитивање извршено по програму опаљивања борбеног комплекта од 150 метака у режиму паљбе по СОРС 800/00.



Слика 9.3. Зависност загревања цеви од броја испаљених метака и променама по дужини цеви за срељачко оружје [19]

На основу испитивања загрејаности спољашњег дела цеви опушке М21, које је вршила колегиница за свој рад, на средишњем делу цеви температура је након испаљених 186 метака (јединачном и рафалном паљбом) достигла вредност од 303°C

(слика 9.4.) [20]. Тако да облога мора да издржи ту вредност температуре, а да јој механичке и хемијске карактеристике остану непромењене.



Слика 9.4. Приказ линеарног раста температуре спољашњости цеви на средишњем делу пушке М21 у зависности од времена [20]

На основу урађене температурне анализа облоге цеви уочено је да облога од полиамида РА6.6 има нешто веће вредности него облога израђена од дрвета, међутим уочено је да код полиамида РА6.6 долази до бржег хлађења односно до наглог пада температуре на мереним тачкама. Таква појава је настала захваљујући њеној конструкцији, али и самом материјалу од кога је израђена облога. Поред тога полиамид РА6.6 може да издржи темепературе и до 260 °C и има веома малу апсорпцију влаге (2.5-3,1 %)(табела 9.3.), што је значајна предност у односу на дрво које представља хигроскопан материја и које почиње да се распада на температури од 100-130 °C (након низа испаливања борбеног комплекта дрво почиње да се распада). Облога од полиамида РА6.6 се једноставно изађује (са неколико алата), лако одржава, склапа и расклапа за разлику од дрвета где је све то сложеније. Полиамид РА6.6 се израђује од арамидни и стаклених вакана повезаних у термопластичној смоли и одликује се високој чврстоћи, отпорности на хабање, крутости и чврстини, имају добру хемијску отпорност и прераду.

Табела 9.3. Приказ карактеристика полиамида РА6.6 [21]

Карактеристика	Полиамид РА6.6
Тачка топљења [$^{\circ}\text{C}$]	260
Тепература стаклене транзиције [$^{\circ}\text{C}$] (сув)	50-60
Густина [kg/dm^3]	1,13-1,14
Апсорпција влаге [%], (23 °C, 50% влажности)	2,5-3,1

11. Закључак

Од самог открића **полимера** па до данас њихово усавршавање и производња константно расту, чиме су добили велику примену како у цивилним сектору тако и у војној индустрији. У почетку су били скупии због компликоване производње (неусавршене технологије) па су се углавном користили у војној авијацији (која је то компензовала мањом потрошњом горива, због лаке конструкције), али са усавршавањем технологије и полимера са додавањем одређених сегмената (**полимерни композити**) нашли су примену у наоружању и у другим елементима војника будућности.

Огроман број слободних влакана (постојећих врста) и матрица смоле омогућавају готово неограничену слободу и креативност у инжењерингу оптимације материјала за било коју примену.

Кључне предности полимерних композита у војним апликацијама су:

- минимално одржавање;
- отпорност на корозију;
- само подмазивање (специјализована композита);
- дуг век трајања (уколико је заштићен УВ индекс);
- мала тежина (у поређењу са алтернативама) - нарочито важно за ваздушну-транспортну опрему (као што је замена оклопа за „Хамере“);
- променљивост физичких својстава у зависности од специфичности апликације;
- радар – невидљиви и
- ниска термичка потпис.

Постоје и друге предности које су специфичне за поједине полимерне композите, а посебно зависне од ојачавајућих влакана која се користе.

Тежња да војник располаже са најсавременијом опремом и на основу тога ефикасност у извршавању задатака ће се повећати, а и повећаће се безбедност само војника. Овом констатацијом се кренуло и у развој пројекта који се назива „војник будућности“, тако да је кренуо развој композитног војника и трајаће у будућности. На пример одала неће имати само улогу затите војника већ ће му и повећати снагу, па чак и могућност лета ка чему ће се у будућности у току развоја тежити.

Сам тренда „смањења“ трошкова одбрањених оружаних снага имаће велики утицај на фирме које се баве производњом делова за одбрамбену намену. Због тога је покренута иницијатива интеграције војних и цивилних фирми која имају заједнички интерес у производњи одговарајућег производа, а такође се овим приступом могу смањити трошкови сировина и произведених добара (разних прототипова). Овим поступком ће се само повећати примена полимерних композита, а што већом применом тежиће се ка усавршавању технологија производње и самих материјала.

Данас се све више тежи да се металне компоненте замена са полимерним композитима чиме се смањује тежина, која представља један од важних утицајних фактора током експлоатације оружја. Полимерни композити доносе и друге предности, као што је недостатак корозије, повећање укупне снаге и отпорност на временске услове. Тако се захвалјујући развоју полимерних композита производе оружја чија је

концепција сачињена са чак и до 85 % делова који су израђени од полимерних композита. У будућности ће наставити усавршавање оружја и да се њени метални делови у потпуности заменили савременим – полимерним композитима.

У раду је приказан пример моделираног дела, који је израђен од једног од најотпорнијег полимерног материјала према деловању агресивних средина - полимерни композит (политетрафлуоретилен - тефлон ојачаног са 15 % стаклених влакана) високе густине и постојаности на вишим температурама (PE-HD). Тако је приказано са се одговарајућом конструкцијом и правим одабиром материјала може израдити такво оптимално решење које ће задовољити тражени квалитет.

Након извршене температурне анализе облоге цеви од полиамида РА6.6 и облоге од дрвета, оправдано је поверење које се у последње време све више полаже полимерним композитним материјалима, приказане су све предности полиамида РА6.6 у односу на дрво и приказане све карактеристике које поседује полиамид РА6.6.

Имајући у виду предности полимерних композита, њихова будућност за војне примене је осигурана. Чак и бетон наставља да се користи и нема знакова да ће се то променити. Обим производње од више егзотичних-скупих сировина као што су угљенична и арамидна влакна смањује трошкове и убрзава коришћење ових материјала. Новије материјали као што су угљеничне наноцеви додатно ће продужити употребу полимерних композита у војним апликацијама.

Литература

- [1] др Богдан Недић, Владислав Ђукић, „Пластичне масе“, Машински факултет, Крагујевац, 2004. године
- [2] Sandra K. Young, Frederick L. Beyer, and Matthew S. Bratcher, „Exploiting Polymer Nanomaterials Technology for the U.S. Army's Objective Force“, САД, Април 2002. године
- [3]https://www.google.rs/search?q=slem&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMI1uCQ5KDFyAIVQZ8UCh233wcB#tbm=isch&q=%C5%A1lem+&imgsrc=mA6AlnnUQMIgjM%3A, Октобар 2015. године
- [4] др Момчило Севановић, „Влакнима ојачани полимерни композити“, Београд, 2002. године
- [5] U.S. Department of Commerce, „Critical Technology Assessment of the U.S. Advanced Composites Industry“, (Washington, DC: U.S. Government Printing Office), Децембар 1993. године, пп.27-49
- [6] U.S. Department of Defense, „Low HAP/VOC Compliant Resins for Military Applications“, САД, Септембар 2011. године
- [7]http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2004/October/Pages/Army_Researchers3380.aspx, Октобар 2015. године
- [8] http://www.army.mil/article/146926/Composites_key_to_tougher_lighter_armaments/, Октобар 2015. године
- [9]<http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2013/march/Pages/IndustryShootingforArmy%E2%80%99sFirstNewRifleinHalfCentury.aspx>, Октобар 2015. године
- [10] <http://21stcenturyasianarmsrace.com/2013/09/20/the-assault-rifles-of-the-near-future/>, Октобар 2015. године
- [11]https://www.google.rs/search?q=polimerski+kundak&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIwKvApqffyAIVxVUUCH2fkA1d#imgsrc=qjNuTYgfwBWNdM%3A, Октобар 2015. године
- [12]https://www.google.rs/search?q=polimerski+kundak&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIwKvApqffyAIVxVUUCH2fkA1d#imgdii=qjNuTYgfwBWNdM%3A%3BqjNuTYgfwBWNdM%3A%3BPYAukWTxcLI8UM%3A&imgsrc=qjNuTYgfwBWNdM%3A, Октобар 2015. године

- [13] https://www.google.rs/search?q=okvir+puske&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIjOfcq6jfyAIVBlcaCh0F_guK#imgsrc=V7tpiQucU-VnSM%3A, Октобар 2015. године
- [14] https://www.google.rs/search?q=obloga+cevi+puske&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIodPviqnfyAIVhtoaCh20eQQR#imgsrc=d6X92-4UIPFFmM%3A, Октобар 2015. године
- [15] https://www.google.rs/search?q=polimerski+kundak&espv=2&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIwKvApqffyAIVxVUUCH2fkA1d#imgdii=qjNuTYgfwBWNdM%3A%3BqjNuTYgfwBWNdM%3A%3BgUTcgCNjfpkBP M%3A&imgsrc=qjNuTYgfwBWNdM%3A, Октобар 2015. године
- [16] www.majkasvihoruzja.com, Октобар 2015. године
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Heckler_%26_Koch_VP70, Октобар 2015. године
- [18] www.zastava-arms.rs, Октобар 2015. године
- [19] потпуковник др Александар Кари, „Конструкција аутоматског наоружања“, Предавања, 2014-2015. године
- [20] Невена Стевановић, Дипломски рад, „Експериментална анализа загревања цеви аутоматског оружја“, Крагујевац, Септембар 2015. године
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyamide>, Октобар 2015. године