

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: Механика

Број индекса: 501/2015

Милан В. Вучковић

**Анализа сила водећег прстена
пројектила**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Гордана Богдановић, ванредни професор – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да:

Сагласно знању и компетенцијама које је стекао на предметима Механика 1, 2 и 3, као и на студијском усмерењу, проучи све специфичности водећег прстена пројектила. Такође је потребно да проучи и ширу литературу која се тиче ове области и изврши анализу и прорачун сила водећег прстена, као и да предложи начине даљег унапређења у смислу употребе нових материјала и могућност примене композитних, односно влакнима ојачаних материјала.

Препоручена литература:

Александар Стаматовић, *Конструисање пројектила*, Београд, 1995.

Драги Димитријевић, *Водећи прстен*, Загреб, 1981.

Момчило Стевановић, *Влакнима ојачани полимерни композити*, Београд, 2002.

Крагујевац, 2019.

Ментор:

др Гордана Богдановић, ванредни професор

Садржај:

1. Увод.....	1
2. Нормална сила	5
2.1 Константан угао увијања жљебова.....	7
2.2 Променљиви угао увијања жљебова	8
3. Трошење водећег прстена	10
3.1 Константан угао увијања жљебова.....	10
3.2 Променљив угао увијања жљебова	12
4. Оптерећење водећег прстена и услови сигурности.....	16
4.1 Напон на притисак	16
4.2 Напон смицања.....	17
4.3 Напон услед дејства центрифугалне силе	18
5. Оптерећење и издржљивост поља цеви.....	20
6. Материјали за израду водећег прстена	22
6.1 Електролитички бакар	22
6.2 Легура бакра са никлом	23
6.3 Легура бакра са цинком	23
6.4 Бакар и нискоугљенични челик.....	23
6.5 Синтеровано гвожђе.....	23
6.6 Чисто меко гвожђе	24
6.7 Пластичне масе	24
7. Композитни материјали – теоријски осврт.....	26
8. Композитни материјали за израду водећег прстена.....	29
9. Покретање пројектила и услови урезивања.....	35
10. Закључак	38
Литература	39

Резиме

У оквиру дипломског рада „Анализа сила водећег прстена“ дата је дефиниција пројектила и укратко су описани његови саставни делови. Посебна пажња посвећена је водећем прстену као једном од главних делова пројектила. На почетку је наведена улога водећег прстена, затим је описана нормална сила која у фази кретања пројектила у цеви оруђа преко водећег прстена делује на пројектил и која доводи до обртног кретања пројектила. Посебна пажња посвећена је трошењу водећег прстена, оптерећењу и условима сигурности, као и оптерећењу и издржљивости поља цеви. Описани су материјали који су се користили и који се користе за израду водећег прстена, са посебним освртом на композитне материјале. На крају рада анализиран је процес покретања и урезивања водећег прстена у олук цеви.

Кључне речи: *пројектил, водећи прстен, нормална сила, композитни материјал.*

Abstract

Framework of the final exam „Analysis of the forces of the rotating band“ is the definition of the projectile and a short definition of the containing parts. A special care is dedicated to the rotating band, which is one of the main parts of projectile. At the begining, the role of the rotating band is cited. After that, a description of the normal force, which, while the projectile is mobile in the barrel of the gun, affects the projectile and leads to the rotation of the projectile. An extra attention refers to the depletion of the rotating band, load and the security conditions, and an expenditure/durability of the barrel. The next part of the work refers to the description of the materials which have been used and still being used for the production of the rotating band, with a special care of the composite materials. At the end, an analysis of the process of the startup and engraving of the rotating band in the rifling of the barrel is being presented.

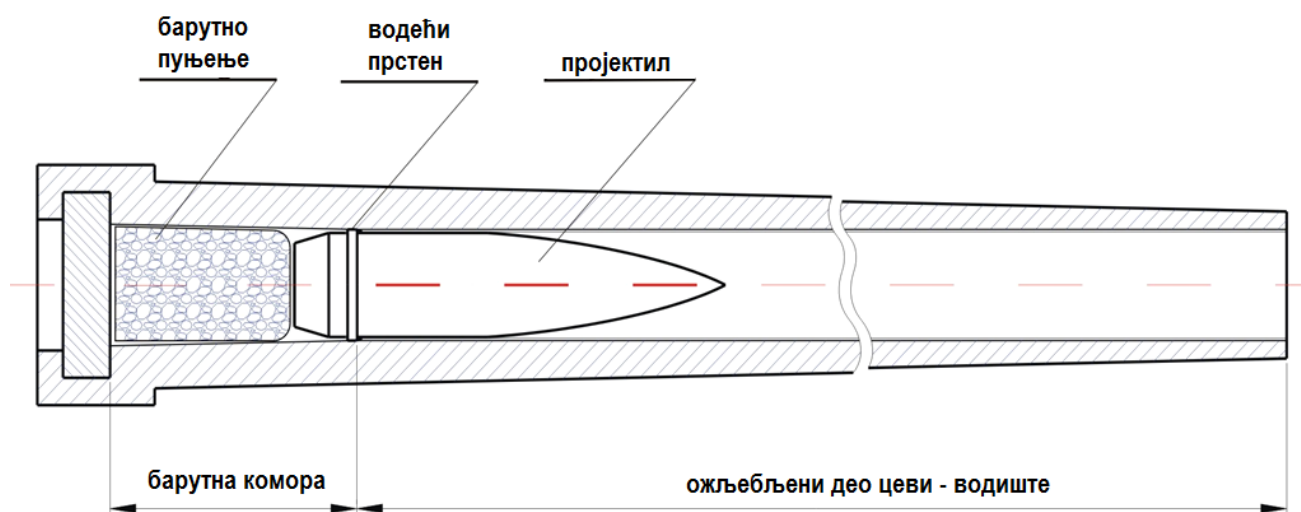
Keywords: *Projectile, rotating band, normal force, composite materials.*

1. Увод

Назив пројектил представља најпогоднију терминолошку ознаку за све предмете, са конструкционог становишта веома разноврсне, који се са одређеном намером упућују на унапред изабрани циљ (ради онеспособљавања или уништавања циља – разорним или другим дејством, ради задимљавања или осветљавања циља и слично). [1]

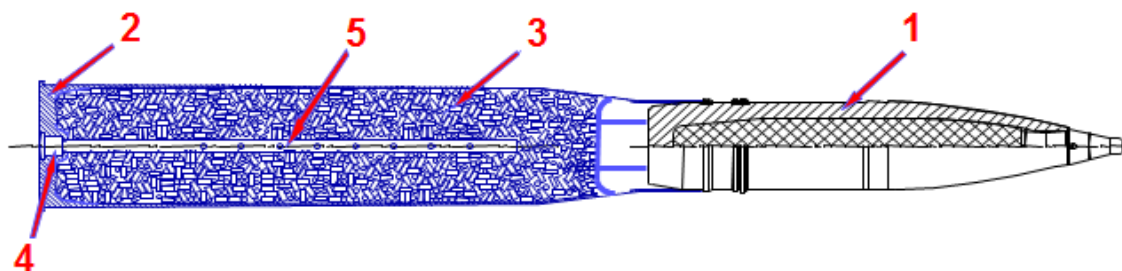
За упућивање пројектила ка циљу, користе се различите врсте погона пројектила [2]:

- активни – класичан погон пројектила, где се користи барутно пуњење, чијим сагоревањем у затвореном простору долази до раста притиска и покретања пројектила (Овакав погон се претежно користи код свих врста муниције. Посебну врсту погона имају бестрзајни топови, где се користи класичан погон са реактивним уравнотежењем оруђа);
- реактивни погон пројектила, при чему се погон остварује дејством реактивне силе, настале као реакција струјања материје из ракетног или млазног мотора (овакав погон имају све врсте ракета);
- активно – реактивни погон пројектила, где се пројектил најпре лансира помоћу класичног погона, а након напуштања лансера се остварује и реактивни погон.



Слика 1. Илустрација положаја пројектила у цеви оруђа [1]

Из тактичких, техничких и практичних разлога, најчешће је, пројектил који се лансира помоћу класичног погона, пре лансирања на циљ спојен са погонским пуњењем и на тај начин представља део метка.



Слика 2. Артилеријски метак [1]

1-пројектил, 2-чаура, 3-барутно пуњење, 4-топовска каписла са пламеником,
5-централна припална цев – пламеник

Дејство пројектила на циљу се може дефинисати као његова способност да својим правилним функционисањем оствари одређени степен оштећења или неутралисања циља. Савремени пројектили у зависности од намене могу имати широк дијапазон различитих дејстава на циљу, где се претежно користе [1]:

- кинетичка енергија читавог пројектила, његовог језгра или парчади;
- разорно дејство пуњења пројектила;
- дејство других врста пуњења (запаљиво, хемијско, димно, пропагандно итд.).

Сваки пројектил без обзира на дејство које остварује на циљу се састоји од [1]:

- кошуљице,
- енергетског дела,
- упаљача,
- водећег прстена.

Кошуљица је намењена да обједини све делове пројектила у једну целину и заштити их од штетних утицаја околине. Такође, кошуљица у току кретања пројектила кроз цев оруђа, односно на активном делу путање, значајно умањује оптерећења која се преносе на енергетски део. Поред ових намена, кошуљица има још једну веома битну функцију, а то је да услед активирања експлозивног пуњења пројектила, дође до фрагментације кошуљице при чему се остварује парчадно дејство на циљу.

Кошуљице артиљеријских пројектила су најчешће израђене од челика.

Конструкционе особине **енергетског дела** зависе од намене пројектила. На пример, енергетски део разорних пројектила чине јаки бризантни експлозиви и то најчешће тринитротолуен (ТНТ) или смеша ТНТ-хексоген и то најчешће у односу 50:50.

Код осветљавајућих пројектила се најчешће користе осветљавајуће пиротехничке смеше које се састоје од магнезијума или алуминијума у праху, баријум – нитрата и шелака или калофонијума као везива.

Код димних експлозивних пројектила за задимљавање се користи димно пуњење од белог фосфора, или раствора сумпор – триоксида у хлорсулфонској киселини, и имају централно постављено експлозивно пуњење од бризантног експлозива.

Енергетски део панцирних пројектила, поред мање количине јаког експлозива чини челично језгро итд.

Упаљач је део пројектила, који својим активирањем врши иницирање енергетског дела пројектила. Поред тога, упаљачи онемогућују нежељено активирање енергетског дела пројектила које може нарушити безбедност сопствених снага. Активирањем упаљача се ствара почетни импулс за поуздано иницирање енергетског дела пројектила. [2]

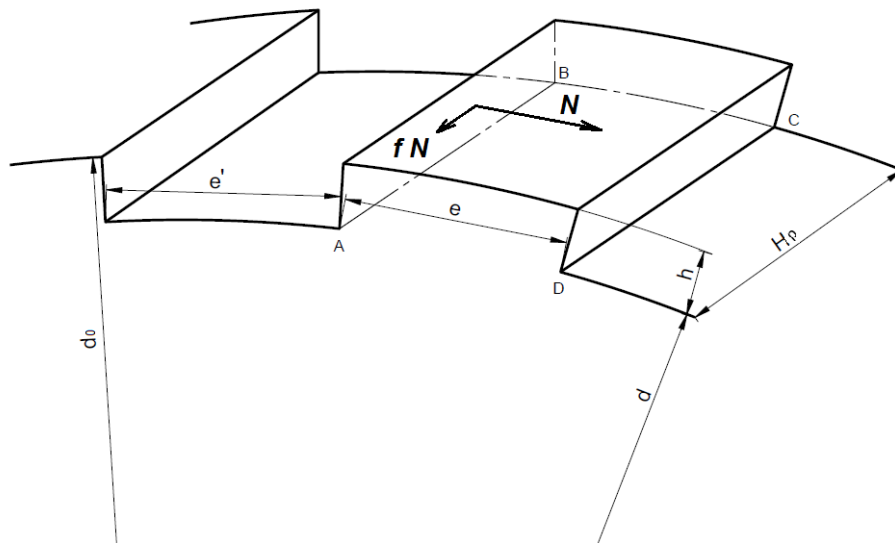
Сви пројектили који се испаљују из класичних артиљерисјких система са ожљебљеним цевима имају **водећи прстен** који има улогу да [1]:

- на пројектил пренесе обртно кретање обртно кретање око уздужне осе симетрије пројектила, неопходно за стабилизацију пројектила приликом лета;
- што потпуније заптива цев у току кретања пројектила и на тај начин онемогући продирање барутних гасова у простор цеви испред пројектила (често се у случајевима где је интензивно трошење цеви, иза водећег прстена поставља прстен од гуме или пластичне масе чиме се обезбеђује заптивање); истицање барутних гасова кроз простор између пројектила и цеви оруђа, изазива ерозију цеви која је утолико већа уколико је већи максимални притисак барутних гасова, а такође се повећава и растурање почетне брзине што може довести до подбачаја поготка;
- обезбеди коаксијалност уздужне осе симетрије пројектила са уздужном осом симетрије цеви оруђа у току кретања пројектила;
- обезбеди идентичан положај свих пројектила у случајевима када пројектил није чврсто везан за чауру (дводелни и полусједињени метак);
- при полазу пројектила осигура почетни притисак барутних гасова (притисак форсирања) који омогућује правилно сагоревање барутног пуњења.

При полазу пројектила долази до урезивања водећег прстена у жљебове цеви, због чега је у току даљег кретања пројектила, транслаторно кретање пројектила праћено и обртним кретањем захваљујући чврстој вези водећег прстена и кошуљице пројектила.

Између параметара транслаторног и параметара обртног кретања пројектила постоји функционална веза, па је, с обзиром да транслаторно кретање има карактер убрзаног кретања, сасвим извесно да ће и обртно кретање пројектила бити променљиво.

У фази кретања пројектила у цеви оруђа, преко водећег прстена, на пројектил делује, нека сила nN која је променљивог интензитета и која доводи до обртног кретања пројектила (слика 3).



Слика 3. Сегмент водећег прстена након урезивања у жљебове цеви [1]

Водећи прстен мора бити тако пројектован, да може издржати сва напрезања која се јављају услед дејства силе nN и силе трења fnN , односно [1]:

- да се под дејством силе nN не компромитује чврста веза између кошуљице пројектила и водећег прстена;
- да под дејством силе N не дође до смицања у подножју зуба водећег прстена који испуњава који испуњава жљеб цеви;
- да се под дејством силе N на бочну страну зуба водећег прстена зуб не истроши до те мере да долази до компромитовања функције водећег прстена;
- да не долази до откидања водећег прстена на почетном делу путање услед дејства центрифугалне силе.

2. Нормална сила

Сагласно литератури [1] [3] приказан је поступак добијања израза за нормалну силу при константном и променљивом углу увијања жљебова.

Силу N можемо одредити полазећи од диференцијалне једначине обртног кретања пројектила (слика 4):

$$J_x \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2} nN \cos \varphi \quad (2.1)$$

где су:

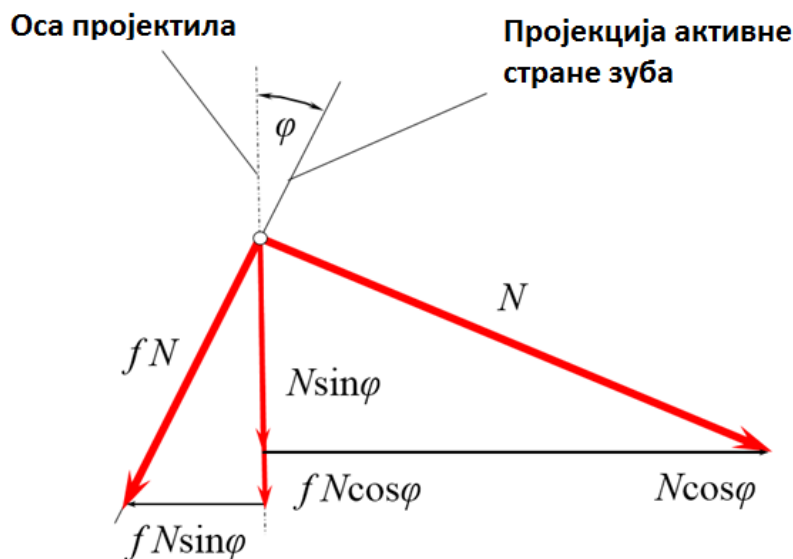
J_x - момент инерције пројектила око уздужне осе,

$\frac{d\omega}{dt}$ - угаоно убрзање пројектиле,

d - калибар пројектила,

nN - укупна нормална сила на „зубима“ водећег прстена (n - број жљебова, N - нормална сила на активној страни зуба),

φ - угао увијања, тј. угао нагиба зуба у односу на уздужну осу пројектила.



Слика 4. Шема оптерећења активне стране зуба [1]

Нормалну силу на активну страну зуба добијамо решењем једначине 2.1 по N :

$$N = \frac{2}{d} \frac{J_x}{n \cos \varphi} \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

Израз са силу N се може написати и у другом облику, уколико се уместо времена уведе пут пројектила као независно променљива:

$$N = \frac{2}{d} \frac{J_x V}{n \cos \varphi} \frac{d\omega}{dx} \quad (2.3)$$

јер је:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dx} \frac{dx}{dt} = V \frac{d\omega}{dx} \quad (2.4)$$

Промена угаоне брзине по путу $\frac{d\omega}{dx}$, није нам експлицитно позната, због чега је потребно да се трансформише у експлицитно познате величине из унутрашње – балистичког прорачуна. Знајући зависност брзине обртног и транслаторног кретања можемо писати:

$$\omega = \frac{2V}{d} \operatorname{tng} \varphi \quad (2.5)$$

односно:

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{2}{d} \frac{d(V \operatorname{tng} \varphi)}{dx} = \frac{2}{d} \left[\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \operatorname{tng} \varphi + V \frac{d(\operatorname{tng} \varphi)}{dx} \right] \quad (2.6)$$

јер је:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{dt}{dx} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

Транслаторно убрзање пројектила $\frac{dV}{dt}$ можемо одредити из једначине кретања пројектила:

$$\frac{dV}{dt} \approx \frac{gp}{G} \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.8)$$

где су:

p - тренутна вредност притиска барутних гасова,

G - тежина пројектила,

g - убрзање земљине теже.

За тачније прорачуне и пројектиле већег калибра, преко 100 mm , уместо d , користи се фиктивни пречник d_f , који износи:

$$d_f = \sqrt{d^2 + \frac{2ne}{\pi} (d_0 - d)} \quad (2.9)$$

где су величине d, e, d_0 приказане на слици 3 и представљају:

d - калибар пројектила,

e - ширина жљеба,

$d_0 = d + 2h$ - представљају одстојање дна два супротна жљеба мерено преко центра,

n - број жљебова.

Сменом израза 2.6 у израз 2.3 добијамо израз за нормалну силу на један зуб водећег прстена:

$$N = \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{1}{\cos \varphi} \left[\frac{dV}{dt} \operatorname{tg} \varphi + V^2 \frac{d(\operatorname{tg} \varphi)}{dx} \right] \quad (2.10)$$

Из израза 2.10 видимо да је сила N функција више променљивих величина, па нам је ради прорачуна водећег прстена и суда о његовој издржљивости значајан моменат када сила N постиже максималну вредност. Морају се размотрити два случаја:

- константни
- променљиви угао увијања жљебова,

зато што се цеви савремених артиљеријских система израђују и са константним и са променљивим углом увијања жљебова.

2.1 Константан угао увијања жљебова

У случају константног угла увијања жљебова ($\varphi = \text{const}$), имамо да је:

$\frac{d(\operatorname{tg} \varphi)}{dx} = 0$, тј. десни члан у изразу 2.10 је једнак нули, па добијамо израз за N :

$$N = \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{dV}{dt} \quad (2.11)$$

Ако израз 2.8 заменимо у израз 2.11 добијамо:

$$N = \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{gp}{G} \frac{d^2 \pi}{4} \quad (2.12)$$

Анализирајући израз 2.12 видимо да су све величине константе изузев притиска p , што нам указује да нормална сила N достиже максималну вредност када је притисак максималан, односно сила N је пропорционална промени притиска барутних гасова.

Израз за максималну нормалну силу на активну страну жљеба гласи:

$$N_M = \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{g}{G} p_{\max} \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{J_x}{n} \frac{\pi}{m} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} p_{\max} \quad (2.13)$$

Вредности константног угла увијања за неколико реализованих оружја и оруђа дат је у табели 1.

Табела 1. Вредности угла увијања, почетне брзине и обртне брзине пројектила на устима цеви [1]

Оружје - оруђе	Угао увијања жљебова	Почетна брзина пројектила (m/s)	Обртна брзина пројектила на устима цеви (rad/s)
Пушка 7,62 mm	8° 7'	730	20584
ПА топ 20 mm	7°	850	10436
Брдски топ 76 mm	7° 10'	400	1320
Хаубица 105 mm	8°	472	1263
Топ – хаубица 155 mm	8° 56'	810	1642

2.2 Променљиви угао увијања жљебова

У случају променљивог угла увијања увек се ради о прогресивном углу: угао нагиба жљебова прогресивно расте од минималне вредности на почетку жљебженог дела цеви (φ_0), до максималне вредности на устима цеви (φ_u). У односу на константан угао увијања, променљиви угао увијања је знатно повољнији, јер омогућује мирнији процес урезивања водећег прстена, уз много мање оптерећење водећег прстена, односно кошуљице пројектила, као и прелазног конуса барутне коморе цеви. Поред свих ових предности променљиви угао увијања има и значајан недостатак: максималну вредност сила N достиже на устима цеви. [1]

Промена угла увијања је најчешће дата зависношћу $\varphi = \varphi_0 + kx$ или $\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_0 = kx$ (параболично жљебљење), а некад и знатно сложенијом функцијом (k је константа која се за конкретну цев, када је позната дужина жљебљеног дела лако одређује). У овим условима је нормална сила N према изразу 2.10 функција од p, V, φ па је у том случају компликованији поступак одређивања њене вредности него у случају $\varphi = \text{const}$.

За одређивање максималне вредности силе N за конкретно оруђе неопходно је познавање кривих $p = p(x)$, $\varphi = \varphi(x)$, $V = V(x)$, на основу којих се графичким путем, уз помоћ израза 2.10 долази до криве $N = N(x)$. Налажењем криве $N = N(x)$, која даје промену нормалне силе N у функцији пута пројектила у цеви оруђа, може се утврдити и њена максимална вредност као и положај пројектила у цеви оруђа који одговара максималној вредности силе N . Анализирањем криве би се видело да сила N максималну вредност достиже на устима цеви.

Са практичног становишта, од значаја је и питање односа између N_M за $\varphi = const$ и N_M за $\varphi \neq const$, када је угао увијања жљебова на устима цеви у оба случаја једнак (случај линеарне промене угла φ).

Ако се највећа вредност силе N означи са N_u за случај прогресивног угла увијања, коришћењем израза 2.10 и 2.13 добија се следећи израз за разлику $N_u - N_M$:

$$N_u - N_M = \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{1}{\cos \varphi_u} \left[\frac{p_{\max}}{m} \frac{d^2 \pi}{4} \operatorname{tng} \varphi_u + V_0^2 \frac{d(\operatorname{tng} \varphi)}{dx} \right] - \frac{J_x}{n} \frac{\pi}{m \cos \varphi_u} p_{\max}$$

$$N_u - N_M = \frac{J_x}{n} \frac{\pi}{m \cos \varphi_u} \left[m \frac{4}{\pi d^2} V_0^2 \frac{d(\operatorname{tng} \varphi)}{dx} - (p_{\max} - p_u) \operatorname{tng} \varphi_u \right] \quad (2.14)$$

Израз 2.14 показује да је разлика $N_u - N_M$ утолико већа, уколико је:

- већа брзина пројектила;
- већи калибар пројектила, односно оруђа (маса пројектила је пропорционална трећем степену калибра);
- $(p_{\max} - p_u)$ мање уколико је барут лењи или цев краћа.

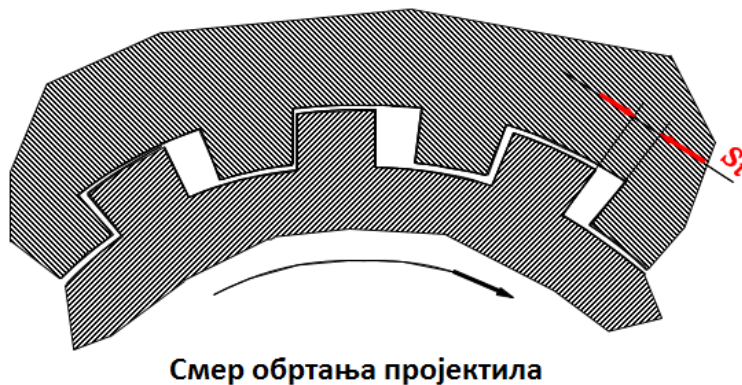
Разлика $(N_u - N_M)$ се може добити сличним поступком и за случај параболичног жљебљења (разлика ће бити мања него у случају линеарне промене угла φ).

Највећа сила N на устима цеви се може избећи жљебовима чији је угао увијања комбинација $\varphi = const$ и $\varphi \neq const$, али тако да се променљиви угао увијања завршава неколико калибара пре уста цеви (преостали део цеви је са константним углом увијања).

Избор угла увијања је врло комплексан, при чему се морају узимати у обзир низ фактора од којих су неки међусобно контрадикторни.

3. Трошење водећег прстена

Услед дејства нормалне силе N , односно силе трења fN и услед транслаторног кретања пројектила, долази до трошења бочне активне стране зуба водећег прстена пројектила. Услед трошења долази до смањивања ширине зуба водећег прстена, а самим тим и до смањивања његове издржљивости (слика 5). Сагласно литератури [1] [3] приказан је поступак добијања израза за израчунавање трошења зуба водећег прстена при константном и променљивом углу увијања.



Слика 5. Трошење зуба водећег прстена [3]

3.1 Константан угао увијања жљебова

Претпоставка да је елементарна запремина истрошеног материјала на једном зубу водећег прстена пропорционална раду трења, омогућује израчунавање трошења зуба водећег прстена.

Ако је елементарна запремина истрошеног материјала:

$$dW = hH_p ds_t \quad (3.1)$$

и елементарни рад трења:

$$dA_t = f_d N \frac{dx}{\cos \varphi} \quad (3.2)$$

на основу дефинисане претпоставке биће:

$$hH_p ds_t = kf_d N \frac{dx}{\cos \varphi} \quad (3.3)$$

где су:

h - висина зуба водећег прстена,

H_p - ширина зуба водећег прстена, односно водећег прстена,

s_t - дужинска вредност укупног трошења зуба,

k - коефицијент пропорционалности,

f_d - динамички коефицијент трења,

x - пут тежишта пројектила.

Динамички коефицијент трења зависи од брзине трења која у овом случају износи $V / \cos \varphi$, где је V трансляторна брзина пројектила у цеви оруђа.

Динамички коефицијент трења је дат следећом релацијом:

$$f_d = \frac{f}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} \quad (3.4)$$

где су:

f - статички коефицијент трења,

$\frac{V}{\cos \varphi}$ - брзина клизања зуба водећег прстена по жљебу,

$b = 9 \cdot 10^{-6}$ - константа.

Увођењем израза за нормалну силу N (једначина 2.11) и претходног израза за динамички коефицијент трења f_d као и трансформацијом једначине 3.3 добија се:

$$hH_p ds_t = \frac{kf}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tng} \varphi}{\cos \varphi} \frac{dV}{dt} \frac{dx}{\cos \varphi}$$

$$hH_p ds_t = k' \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tng} \varphi}{\cos^2 \varphi} \frac{V}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}}$$

$$ds_t = \frac{k'}{hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tng} \varphi}{\cos^2 \varphi} \frac{V}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} dV \quad (3.5)$$

$$k' = kf \quad (3.6)$$

Интеграцијом једначине 3.5 у границама од $t=0$ до t , односно од $V=0$ до V , добија се израз за s_t :

$$s_t = \frac{k'}{hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2b} \ln \left(1 + \frac{b}{\cos^2 \varphi} V^2 \right) \quad (3.7)$$

а после увођења природног логаритма:

$$s_t = \frac{k'}{0,45hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2b} \log \left(1 + \frac{b}{\cos^2 \varphi} V^2 \right) \quad (3.8)$$

Од природе материјала од кога је израђен водећи прстен зависи и вредност коефицијента k' и одређује се експерименталним путем. За артиљеријске пројектиле се за израду водећег прстена најчешће употребљава бакар и у том случају коефицијент k' износи $2,38 \cdot 10^{-18} \text{ m}^3 / \text{kg}$, а константа $b = 9 \cdot 10^{-6}$.

Највећу вредност s_t има у тренутку када се пројектил налази на устима цеви:

$$(s_t)_{\max} = \frac{k'}{0,45hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2b} \log \left(1 + \frac{b}{\cos^2 \varphi} V_0^2 \right) \quad (3.9)$$

где је:

V_0 - почетна брзина пројектила.

3.2 Променљив угао увијања жљебова

Такође, код променљивог угла увијања жљебова основу прорачуна представља претпоставка која је усвојена приликом прорачуна трошења водећег прстена код константног угла увијања:

$$hH_p ds_t = \frac{k'}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{V}{\cos^2 \varphi} \left[\sin \varphi d \left(\frac{V}{\cos \varphi} \right) + V d \varphi \right]$$

$$hH_p ds_t = k' \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi \frac{V}{\cos \varphi} d \left(\frac{V}{\cos \varphi} \right)}{1 + b \left(\frac{V}{\cos \varphi} \right)^2} + \frac{\left(\frac{V}{\cos \varphi} \right)^2 d \varphi}{1 + b \left(\frac{V}{\cos \varphi} \right)^2} \right]$$

Коначно, трошење s_t се добија на основу израза:

$$s_t = \frac{k'}{hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \left[\int_0^{\frac{V}{\cos \varphi}} \frac{\frac{V}{\cos \varphi} d\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)}{\frac{1+b\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)^2}{\cos^2 \varphi}} + \int_0^{\varphi} \frac{V^2}{\cos^2 \varphi} \frac{d\varphi}{1+b\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)^2} \right] \quad (3.10)$$

Да бисмо решили интеграл дефинисан у изразу 3.10 морамо увести одређена упрошћења, при чему је грешка коју правимо упрошћавањем практично занемарљива. Решење интеграла тражиће се за екстремне вредности граница, при чему се добија највећа вредност за s_t .

Приликом решавања првог интеграла $\text{tg} \varphi$ се сматра константном вредношћу, па се узима средња вредност екстремних граница:

$$\text{tg} \varphi = (\text{tg} \varphi)_{sr} = \frac{\text{tg} \varphi_0 + \text{tg} \varphi_u}{2} \quad (3.11)$$

Вредност првог интеграла са овим упрошћењем је:

$$\int_0^{\frac{V}{\cos \varphi}} (\text{tg} \varphi)_{sr} \frac{\frac{V}{\cos \varphi} d\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)}{1+b\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)^2} = \frac{(\text{tg} \varphi)_{sr}}{2b} \ln \left(1 + \frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi} \right) \quad (3.12)$$

Решење другог интеграла омогућују две претпоставке:

- однос између брзине V и почетне брзине пројектила V_0 (брзина пројектила на устима цеви) дат је изразом:

$$\frac{V^2}{V_0^2} = \frac{x}{L} \quad (3.13)$$

где је:

L - дужина ожљебљеног дела цеви;

- закон промене угла увијања дат је односом:

$$\text{tg} \varphi = Kx \quad (3.14)$$

где је:

K - константа пропорционалности која је дата односом $\text{tg} \varphi_u / L$ (параболично жљебљене са $\varphi_0 = 0$).

Диференцирањем израза за $\operatorname{tg}\varphi$ се добија:

$$\frac{d\varphi}{\cos^2 \varphi} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{V_0^2} d(V^2) \quad (3.15)$$

па се други интеграл може представити у облику:

$$\int_0^{\varphi_u} \frac{V^2}{\cos^2 \varphi} \frac{d\varphi}{1+b\left(\frac{V}{\cos \varphi}\right)^2} = \int_0^{bV_0^2} \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} \frac{bV^2 d(bV^2)}{1+\frac{bV^2}{\cos^2 \varphi}} \quad (3.16)$$

До коначног решења другог интеграла се може доћи ако се усвоји још и да је $\cos^2 \varphi = 1$ после чега се добија:

$$\int_0^{bV_0^2} \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} \frac{bV^2 d(bV^2)}{1+bV^2} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} [bV_0^2 - \ln(1+bV_0^2)] \quad (3.17)$$

Ово решење се мора поправити због грешке учињене претпоставком да је $\cos^2 \varphi = 1$, и то увођењем $\cos^2 \varphi_u$ као имениоца последњег члана:

$$\int_0^{bV_0^2} \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} \frac{bV^2 d(bV^2)}{1+bV^2} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} \left[bV_0^2 - \ln\left(1+\frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi_u}\right) \right] \quad (3.18)$$

Са добијеним решењима интеграла и увођењем обичног уместо природног логаритма, коначно се добија:

$$s_{t_{\max}} = K \left[\frac{(\operatorname{tg}\varphi)_{sr}}{2b} \log\left(1+\frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi_u}\right) \right] + K \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2V_0^2} \left[bV_0^2 - \log\left(1+\frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi_u}\right) \right] \quad (3.19)$$

где је:

$$K = \frac{k'}{0,43hH_p} \frac{J_x}{n} \frac{4}{d^2} \quad (3.20)$$

Анализирањем израза за највеће трошење при константном и променљивом углу увијања жљебова долази се до закључка да је највеће трошење утолико мање, уколико је:

- ширина зуба водећег прстена H_p већа;
- висина зуба водећег прстена h већа;
- број жљебова n , односно поља већи;
- аксијални момент инерције пројектила J_x мањи (мања маса пројектила);
- угао увијања жљебова φ мањи и почетна брзина пројектила мања за случај константног угла увијања.

У пракси није могућа оптимизација сваког од наведених параметара, јер би се уз минимално трошење водећег прстена, погоршале остале, веома битне особине пројектила, односно система оруђе – пројектил. На пример, аеродинамичке особине пројектила може погоршати велика ширина водећег прстена, док велики број жљебова смањује ширину жљебова и поља, и на тај начин се смањује издржљивост водећег прстена и поља цеви. Оптимизована целина (пројектила и система оруђе – пројектил), представља компромисно решење – оптимално усклађене међусобно контрадикторне факторе.

На интензитет трошења највећи утицај имају почетна брзина пројектила и угао увијања жљебова, па се заменом $(\operatorname{tg}\varphi)_{sr}$ са $\operatorname{tg}\varphi_u/2$ у изразу 3.19 добија облик који очигледније показује овај утицај:

$$s_{t_{\max}} = K \left[\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{4b} - \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2 V_0^2} \right) \log \left(1 + \frac{b V_0^2}{\cos^2 \varphi_u} \right) + \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b} \right] \quad (3.21)$$

4. Оптерећење водећег прстена и услови сигурности

Као последица дејства нормалне силе у водећем прстену се јављају напони, па се суд о издржљивости водећег прстена доноси на основу вредности тих напона. Напони имају карактер смицања и притиска, али се за основу критеријума сигурности односно издржљивости водећег прстена не узима резултујући сложени напон. Критеријуми сигурности се дају за сваку врсту напона појединачно, при чему сви услови истовремено морају бити испуњени. Сагласно литератури [1] извршено је извођење израза за напон на притисак, напон смицања и напон услед дејства центрифугалне силе.

4.1 Напон на притисак

Уз претпоставку да нормална сила N равномерно оптерећује целу бочну активну страну зуба водећег прстена, напон на притисак је дат изразом:

$$\sigma_p = \frac{N}{hH_p} \quad (4.1)$$

На активној страни зуба водећег прстена неће доћи до разарања материјала ако је испуњен услов:

$$\frac{N_M}{hH_p} \leq \sigma_{pd} \quad (4.2)$$

где је:

σ_{pd} - дозвољени напон на притисак материјала водећег прстена.

За израду водећег прстена пројектила који се испаљују из савремених артиљеријских система се најчешће користи електролитички бакар или легуре бакра (са цинком – томбак или са никлом) и врло ретко синтеровано гвожђе. Такође се у последње време за израду водећег прстена све више користе композитни материјали на бази најлона и тефлона, а нарочито за системе са почетним брзинама већим од 1000 m/s (показало се да са повећањем почетне брзине преко 1000 m/s и металним водећим прстеном нагло смањује животни век цеви, што није случај када је водећи прстен израђен од композитног материјала чак и при почетним брзинама већим од 1400 m/s).

У литератури се могу срести различите вредности дозвољеног напона на притисак, јер је избор вредности дозвољеног напона на притисак материјала водећег прстена врло комплексан, због посебних услова рада водећег прстена (загревање услед сагоревања барутног пуњења, трење и загревање услед трења у условима импулсног оптерећења).

У Француској се за бакарни водећи прстен најчешће користи препорука I'Atelier de Construction de Bourges ($\sigma_{pd} = 2950 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) али су дуго важиле препоруке Државне експерименталне комисије из Гавра (La Commission d'Experiences de Gavre):

- $\sigma_{pd} = 1770 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за бакарни водећи прстен једноделног метка и
- $\sigma_{pd} = 1180 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за бакарни водећи прстен дводелног метка.

По Третјакову дозвољени напон на притисак материјала водећег прстена је:

- $\sigma_{pd} = 2450 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за оруђа са великим почетним брзинама и
- $\sigma_{pd} = 3430 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за оруђа са малим почетним брзинама пројектила.

Према нашој литератури задовољавајући степен сигурности водећег прстена од бакра постиже се са:

- $\sigma_{pd} = 3000 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ у случају пројектила са почетним брзинама већим од 700 m/s
- $\sigma_{pd} = 3500 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ у случају пројектила са почетним брзинама мањим од 700 m/s

Ове вредности дозвољеног напона могу бити увећане за $500 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, ако се водећи прстен израђује од легуре бакра и никла.

Уколико је водећи прстен израђен од синтерованог гвожђа дозвољени напон на притисак износи:

- $\sigma_{pd} = 2000 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ у случају пројектила са почетним брзинама већим од 700 m/s
- $\sigma_{pd} = 2500 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ у случају пројектила са почетним брзинама мањим од 700 m/s

При пројектовању новог пројектила променом вредности h и H_p се напон на притисак σ_p доводи на ниво дозвољеног. Међутим, и овде постоје одређена ограничења ширине водећег прстена H_p , а такође и дубине жљебова h , односно висине зуба водећег прстена, утиснутог у жљеб цеви (ова вредност је око 1% вредности калибра пројектила, односно оруђа; на пример код пројектила 57 mm дубина жљеба износи 1,3% калибра, док код пројектила 155 mm дубина жљеба износи 0,8% калибра). [1]

4.2 Напон смицања

Као последица дејства нормалне силе N јавља се напон смицања у основи зуба водећег прстена (површина $ABCD$ на слици 3). Пошто се површина $ABCD$ мења због појаве трошења водећег прстена, напон смицања је:

$$\tau = \frac{N}{(e - s_t) H_p} \quad (4.3)$$

Са становишта издржљивости, интересантна је максимална вредност напона на смицање. Претходни израз нам показује да напон смицања истовремено зависи и од нормалне силе N као и од вредности трошења водећег прстена.

Сила N има највећу вредност у тренутку максималног притиска барутних гасова у случају константног угла увијања жљебова и највеће трошење у тренутку када пројектил напушта цев. На основу тога, код константног угла увијања жљебова, највећи напон смицања ће се јавити када и нормална сила N има максималну вредност N_M , јер је вредност силе N на устима цеви вишеструко мања. У тренутку када нормална сила N има максималну вредност, трошење водећег прстена је тек отпочело, па се највећи напон смицања одређује на основу израза:

$$\tau_{\max} = \frac{N_M}{eH_p} \quad (4.4)$$

У случају променљивог угла увијања, сила N има највећу вредност у тренутку када се пројектил налази на устима цеви, па се највећа вредност напона смицања израчунава на основу израза:

$$\tau_{\max} = \frac{N_M}{(e - s_{t_{\max}})H_p} \quad (4.5)$$

Наравно, у случају константног, као и у случају променљивог угла увијања жљебова мора да буде испуњен услов:

$$\tau_{\max} \leq \tau_d \quad (4.6)$$

У литератури се, као и код дозвољеног напона на притисак, могу наћи различите вредности дозвољеног напона смицања. Задовољавајућа издржљивост бакарног водећег прстена се постиже ако је:

- $\tau_d = 600 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за системе оруђе - пројектил са брзим трошењем цеви (на пример, тенковски топ),
- $\tau_d = 700 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ за системе оруђе - пројектил са нормалним трошењем цеви (на пример топови и хаубице).

4.3 Напон услед дејства центрифугалне силе

На водећи прстен делује и центрифугална сила чија је највећа вредност дефинисана изразом:

$$(F_c)_{\max} = \frac{2}{d} m_p V_0^2 \operatorname{tng} \varphi_u \quad (4.7)$$

У случају константног угла увијања:

$$\varphi_u = \varphi = \operatorname{const}$$

Масу водећег прстена прстена можемо добити на основу израза:

$$m_p = \pi \frac{\rho}{4} (d^2 - d_1^2) H_p + \rho e h H_p n \quad (4.8)$$

где су:

d_1 - минимални пречник водећег прстена, односно пречник кошуљице пројектила на месту канала у које се утискује водећи прстен,

$H_p (d - d_1) / 2$ - површина на којој се јавља највећи напон на истезање.

На основу овога добија се израз за максимални напон на истезање:

$$(\sigma_i)_{\max} = \frac{2(F_c)_{\max}}{H_p (d - d_1)}$$

$$(\sigma_i)_{\max} = \frac{4}{d} H_p (d - d_1) \left[\frac{\pi \rho}{4} (d^2 - d_1^2) H_p + \rho e h H_p n \right] V_0^2 \tan^2 \varphi_u \quad (4.9)$$

Избор дозвољеног напона на истезање услед дејства центрифугалне силе је прилично сложен због самих услова у којима се водећи прстен налази у току кретања кроз цев оруђа, а посебно на устима цеви (услед интензивног трења, бакарни водећи прстен је на устима цеви загрејан до те мере, да долази до жарења материјала у површинском слоју).

Експериментално се показало да водећи прстен има задовољавајућу издржљивост ако је:

$$(\sigma_i)_{\max} \leq (\sigma_i)_d = 2400 \cdot 10^5 \text{ Pa} \text{ (бакарни водећи прстен);}$$

$$(\sigma_i)_{\max} \leq (\sigma_i)_d = 1200 \cdot 10^5 \text{ Pa} \text{ (прстен од синтерованог гвожђа)}$$

Напон на истезање у бакарном водећем прстену услед дејства центрифугалне силе код неких система оруђа – пројектил, са почетним брзинама већим од 1000 m/s , прелази вредност $(\sigma_i)_d$. У оваквим случајевима решење је употреба композитног материјала за израду водећег прстена, при чему се такође, како је већ речено, смањује и трошење цеви.

На пример, у случају пројектила 155 mm ($V_0 = 750 \text{ m/s}$ и $\varphi = 9^\circ$) напрезање бакарног водећег прстена услед дејства центрифугалне силе износи $(\sigma_i)_{\max} = 1720 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, а у случају пројектила 105 mm ($V_0 = 1200 \text{ m/s}$ и $\varphi = 7^\circ 10'$), напрезање бакарног водећег прстена је $(\sigma_i)_{\max} = 2550 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. У овом случају бакарни водећи прстен морао је бити замењен прстеном од композитног материјала у коме напон на истезање под дејством центрифугалне силе износи $(\sigma_i)_{\max} = 580 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (однос вредности претходне и ове вредности напона на истезање једнак је односу специфичних маса бакра ($\rho = 8,85 \text{ g/cm}^3$) и композитног материјала ($\rho = 2 \text{ g/cm}^3$)). [1]

5. Оптерећење и издржљивост поља цеви

О оптерећењу и издржљивости поља цеви која су у контакту са водећим прстеном и која су такође оптерећена нормалном силом N , мора се водити рачуна, при пројектовању водећег прстена новог артиљеријског пројектила. Челик, од кога је цев израђена, нормално издржава знатно већа напрезања на притисак и смицање од водећег прстена. При димензионисању водећег прстена треба водити рачуна о оптерећењу поља на савијање, па је сагласно литератури [1] приказан поступак добијања израза напона за савијање.

Део поља који је у контакту са водећим прстеном сматра се укљештеном конзолом, дужине h и ширине H_p , оптерећен силом N , равномерно распоређеном по целој површини конзоле. [1]

Ширина поља, односно висина конзоле се добија на основу израза:

$$\pi d = n(e + e') \quad (5.1)$$

Напрезање на савијање је дато изразом:

$$\sigma_s = \frac{M}{I} \frac{e'}{2} \quad (5.2)$$

Уз претпоставку о равномерном распореду силе N , момент савијања је:

$$M = \frac{N}{h} \int_0^h x dx = \frac{Nh}{2} \quad (5.3)$$

Отпорни момент површине у основи поља је:

$$I = \frac{H_p (e')^3}{12} \quad (5.4)$$

Увођењем највеће вредности за силу N као и наведених израза за момент савијања и отпорни момент добија се максимална вредност напона за савијање:

$$(\sigma_s)_{\max} = \frac{3N_M h}{H_p (e')^2} \quad (5.5)$$

Претходни израз се може представити и у другачијем облику, ако се за дозвољено напрезање на савијање усвоји, имајући у виду отежане услове рада материјала (висока температура), вредност од $600 \cdot 10^5 Pa$ са довољно великим степеном сигурности:

$$\frac{N_M h}{H_p (e')^2} \leq 200 \cdot 10^5 Pa \quad (5.6)$$

У претходном изразу, једина променљива за дефинисани артиљеријски систем је ширина водећег прстена, па издржљивост поља, према томе, зависи само од ширине водећег прстена.

6. Материјали за израду водећег прстена

Материјал водећег прстена треба да испуни многобројне захтеве. Мора да буде мекан и у исто време да буде довољно жилав, да добро подноси деформације и да у што је могуће мањој мери троши цев. За израду водећих прстенова, до сада су се употребљавали [3]:

- електролитички бакар,
- електролитички бакар са додатком никла,
- електролитички бакар са додатком цинка,
- електролитички бакар и нискоугљенични челик (меко гвожђе),
- нискоугљенични синтеровани челик,
- чисто меко гвожђе,
- пластичне масе,
- композитни материјали.

6.1 Електролитички бакар

Захтевима који су постављени пред материјал водећег прстена најбоље одговара електролитички бакар, па се због тога бакар највише и употребљава за израду водећих прстенова ротирајућих артиљеријских пројектила свих калибара у читавом дијапазону примењиваних почетних брзина. Најчешће се употребљава чисти електролитички бакар (99,8% Cu) који се претходно подвргава поступку редукције (одстрањивање везаног кисеоника). Уколико електролитички бакар није подвргнут поступку редукције или код којег је редукција изведена непотпуно остаје веома крт. Да ли је поступак редукције правилно изведен, проверава се брушењем узорка и нагризањем киселинама. У штетне примесе се убрајају бизмут и антимон, па тако присуством ових елемената у износу од свега неколико стотих процената изазива кртост и ломљивост. Присуство арсена смањује штетан утицај ових елемената. [3]

Средње вредности механичких карактеристика електролитичког бакра жареног на 600°C дате су у табели 2.

Табела 2. Механичке карактеристике жареног електролитичког бакра [3]

Граница развлачења (0,2%)	78,45 – 90,06 МПа
Чврстоћа на истезање	215,75 – 235,36 МПа
Чврстоћа на смицање	176,52 МПа
Истежање	40 – 60 %
Контракција	60 – 80 %
Модул еластичности код истезања	117680 – 125525 МПа
Модул еластичности код смицања	41188 – 48053 МПа
Тврдоћа по Бринелу	48 – 52
Жилавост	59 – 78 Nm / cm ²

Специфична маса жареног електролитичког бакра се креће у границама од 8,89 до 8,99 g / cm³.

6.2 Легура бакра са никлом

Никл повољно утиче на механичке особине бакра, повећавајући му чврстоћу и у одређеној мери жилавост. Легура бакра са никлом је изузетно повољна за израду водећих прстенова ротирајућих артиљеријских пројектила јер је смањење чврстоће са порастом температуре много мање него код чистог бакра, због чега је присуство никла у бакру изузетно повољно посебно код пројектила изузетно моћних оруђа, који су изложени великим механичким и топлотним напрезањима. Специфична маса ових легура се креће у границама од 8,9 до 8,93 g/cm^3 . [3]

6.3 Легура бакра са цинком

Легуре бакра са цинком коришћене су током Првог светског рата за израду водећих прстенова, али са њима нису добијени задовољавајући резултати. Додавањем око 10 % цинка настојало се смањити потрошњу бакра и истовремено постићи смањено бакарисање цеви. [3]

6.4 Бакар и нискоугљенични челик

Током Другог светског рата, у Немачкој су се израђивали водећи прстенови од нискоугљеничног челика платираног бакром са циљем да се постигне уштеда у бакру. Овај материјал није нашао ширу примену, јер се није постигла очекивана уштеда у бакру, а такође технологија израде оваквих водећих прстенова је била изузетно комплексна, јер се захтевала изузетно чврста веза између ова два слоја материјала. Данас се овакав поступак више нигде не примењује. Водећи прстенови израђени од нискоугљеничног челика платираног бакром носили су ознаку KPS. [3]

6.5 Синтеровано гвожђе

У Немачкој, 1935. године патентирани су поступак израде, као и водећи прстен од синтерованог гвожђа, као готов производ. Ови водећи прстенови су носили ознаку FeS.

Основна сировина за израду оваквих водећих прстенова је ситно исецкана жица од нискоугљеничног челика. Основни услов за жицу је да садржај угљеника у челику буде испод 0,12% и да садржај мангана буде испод 0,5%. Исецкана жица се просејава и разврстава у групе према величини зрна највећег пречника од 0,06 до 0,4 mm . Из сваке од ових група узима се одређена количина како би се добио правилан однос у мешавини погодан за синтеровање. Добијена мешавина се жари на температури 920 – 950°C у неутралној атмосфери, у току 5 часова и 30 минута. Након жарења мешавина се дроби и опет просејава, тако да се добију зрна чији је пречник око 0,15 mm . Од овако добијеног гранулата се пресују прстенови. Сваки од ових прстенова се појединачно контролише и мери, при чему разлика у тежини прстенова не сме да буде већа од $\pm 1\%$. Прстенови који су прошли контролу се потапају у парафинску купку загрејану на 100°C и у њој се држе 3 сата.

У току овог времена парафин продире кроз поре, у унутрашњост синтерованих прстенова. Парафин који је тако пенетрирао у материјал делује као мазиво приликом пресовања прстена у тело пројектила и током кретања пројектила кроз цев оруђа. Услед порозности, велика је површина додира са ваздухом, па током времена синтеровани прстенови подлежу корозији. Специфична маса водећих прстенова од синтерованог гвожђа се креће у границама од 5,4 до 5,9 g/cm^3 . У ратним условима, када се муниција не задржава дуго у складиштима, овакви водећи прстенови су се показали као достојна замена бакарних водећих прстенова. [3]

Механичке карактеристике FeS прстенова немачке и америчке производње дате су у табели 3.

Табела 3. Механичке карактеристике FeS водећих прстенова [3]

Карактеристике	Немачки FeS прстенови (1944)	Амерички FeS прстенови (1954)
Чврстоћа на истезање	68,65 МПа	88,26 МПа
Истежање	3,5 %	5,83 %
Специфична тежина	52,96 – 54,92 МПа	54,23 – 55,9 МПа
Садржај парафина	2,83 % тежинских	2,43 %

6.6 Чисто меко гвожђе

Прстенови који су израђени од чистог меког гвожђа носе ознаке FeW. У Немачкој су се употребљавали када FeS прстенови нису могли да задовоље изузетно тешке услове напрезања. Дуго су употребљавани и у САД за израду водећих прстенова моћних оруђа који су изложени тешким условима у току кретања кроз цев.

Материјал од кога се израђују FeW прстенови је технички чисто гвожђе типа Armco или Ferrital. Armco је материјал који је широко познат јер налази и друге примене у техници. Чисто гвожђе типа Ferrital се производи у Италији и добија се из обогаћеног магнетита директном редукцијом у електролучним пећима. Техничко чисто гвожђе типа Armco или Ferrital се добија веома сложеним и врло пажљиво контролисаним технолошким процесима и захтева веома пажљиву обраду. Хемијски састав материјала погодног за израду FeW водећих прстенова је приближно 0,01% С, 0,02% Мп, највише 0,012% Р и 0,024% S, трагови Si. [3]

Водећи прстенови који су израђени од чистог меког гвожђа имају затезну чврстоћу од око 275 МПа и истежање око 40%. Специфична маса чистог меког гвожђа је 7,9 g/cm^3 .

6.7 Пластичне масе

Након Другог светског рата вршени су покушаји да се за израду водећих прстенова употребе специјалне пластичне масе. Ови покушаји нису дали резултате који би оправдали напуштање бакра као основног материјала за израду водећих прстенова, али се на истраживању и даље ради и добијају се све бољи и бољи резултати. У неким случајевима пластичне масе показују и боље особине од бакра.

Као што је већ речено, при почетним брзинама већим од 1000 m/s долази до интензивног трошења цеви, уколико се ради о водећем прстену израђеном од бакра, меког гвожђа или синтерованог челика. Код пројектила, са водећим прстеновима израђеним од пластичне масе, није примећено повећано трошење цеви чак ни при брзинама много већим од 1000 m/s . [3]

Табела 4. Минималне вредности механичких особина електролитичког бакра за израду водећих прстенова код неких типова пројектила и готових водећих прстенова [3]

Пројектил	Чврстоћа на истезање [MPa]	Истежање [%]
122 mm TF, M59 готов прстен	220,65	25
3 in HE готов прстен	205,94	15
90 mm APC-T, M82 готов прстен	220,65	15
76 mm TF, M55 готов прстен	220,65	15
105 mm TF, M1 готов прстен	220,65	15

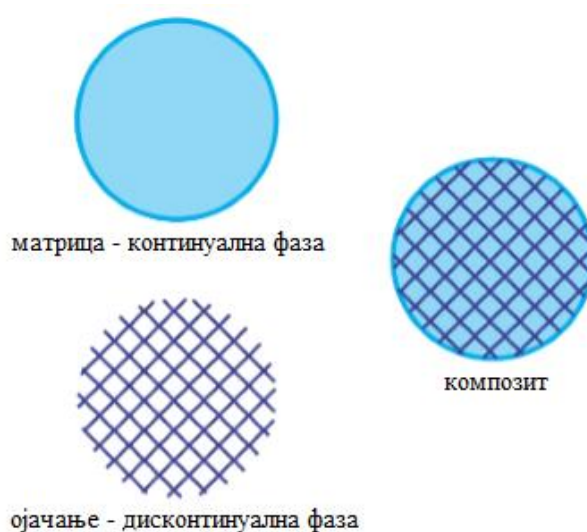
Табела 5. Допуштена напрезања водећих прстенова [3]

	σ_{pd} [MPa]	τ_d [MPa]
Електролитички бакар:		
Према Тауеан-у:		
$V_0 > 800 \text{ m/s}$	29,42	9,81
$V_0 < 800 \text{ m/s}$	$813,95 - \frac{V_0}{10} \cdot 9,81$	29,42
Према Третјакову:		
$V_0 > 800 \text{ m/s}$	245,17	49,03 – 98,07
$V_0 < 800 \text{ m/s}$	343,23	98,07 – 147,1
Према Стаматовићу	98,07-147,1	49,03 – 98,07
Синтеровано гвожђе (FeS)	294,2	176,52
Бакар са 4,5% Ni	343,23	196,13
Armco	245,17	98,07
Бакар са 10% Zn	323,62	/

7. Композитни материјали – теоријски осврт

Материјал сачињен од две или више присутних фаза композит. Међутим, термин композитни материјал се користи да означи вишеслојни материјал, чије фазе имају физичке особине које се значајно разликују. Конституенти се бирају тако да композитни материјал има боље физичке особине од особина компонената посматрано појединачно. Иако су вишефазни материјали, метали и легуре са присуством нечистоћа или са легирајућим елементима, пластика са мањим садржајем пунилаца, као и класична керамика не представљају композитне материјале. Ови материјали поседују конституенте који су сличних физичких особина, а такође је често један конституент доминантан над осталим. [4]

Композитни материјали се састоје од континуалне фазе, кроз коју је распоређена дисконтинуална фаза, као што је приказано на слици 6. Хибридни композит је композитни материјал са више дисконтинуалних фаза различитих особина. Дисконтинуална фаза је углавном знатно јача од континуалне фазе, па она даје чврстоћу композиту и представља ојачање. Континуална фаза, матрица, везује ојачања и држи их заједно, има улогу у преношењу оптерећења на ојачање, даје облик композиту и има заштитну улогу од спољашњих утицаја. [4]



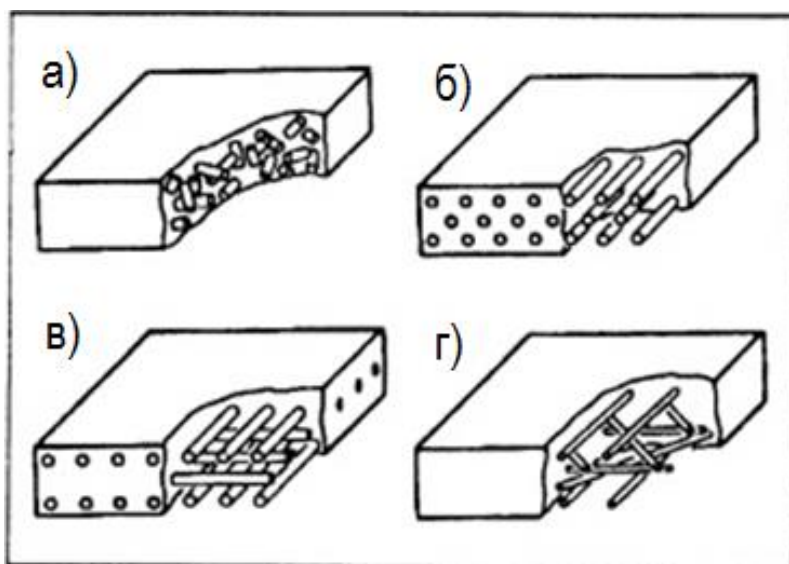
Слика 6. Композитни материјал [4]

Композитни материјали могу бити класификовани према облику или природи конституената.

Према облику конституената, композитни материјали се деле у две групе:

- влакнима ојачани композити
- честицама ојачани композити.

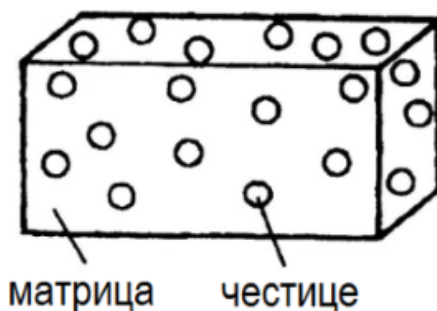
Композитни материјал је **влакнима ојачан композит**, када је ојачање у облику влакана. Влакна могу бити кратка, дуга, исецкана, у облику тканине и друго. Оријентацијом и расподелом влакана, могуће је креирати механичке особине композита, тако што тиме добијамо материјал од изразито анизотропних до трансверзално изотропних материјала. Према томе, могуће је прилагођавати особине материјала, мењајући природу конституената, њихову концентрацију, као и оријентацију ојачања, све са циљем добијања материјала захтеваних карактеристика, као што је приказано на слици 7. [5]



Слика 7. Различита влакна: а) кратка, произвољно оријентисана, б) дуга, у једном правцу, в) дуга, у два међусобно управна правца, г) дуга, испреплетана, произвољно оријентисана [6]

Композитни материјал је **честицама ојачан композит** када је ојачање у облику честица. Честице, за разлику од влакана, немају привилеговане правце. Уколико је потребно побољшати особине материјала као што су термичко понашање, отпорност на хабање, крутост тада се материјали ојачавају честицама. Од жељених особина зависи одабир честица. [8]

Композитни материјал ојачан честицама је приказан на слици 8.



Слика 8. Композитни материјал ојачан честицама [6]

Према природи матрице, композитни материјали могу бити класификовани као:

- органски,
- метални,
- минерални композити.

Различита ојачања могу бити уграђена у ове матрице, при чему само неке имају стварни индустријски процес, док су остали материјали предмет проучавања у лабораторијама.

Међу мноштвом композита, издвајају се [5]:

1. Композитни материјали са органском матрицом (смола), са:

- минералним влакнима: стаклена, угљенична, итд.
- органским влакнима: кевлар, полиамиди, итд.
- металним влакнима: борон, алуминијум, итд.

2. Композитни материјали са металном матрицом (лаке и ултра – лаке легуре алуминијума, титанијум, магнезијум), са:

- минералним влакнима: угљенична, силицијум карбидна, итд.
- металним влакнима: борон,
- метално – минералним влакнима: боронска влакна премазана силицијум карбидом.

3. Композитни материјали са минералном матрицом (керамика), са:

- металним влакнима: борон,
- металним честицама: кермети,
- минералним честицама: карбиди, нитрити, итд.

8. Композитни материјали за израду водећег прстена

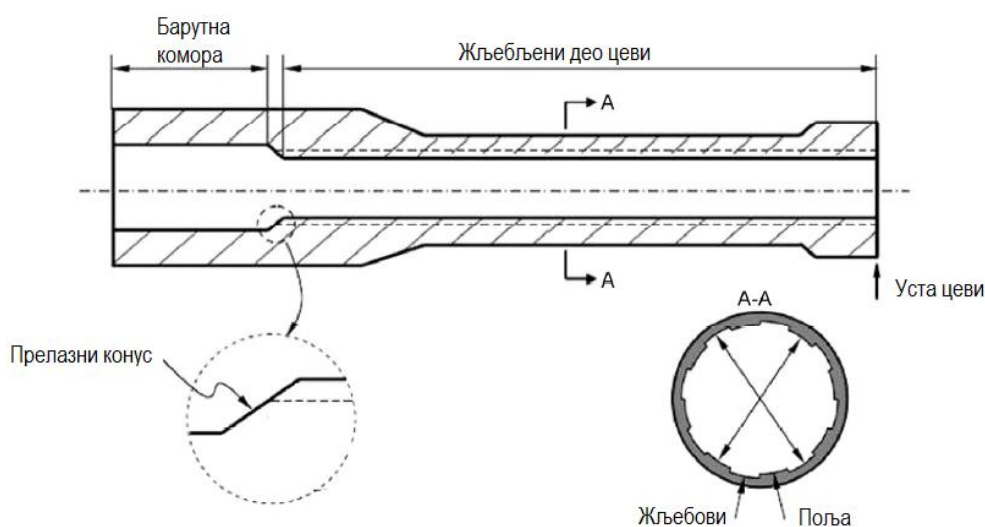
Због сложености конструкције савремених оруђа – оружја, а такође и због тактичко техничких захтева који се постављају пред њих, развој и израда оваквих средстава је изузетно скупа.

Због изразито отежаних услова у којима ова средства функционишу, њихов животни век је знатно смањен. Неповољне појаве као што су трошење, нагризање, бакарисање цеви знатно скраћују њен век употребе.

Као што је већ речено, уколико је водећи прстен израђен од бакра, синтерованог челика, или меког гвожђа, при већим почетним брзинама долази до интензивног трошења цеви, чиме се скраћује њен животни век.

Да не би дошло до одређених штетних појава, дошло се на идеју израде водећег прстена од композитног материјала. Од суштинског значаја је да конструкција и материјал водећег прстена буду такви, како би се задовољили услови:

- процес урезивања водећег прстена не би смео да деградира балистичке карактеристике пројектила,
- водећи прстен треба да се лако имплементира на кошуљицу и да остане сједињен са њом након излетања пројектила из цеви и
- водећи прстен не би требао да превише хаба цев оруђа/оружја.



Слика 9. Цев оруђа/оружја [7]

Данас има више врста муниције са пластичним водећим прстеном, а највише код муниције мањег калибра. Брзина којом се лансирају пројектили са пластичним водећим прстеном је иста као и брзина којом се лансирају пројектили са металним водећим прстеном, па чак и већа, а највећа предност пластичних водећих прстенова је смањено хабање цеви.

У овом раду ће бити описан полиамид типа 66 ојачан стакленим влакнима који се користи за израду водећег прстена пројектила. Да би се дошло до оптималног решења за израду водећег прстена, неопходно је задовољити следеће карактеристике:

- затезну чврстоћу,
- отпорност на хабање,
- модул еластичности,
- деформације, итд.

Да би се све ове карактеристике задовољиле, неопходно је прилагодити механичке и физичко – хемијске карактеристике композита. Као што је већ речено, дисконтинуална фаза (у овом случају влакна) је углавном знатно јача од континуалне фазе (матрица), па она даје чврстоћу композиту и представља ојачање, па се на основу тога, да би се побољшале особине полиамида у смислу чврстоће, отпорности на хабање, итд. разматрају компоненте ојачања – влакна, као и адитиви. [7]

Као ојачања се употребљавају стаклена влакна, која имају улогу да обезбеде да водећи прстен издржи потенцијалне напоне и деформације при кретању пројектила у цеви оруђа, а нарочито у почетном тренутку опаљења, при самом урезивању водећег прстена на прелазном конусу цеви.

Коефицијент трења, је такође, веома битна карактеристика примењеног композита. Наравно, коефицијент трења треба да буде што мање, како би се смањила ерозија цеви и на тај начин продужио њен животни век. Мањи коефицијент трења се постиже додавањем одређених адитива у матрицу композита.

Потребно је проћи кроз неколико различитих фаза како би се дефинисао оптимални састав композита за израду водећег прстена.

У првој фази је најпре потребно одредити састав матрице и влакана на основу потребних и очекиваних својстава материјала, тако да композит може да одговори екстремним условима који су присутни при процесу опаљења метка у цеви оруђа.

У другој фази се врше испитивања механичких и физичко – хемијских карактеристика материјала тако дефинисаних композита. Испитивања композита се изводе према већ дефинисаним стандардима (ИСО 527, ИСО 178, ИСО 1183, итд.).

У трећој фази се врши модификација састава композита према резултатима добијеним мерењем у лабораторији и захтевима који се постављају пред композите.

Када се дефинише хемијски састав и прођу испитивања, у последњој фази је потребно и практично испитати понашање материјала при балистичким испитивањима муниције.

Након великог броја испитивања, утврђено је да је сагласно литератури [7] полиамид типа 66 ојачан са 14% стаклених влакана најбоље решење за израду водећег прстена и да, као такав, представља најбољу алтернативу бакарном водећем прстену.

Поред тога, он је показао најбоље особине при самој изради водећег прстена поступком инјекционог бризања, а такође је показао да може да издржи екстремне услове рада који се јављају у цеви оруђа (огромне силе трења, притиске барутних гасова реда величине 3000 – 4000 *bar* -а, као и температуру од преко 2500 K . [7])

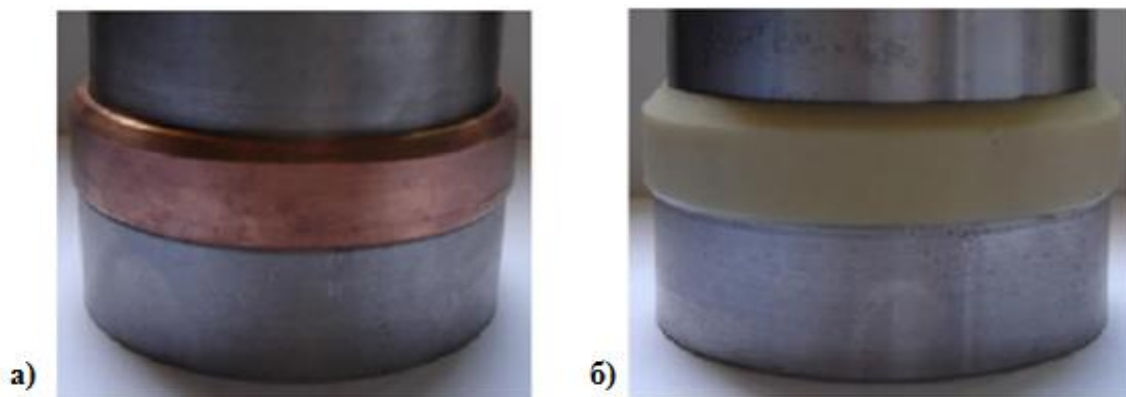
Табела 6. Карактеристике полиамида типа 66 ојачаног са 14% стаклених влакана [7]

Особина	Стандард за испитивање	Јединица	Вредност
Механичке особине			
Затезна чврстоћа	ИСО 527	<i>MPa</i>	110
Издужење	ИСО 527	%	3.8
Модул еластичности	ИСО 527	<i>MPa</i>	5000
Модул савијања	ИСО 178	<i>MPa</i>	4400
Ударна жилавост	ИСО 179/1eA	<i>kJ / m²</i>	13
Термичке особине			
Температура дефлекције	ИСО 75ф	<i>°C</i>	240
при 1.80 <i>MPa</i>	ИСО 11357-1/-3	<i>°C</i>	263
Температура топљења			
при 10 ^{°C} / <i>min</i>			
Физичке особине			
Густина материјала	ИСО 1183	<i>kg / m³</i>	1190

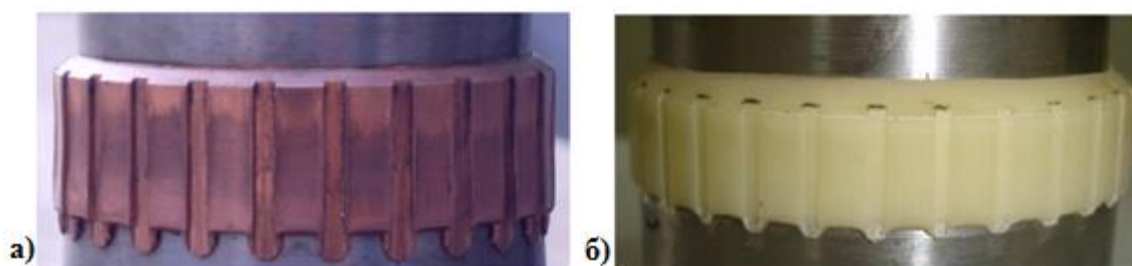
У оквиру рада *Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading* [7] представљени су резултати испитивања упрошћеног модела урезивања различитих материјала водећег прстена. Овај упрошћени модел се састоји од два цилиндра на које су навучени водећи прстенови, бакарни и пластични као и од ожљебљене цеви.

Циљ овог квазистатичког испитивања је утврђивање понашања два различита материјала, као и минималне вредности силе која је потребна како би дошло до урезивања прстена у цев.

На сликама испод је дат приказ цилиндара који представљају упрошћен модел пројектила, на којима се налазе водећи прстенови пре урезивања (слика 10) и водећи прстенови после урезивања (слика 11).



Слика 10. Водећи прстен пројектила пре урезивања
а)бакарни, б)полиамидни [7]



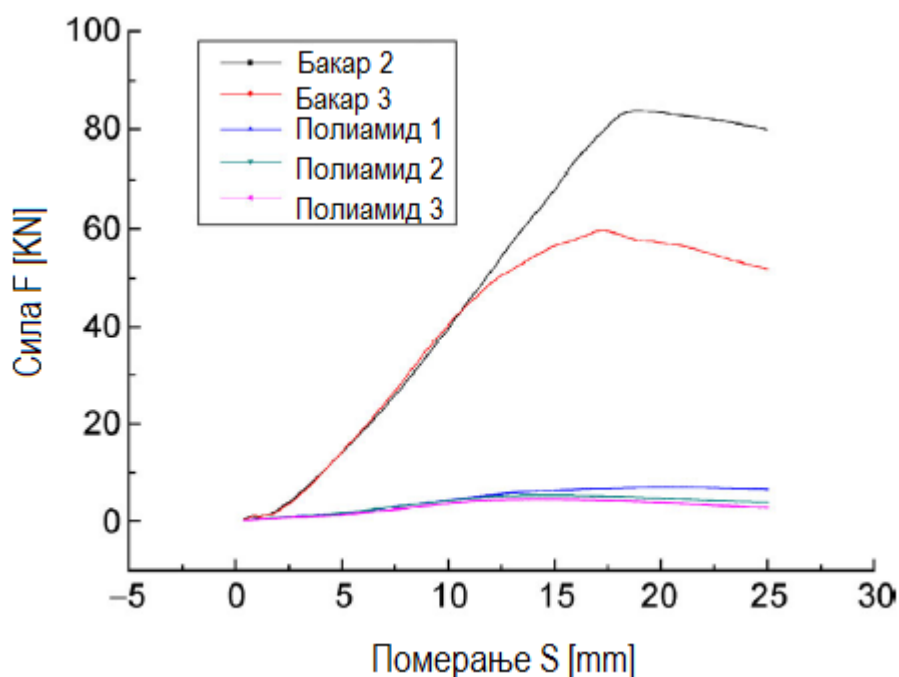
Слика 11. Водећи прстен пројектила након урезивања
а)бакарни, б) полиамидни [7]

Као што се на слици 11 може приметити, након урезивања водећег прстена долази до појаве трајних пластичних деформација и на бакуру и на полиамиду. Материјали оба прстена су се деформисали и прилагодили облик геометрији попречног пресека цеви, односно геометрији поља и жљебова цеви.

Максимална вредност силе урезивања за полиамидни прстен износи $6,95 \text{ kN}$, док за бакарни водећи прстен износи $83,78 \text{ kN}$. Са повећањем дубине жљебова са $0,1 \text{ mm}$ на $0,25 \text{ mm}$ вредност силе урезивања за бакар се повећала са $83,78 \text{ kN}$ на $192,97 \text{ kN}$.

На слици 12 су приказани резултати испитивања са различитим материјалима сагласно литератури [7]. Оно што се види је да сила урезивања линеарно расте са померањем цилиндра све до тренутка када се изврши потпуно урезивање прстена. У том тренутку сила достиже максимум и након тога опада до нулте вредности када пројектил, односно цилиндар, излети из цеви.

Са слике се поред овога види и да је сила урезивања водећег прстена од полиамида вишеструко мање од силе урезивања водећег прстена од бакра.



Слика 12. Сила урезивања прстена у функцији померања за различите материјале [7]

Претходно описаним поступком се може стећи увид у проблематику феномена који није толико изражен, и то баш из разлога не тако давног развоја муниције са водећим прстеном израђеним од композита, као и због сложености процеса опаљења. Савремене технологије, материјали као и њихов константан развој су допринели томе да се композитни материјали у великој мери користе као алтернативни материјали због бројних бољих карактеристика у односу на комерцијалне материјале као што су челик, бакар, алуминијум.

Статички и квазистатички експерименти имају своје предности који се огледају у једноставности модела и практичности реализације, као претходно описан, али треба бити скептичан при добијању резултата оваквим методама.

Да би се један овакав експеримент обавио, често је потребно поједине почетне и граничне услове поједноставити до те мере, да се губи њихов утицај на коначне резултате, па самим тим и добијени резултати одступају од реалних. Међутим, овакав тип експеримента је добар јер даје основу за наставак истраживања, како би се у потпуности дефинисао процес опаљења и феномен урезивања водећег прстена пројектила у цев.

За такву врсту испитивања, најпре је потребно дефинисати конкретну врсту материјала водећег прстена, након тога је потребно извршити лабораторијска испитивања ради добијања његових механичких и физичко - хемијских карактеристика. Након тога следи израда водећег прстена и практична проба која подразумева полигонско испитивање.

Потребно је испитати понашање пројектила са водећим прстеном при јединачној и аутоматској паљби. Поред овога, неопходно је извршити и испитивање са барутом који даје већи притисак барутних гасова (торментачно пуњење), како би се посматрало понашање прстена при екстремним условима рада, као што је на пример притисак барутних гасова реда 3500 – 4000 *bar*-а. [7]

9. Покретање пројектила и услови урезивања

Услед пријема спољњег импулса, топовска каписла, сама или преко припале, врши припаљивање барутног пуњења у чаури. Сагоревањем барутног пуњења долази до ослобађања гасова, при чему се повећава притисак. Када притисак барутних гасова достигне вредност p_0 (притисак урезивања), компонента силе барутних гасова која лежи у оси пројектила врши његово покретање из почетног положаја. Паралелно са покретањем пројектила наступа урезивање водећег прстена у олуке цеви, а истиснути материјал се зауставља иза прстена и образује зупчасти венац. [3]

Да би се обезбедило заптивање барутне коморе, а такође и заптивање током кретања пројектила кроз цев оруђа, водећи прстен би морао да има пречник једнак пречнику цеви, од жљеба до жљеба. Међутим, водећи прстен се увек израђује тако да има изванредан преклоп у односу на попречни пресек шупљине цеви.

Да би дошло до урезивања водећег прстена, сила барутних гасова мора да изврши рад који се састоји из [3]:

- рада смицања потребног да се прстен пречника d_p доведе на пречник d_0 по целом обиму,
- рада смицања који је потребан за урезивање поља цеви по целој дужини прстена.

Веза између ширине водећег прстена H_p притиска урезивања p_0 , се може одредити ако се претпостави да је притисак барутних гасова пропорционалан истиснутој запремини материјала.

Искуство је показало, да је величина силе потребна за истискивање 1 mm^3 бакра износи 49 N . Сагласно литератури [3] приказан је поступак добијања израза за притисак урезивања.

Уз наведену претпоставку можемо да пишемо:

$$\frac{\pi d^2}{4} p_0 = 5H_p \left(\frac{d_p^2 - d_0^2}{4} \pi + ne'h \right)$$

односно:

$$p_0 = \frac{20H_p}{\pi d^2} \left(\frac{d_p^2 - d_0^2}{4} \pi + ne'h \right) \quad (9.1)$$

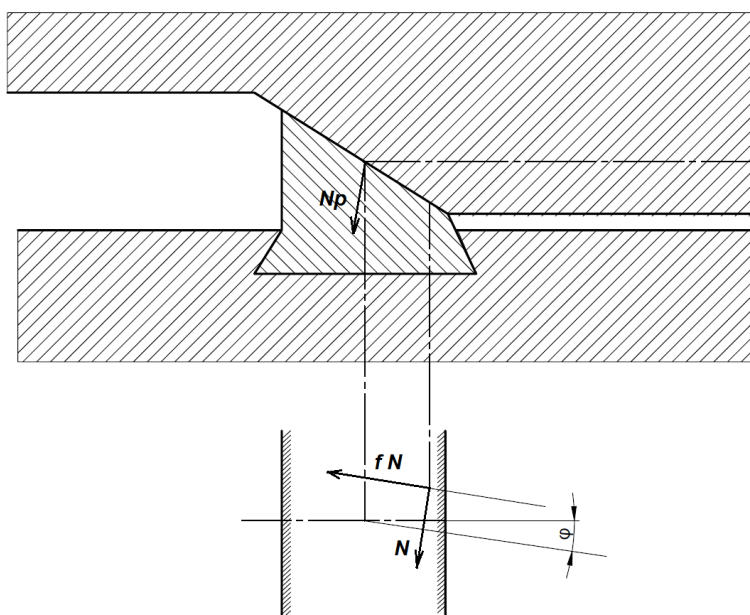
Ова упрошћена формула служи за прелиминарне прорачуне, тј. за проверу и усаглашавање усвојене ширине водећег прстена и притиска форсирања условљеног унутрашње – балистичким прорачуном.

Поред оваквог начина, до израза за одређивање притиска урезивања и проверу ширине водећег прстена може се доћи и прецизнијим поступком.

Анализом процеса урезивања водећег прстена можемо доћи до закључка да површина контакта расте сразмерно повећању притиска барутних гасова.

Урезивање почиње на предњем делу прстена и постепено се урезајује цео водећи прстен, због кретања пројектила унапред. Пропорционално кретању водећег прстена, расте и запремина делова водећег прстена у жљебовима, а отпор урезивања постепено опада. Притисак барутних гасова који се јавља када отпор урезивању достигне максималну вредност називамо притиском урезивања.

Полази се од претпоставке да се, притисак урезивања постиже у тренутку када је положај водећег прстена и прелазног конуса као на слици 13.



Слика 13. Положај водећег прстена и прелазног конуса који одговара притиску p_0 [3]

У овом моменту на пројектил делују следеће силе:

- сила барутних гасова $p_0 \frac{d^2 \pi}{4}$,
- отпор урезивања и сила трења између водећег прстена и прелазног конуса,
- нормална сила nN на активну страну жљебова и сила трења fnN .

У овом моменту, сила урезивања је једнака производу вредности границе еластичности σ_e материјала водећег прстена и контактне површине између водећег прстена и прелазног конуса.

На основу овога можемо писати:

$$N_p = \frac{d_p + d}{2} \pi \sigma_e \sqrt{H_p^2 + \frac{1}{4} (d_p - d)^2} \quad (9.2)$$

Сила трења fnN са уздужном осом пројектила заклапа угао φ (угао увијања жљебова).

Кретање пројектила током урезивања можемо представити следећим диференцијалним једначинама:

- једначина транслаторног кретања:

$$\frac{G}{g} \frac{dV}{dt} = \frac{d^2\pi}{4} p_0 - N_p (\sin i + f \cos i \cos \varphi) - nN (\sin \varphi + f \cos \varphi) \quad (9.3)$$

- једначина обртног кретања:

$$J_x \frac{d\omega}{dt} = \frac{nNd}{2} (\cos \varphi - f \sin \varphi) - \frac{fN_p d}{2} \sin \varphi \quad (9.4)$$

У моменту постизања p_0 транслаторно убрзање $\frac{dV}{dt}$ и угаоно убрзање $\frac{d\omega}{dt}$ имају изузетно мале вредности па их можемо занемарити и у том случају добијамо две једначине чисто статичке равнотеже:

$$\frac{d^2\pi}{4} p_0 = N_p (\sin i + f \cos i \cos \varphi) + nN (\sin \varphi + f \cos \varphi) \quad \text{и} \quad (9.5)$$

$$fN_p \sin \varphi = nN (\cos \varphi - f \sin \varphi) \quad (9.6)$$

Решавањем претходне две једначине добијамо притисак урезивања:

$$p_0 = \frac{4N_p}{\pi d^2} \left(\sin i + f \cos i \cos \varphi - f \sin \varphi \frac{\sin \varphi + f \cos \varphi}{\cos \varphi - \sin \varphi} \right) \quad (9.7)$$

У случају променљивог угла увијања $\varphi_0 \approx 0$, односно $\cos \varphi \approx 1$ и $\sin \varphi \approx 0$ и тада можемо писати:

$$p_0 = \frac{4N_p}{\pi d^2} (\sin i + f \cos i) \quad (9.8)$$

Коефицијент трења f се не може поуздано одредити, али се сматра да износи око 0,2.

10. Закључак

Композитни материјали представљају нову класу усавршених конструкционих материјала. Због изузетних механичких карактеристика: велике отпорности на замор, корозију и абразију, мале густине, јефтине производње, једноставне израде њихова велика примена има тенденцију даље експанзије. У наменској индустрији се користе за израду шлемова, оклопа борбених возила, авиона, као и антишрапнелска заштита борбених возила. Поред наведене примене, композитни материјали се у наменској индустрији примењују и за израду водећег прстена.

Водећи прстен је састави део свих пројектила артиљеријске муниције који се испаљују из класичних артиљеријских оруђа са ожљебљеним цевима. Представља један од елемената за вођење пројектила, а изведен је у облику прстена који је упресован у канал на кошуљици, нешто испред дна пројектила.

Данас се, као што је већ речено водећи прстен најчешће израђује од електролитичког бакра, међутим, тежи се да се електролитички бакар замени композитним материјалима. Разлози за то су многобројни, почев од тога што је практично доказано да са повећањем почетне брзине пројектила (који има водећи прстен израђен од метала) изнад 1000 m/s , долази до интензивног трошења цеви оруђа. Цев артиљеријског оруђа је веома комплексна и скупа за израду, па је очигледно колико значи продужити животни век таквом делу.

Још једна од предности водећег прстена израђеног од композитног материјала је што се смањује напрезање водећег прстена услед дејства центрифугалне силе (напрезање бакарног водећег прстена услед дејства центрифугалне силе је онолико пута веће, колико је већа густина бакра од густине композитног материјала примењеног за израду водећег прстена).

Због низа предности које водећи прстен израђен од композитног материјала има у односу на водећи прстен израђен од метала, све више се улаже у истраживање и испитивање нових материјала који би требало да замене материјале који се тренутно примењују.

Литература

- [1] Александар Стаматовић, *Конструисање пројектила*, Београд, 1995.
- [2] Јовица Богданов, *Познавање убојних средстава*, Београд, 2015.
- [3] Драги Димитријевић, *Водећи прстен*, Загреб, 1981.
- [4] Момчило Стевановић, *Влакнима ојачани полимерни композити*, Београд, 2002.
- [5] J. M. Berthelot, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vallouise, 2015.
- [6] <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, посећено 01.09.
- [7] Bin WU, Jing ZHENG, Qing-tao TIAN, Zhi-qiang ZOU, Xu-hua YU, Kai-shuan ZHANG, *Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading*, China, 2014.
- [8] Гордана Богдановић, *Динамичко понашање композитних ламината*, докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.