

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**  
**Војна академија Универзитета одбране у Београду**



**Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство**

**Ниво студија: Основне академске студије**

**Предмет: Машински материјали**

**Број индекса: 535/2015**

**Милош С. Миленковић**  
**Корозија цеви артиљеријског наоружања**

**Дипломски рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

**1. доцент др Нада Ратковић - ментор**

**2. \_\_\_\_\_**

**3. \_\_\_\_\_**

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_



Основне студије: Војноиндустријско инжењерство

Студијско подручје (усмерење): Наоружање

Име и презиме: Милош Миленковић

Број индекса: 535/2015

## ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Корозија цеви артиљеријског наоружања**

У оквиру овог рада кандидат треба да :

- изнесе суштину појаве корозије као физичко-хемијског процеса;
- опише врсте корозије и механизам њиховог деловања;
- опише методе заштите од корозије;
- посебно представи и објасни појаву корозије код артиљеријског наоружања, односно феномен ерозије код цеви артиљеријског оруђа и мере заштите.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Н. Ратковић, Д. Адамовић, Машински материјали, МФКГ, Крагујевац, 2003
- [2] З. Гулијаш, Ч. Лачњевац, Корозија и заштита материјала, ИТНМС, Београд, 2012

Ментор:

Крагујевац, мај 2019.

---

Др Нада Ратковић, доцент

## Садржај:

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Увод .....                                                                | 2  |
| 1. Корозија .....                                                         | 3  |
| 1.1 Историјат .....                                                       | 3  |
| 1.2 Узроци корозије .....                                                 | 4  |
| 1.2.1 Утицај природе метала на појаву корозије .....                      | 4  |
| 1.2.2 Утицај карактеристика металног предмета на појаву корозије .....    | 5  |
| 1.2.3 Утицај средине на појаву корозије .....                             | 5  |
| 2. Врсте корозије .....                                                   | 6  |
| 2.1 Корозија према механизму деловања .....                               | 6  |
| 2.1.1 Хемијска корозија .....                                             | 6  |
| 2.1.2 Електрохемијска корозија .....                                      | 7  |
| 2.1.3 Врсте корозије према геометријском облику корозијског разарања..... | 13 |
| 3. Методе заштите од корозија .....                                       | 19 |
| 3.1 Припрема металних површина одмашћивањем .....                         | 19 |
| 3.1.1 Хемијско одмашћивање .....                                          | 19 |
| 3.1.2 Електролитичко одмашћивање .....                                    | 19 |
| 3.2 Чишћење металних површина.....                                        | 20 |
| 3.2.1 Механичко чишћење металних површина.....                            | 20 |
| 3.2.2 Хемијско третирање металних површина.....                           | 20 |
| 3.2.3 Електролитичко чишћење металних површина .....                      | 20 |
| 3.3 Заштита металних површина.....                                        | 20 |
| 3.3.1 Природна заштита .....                                              | 21 |
| 3.3.2 Заштита помоћу инхибитора.....                                      | 21 |
| 3.3.3 Заштита хемијским и електрохемијских брунирањем.....                | 21 |
| 3.3.4 Термичка заштита металних површина (метализација).....              | 21 |
| 3.3.5 Електролитичка заштита метала.....                                  | 22 |
| 4. Цев код артиљеријског наоружања .....                                  | 23 |
| 5. Феномен ерозије цеви код артиљеријског оруђа .....                     | 25 |
| Закључак .....                                                            | 33 |
| Литература .....                                                          | 35 |

## Увод

Данашњи технолошки развој је незамислив без употребе материјала које добијамо прерадом сировина узетих из природе. Човек је од најстаријих времена користио предмете и материјале које је могао пронаћи у природи. Обликујући их и прерађујући човек ствара нове материјале и производе који му служе за различите намене. Стање материјала у природи, где их налазимо, је у равнотежи са хемијским реакцијама које се дешавају под утицајем кисеоника и воде. Материјали које данас користимо, најчешће су добијени одређеном прерадом при чему долази до промена у њиховом хемијском саставу, односно са одређеним уносом енергије ми мењамо њихов састав да би смо добили материјал који је одговарајући за разне намене. Природна тежња таквих прерађених материјала је да се врате у првобитно стање. Унос енергије коју су човек или сунчева енергија унели у материјал остаје прикривен у структури материјала и отпушта се чим постоје услови за то. Прелазак материјала у природно стање најчешће је нежељено и доводи до губитка вредности материјала, а самим тим конструкције и производа који садрже тај материјал. Коначна последица преласка и отпуштања енергије из материјала је неупотребљивост. Ако се неупотребљивост догоди пре рока техничког застаревања, што је чест случај, говоримо о великом проблему због трошкова који настају.

Корозија је процес ненамерног разарања материјала узрокованог физичким, физичко-хемијским или биолошким утицајима. Реч корозија потиче од латинске речи **corrodere**, што значи нагристи.

Због великих штета које корозија изазива заштита од корозије има важну улогу у индустрији материјала који су склони оваквој површинској промени. Истраживања која су вршена показала су да се инвестирањем капитала у заштиту добија продужени век трајања материјала и конструкција произведених од истих, а тако се продужава и рок техничког застаревања.

У индустрији наоружања посебна пажња се посвећује заштити од корозије. Како су материјали који се користе при изради оружја подложни корозији, њихова заштита је неизбежан корак у процесу производње.

У првом делу биће описана корозија са њеним утицајима корозије, њене врсте и методе заштите од корозије.

У другом делу биће дат опис цеви код артиљериског наоружања и опис феномена ерозије цеви код артиљериског наоружања.

# 1. Корозија

Корозија је хемијско-физичка појава која изазива постепено губљење својства материјала услед дејства средине која га окружује. Појавом корозије материјали трпе мање или веће промене, што умањује њихова својства [1].

Од метала израђују се објекти, конструкције и предмети од виталне важности за свакодневни живот због чега је корозија метала једна од најчешћих појава корозије материјала. Најчешћа и најпознатија је корозија гвожђа и челика, која производи рђу (оксид гвожђа), карактеристичне црвенкасте боје. Ова врста оштећења металних конструкција најчешће има за резултат стварање наслага оксида и соли метала на површини [2].

Корозија напада и друге материјале, не само метале. Тако постоји и корозија керамичких материјала, бетона, пластике, стакла. Разградња ових материјала услед корозије је много спорија од разградње метала, због мање подложности тих материјала оксидацији.

## 1.1 Историјат

Први материјали који су се користили били су у свом природном стању и нису били подложни корозији. Употребом гвожђа долази до појаве корозије иако и данас постоје неке античке творевине које су отпорне на узроке настајања корозије. Кроз векове није било пуно интересовања за проблеме настанка корозије [3].

Корозијом се први научно бавио руски научник Михаил Васиљевич Ломоносов 1756. године. Међутим, у то време мало се шта могло предузети на заштити од корозије због ниског нивоа технолошке развијености тадашње индустрије [4].

Прве информације да је корозија електрохемијски феномен објављене су 1819. године у чланку од стране француског писца Тхенрада, а 1830. године потврђено од стране Де ла Риве. Фарадејева истраживања од 1834.-1840. године била су врло значајна за разумевање процеса који доводе до корозије. Након Фарадеја опада интересовање за научнике по питању корозије све до почетка 20. века када су у Немачкој Хеин и Бауер извршили детаљна и обимна испитивања везана за корозију која су представљала основу за многа каснија открића. Након тога интересовање за корозију, њен настанак, као и решавање проблема уклањања корозије нагло је расло. Откривено је много законитости и метода савремене корозионе науке: сазнало се шта је пренапетост и каква је његова релација са густином струје, каква је улога кисеоника као стимулатора катодне реакције, шта су инхибирање и инхибитори. Тиме није исцрпљен интерес за упознавање и усавршавање подручја заштите метала од корозије [2].

Корозија је и данас делимична непознаница за савремено друштво и један од највећих узорчника проблема индустрије и економије, где се чак 3.1% профита губи због корозије.

## 1.2 Узроци корозије

Да би дошло до појаве оштећења материјала неопходно је присуство одређене хемијске, механичке, биолошке или неке друге „покретачке силе”.

Главни узроци тог процеса су:

- Атмосферски (влага, загревање, снег, магла...);
- Издувни гасови и честице из мотора које садрже хемијски активне супстанце попут бромоводоничне киселине, оловних халогенида, угљеничне киселине;
- Неправилна термичка обрада алуминијумових легура;
- Недовољна и неадекватна заштита премазима;
- Недовољно и непрописно чишћење металних делова;
- Примена воде за прање која садржи недозвољену количину хлора;
- Неправилно спајање различитих метала због чега се успоставља галвански елемент и др.

Према механизму деловања узроци корозије могу бити:

- Физички (температура, светлост...);
- Хемијски (кисеоник из ваздуха, влага, киселине, алкалије...);
- Електрохемијски (сви хемијски узроци код којих долази до настајања галванских микроелемената у присуству водених електролита);
- Биолошки (микроорганизми, гљиве, алге, инсекти...);
- Комплексни (настају променом климе, тла, воде, радних услова...) [4].

### 1.2.1 Утицај природе метала на појаву корозије

Метали поседују различиту отпорност према дејству корозионих агенаса. На пример легуре гвожђа су у влажној средини знатно више подложне корозији од легуре алуминијума. Осим тога, корозија делује на исти метал различито. То зависи од степена хомогености и чистоће његовог састава, од величине његових кристалних зрна и од тога да ли у металу владају унутрашњи напони.

Метал је утолико отпорнији према корозији уколико је чистији, хомогенији и уколико му је уједначенији хемијски састав. Присуство нечистоћа, односно малих издвојених зона, чији се хемијски састав разликује од састава основне масе, поспешује дејство корозије [1].

### **1.2.2 Утицај карактеристика металног предмета на појаву корозије**

Стање површина предмета, квалитет обраде, облик предмета и услови експлоатације у знатној мери утичу на отпорност према корозији. Уколико је површина финије обрађена утолико је већа отпорност предмета према корозији.

Облици предмета као што су рупе, жљебови, оштре ивице, испупчени делови, умањују његову отпорност према корозији. Предмети ковани на хладно током обраде отврдњују на површини и утврђено је да такви материјали лакше кородирају. Такође, спој два предмета изведен хладним поступком спајања доводи до прекида хомогености у пределу споја што поспешује корозију [1].

### **1.2.3 Утицај средине на појаву корозије**

До корозије може да дође у сувој и у влажној средини. На брзину корозије велики утицај има влажност ваздуха. Како је кисеоник фактор који регулише брзину корозије, тако је релативна влажност ваздуха елемент брзине.

Уколико је у атмосфери присутно више гасовитих супстанци процес корозије се убрзава. Посебну агресивност изазива процентуални састав азотних оксида, сумпорних и хлорних једињења као и присуство угљен диоксида.

На корозионе процесе утиче електрична проводљивост апсорбованих слојева влаге. Са повећањем дебљине слоја корозионих продуката опада брзина атмосферске корозије метала. Брзина корозије метала у затвореним просторијама, током извесног времена, постаје већа него у отвореној атмосфери. Узрок томе су различите структуре продуката корозије [1].

## 2. Врсте корозије

### 2.1 Корозија према механизму деловања

Механизам деловања корозије и његова брзина зависи од услова околине, у којој долази до процеса корозије.

Према механизму деловања корозија се дели на:

- хемијску (у неелектролитима) и
- електрохемијску (у електролитима).

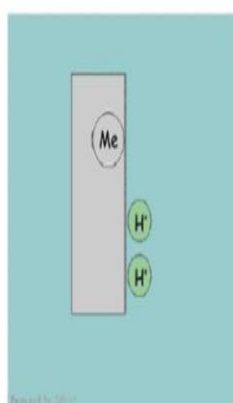
Најраширенији процес ове врсте је корозија која хемијским међуделовањем материјала и медија разара материјал [7].

#### 2.1.1 Хемијска корозија

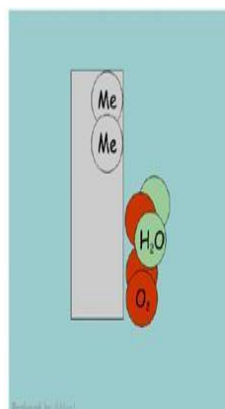
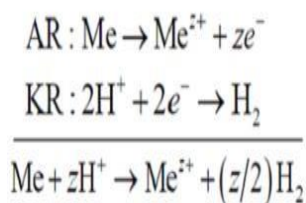
Хемијска корозија настаје деловањем агресивног хемијског једињења на површину материјала. Ова корозија се препознаје по спољашњој промени изгледа и појави опне на површини материјала. У хемијску корозију спада такозвана гасна корозија узрокована стварањем гасова на високим температурама.

Други облик хемијске корозије настаје у течним неелектролитима као што су органска једињења и раствори разних супстанци у њима. Органска једињења могу изазвати хемијску корозију али само ако у себи не садрже молекуле воде, иначе долази до електрохемијске корозије.

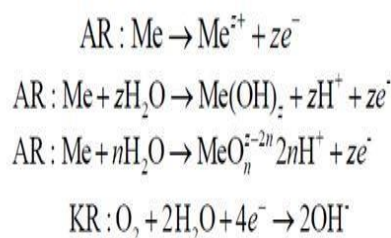
Хемијски афинитет је склоност два или више елемента или једињења да међусобно хемијски реагују. Хемијски афинитет се мења у односу на температуру, природу и концентрацију реактаната, и средину у којој се налази, па је афинитет хемијске корозије променљива величина. Као мера за афинитет реакционог састава подразумева се максимална енергија коју је потребно уложити при реверзибилном хемијском процесу[1]. На слици 1. приказани су процеси у хемијској и електрохемијској корозији:



Хемијска корозија



Електрохемијска корозија



Слика 1. Процеси у хемијској и електрохемијској корозији [1]

Брзина и ток хемијске корозије зависе од:

- Метала који кородира (састав, структура...);
- Физичких услова (температура, храпавост површине, напрезања...);
- Агресивне околине која га окружује (састав и концентрација околине) и
- Корозионих производа (физичка и хемијска својства...).

Глатке металне површине мање кородирају од храпавих јер је њихова стварна величина много већа од геометријске, па је тако корозија као површинска реакција убрзана. Неочишћене површине метала (нпр. чађ) такође онемогућују настајање квалитетног заштитног слоја. Тако легирајуће компоненте, које лако оксидирају, знатно смањују брзину корозије у оксидацијској средини. Напрезања у металу убрзавају хемијску корозију у почетној фази због више енергетског нивоа површине и због неповољног утицаја тих појава на квалитет примарног слоја корозионих продуката.

Смањење брзине деловања корозије врло је важно за праксу. Може се постићи при ниској температури ако је пренизак енергетски ниво молекула и атома који међусобно реагују или стварањем продуката корозије на површини метала, који га у облику заштитног слоја штите [1].

### 2.1.2 Електрохемијска корозија

Електрохемијска корозија је врло раширена јер је велики број металних предмета, конструкција и постројења под утицајем воде и водених раствора, влажног ваздуха или влажне атмосфере, који делују као електролит. Електрохемијска корозија јавља се на металима и легурама у додиру са електролитима као што су вода и водени раствори киселина, база и соли, при чему долази до реакција оксидације и редукције.

Процеси који прате електрохемијску корозију су:

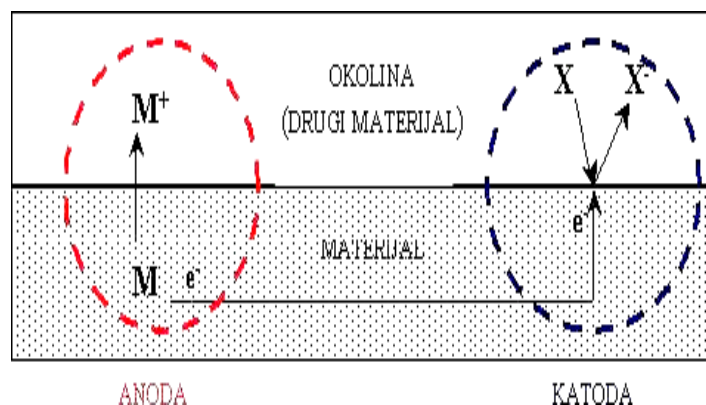
- анодни процес и
- катодни процес.

Подручје губитка електрона (оксидације) назива се анода, а подручје добитка електрона (редукције) назива се катода. Процес на аноди и катоди приказан је на слици 3.

**Анодни процес** (оксидација или јонизација метала) је процес при којем елемент отпушта електроне и постаје позитиван јон - катјон. Код анодног процеса једноставно се стварају метални катјони.

**Катодни процес** (редукција) је процес при којем елемент прима отпуштене електроне из анодне реакције и постаје негативан јон - анјон.

На слици 2. приказан је електрохемијски процес.



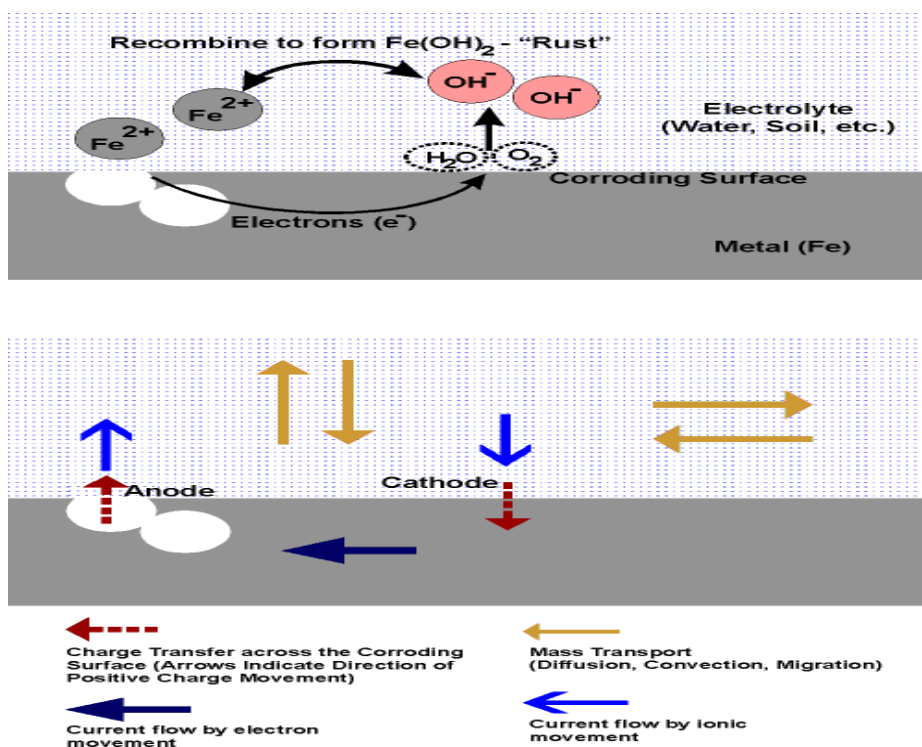
**Слика 2.** Електрохемијски процес[1]

Ова два парцијална електрохемијска процеса дају укупни хемијски редокс процес у којем не учествују слободни електрични набоји, што значи да се редукцијом вежу сви електрони ослобођени оксидацијом. Број електрона који се ослобађа у анодној реакцији мора бити једнак броју електрона који се троше у катодној реакцији, односно анодна струја мора бити једнака катодној струји. До реакција мора доћи истовремено да би анодна реакција створила корозију. У противном реакције постају реверзибилне и не успоставља се равнотежа. Током електрохемијске корозије на површини метала се успоставља корозиони потенцијал, при чему је брзина анодног процеса једнака брзини катодног процеса.

Електрохемијска корозија настаје:

Стварањем микроелемената када је један метал урођен у електролит, исти метал може бити и анода и катода. До реакције метала на анодним местима и реакције воде на катодним долази због тога што технички метали нису потпуно чисти, већ представљају легуре па је њихова површина електрохемијски нехомогена.

На слици 3. приказан је процес електрохемијске корозије метала на површини склоној процесу корозије.

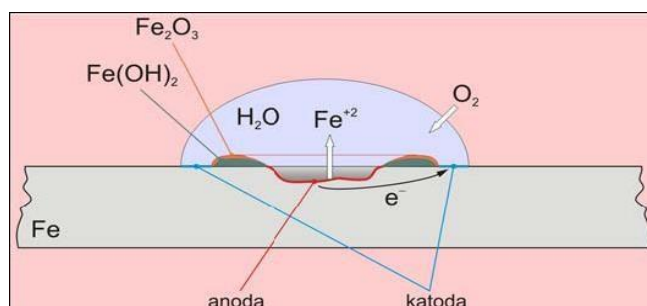


Слика 3. Електрохемијска корозија метала [1]

Узрок овакве корозије је најчешће неравномерна аерација. На ток корозије услед неравномерне аерације значајно утиче формирање produkта корозије. Брзина корозије је већа у подручју мање концентрације кисеоника због одсуства слоја produkта корозије.

Наиме, у одсуству слоја produkта корозија би била најбржа у подручју највеће концентрације кисеоника.

На слици 4. дат је пример настанка корозије и процес који се одвија при контакту капљице воде са металном површином.



Слика 4. Настанак корозије испод капљице воде на металној површини [7]

Хемијска једначина на аноди је:



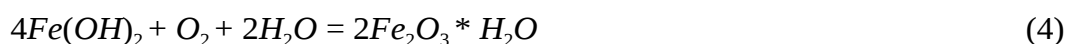
Ако при томе у води има слободног кисеоника, хемијска једначина катодне реакције је (кисеоникова деполаризација):



Новонастали јони реаговаће надаље са раније створеним катјонима гвожђа и створити бели или зелени талог:

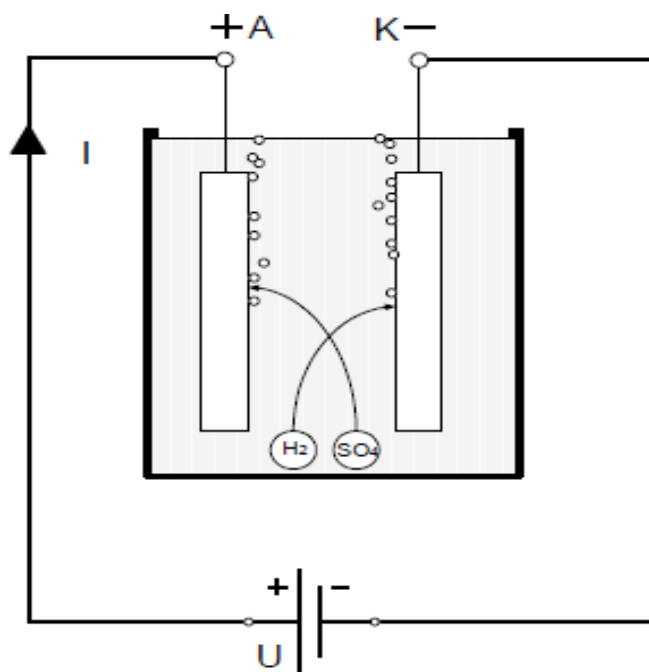


Ако у води није потрошен кисеоник тада ће наступити следећа реакција:



и раније настала рђа ће се претворити у црвено смеђу рђу.

Стварање галванског елемента између два метала и електролита настаје ако се у електролит уроне два комада метала различитог потенцијала и споља повежу проводником при чему се добија извор електричне енергије који се назива галвански елемент или галван ски чланак. То је приказано на слици 5.



Слика 5. Галвански елемент [1]

Уроњени комади метала се називају електроде. Разлика њихових потенцијала створиће напон који ће произвести кретање електрона. Под појмом потенцијал мисли се на својство метала да отпушта електроне, а тај потенцијал се разликује од метала до

метала. Који ће метал бити анода, а који катода, зависи управо од њихових стандардних електродних потенцијала. Активнији метал биће анода (позитивна електрода). Он ће давати електроне (окисдоваће) и његови ће јони излазити у раствор. Анода је она која кородира (троши се).

Електрон са аноде спољном везом одлази до катоде (негативна електрода) настојећи да успостави једнакост наелектрисања у галванском елементу. На катоди се електрони везују за позитивне јоне електролита (катјоне) чиме долази до редукције. Код електролита су управо јони носиоци електричне струје, а не електрони као код метала. Последица таквог начина провођења струје су хемијске промене материјала.

На граници метала и раствора долази до успостављања равнотежног потенцијала који зависи од:

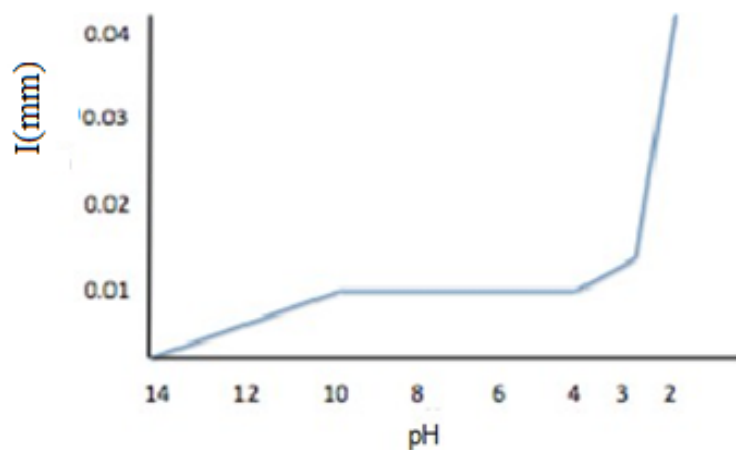
- Природе материјала;
- Врсте електродне реакције;
- Температуре;
- Концентрације металних јона у раствору и продуката реакције, и
- Стања металне површине.

Стандардни електродни потенцијал неког метала је потенцијал (у волтима) реакције оксидације метала (настајања јона метала). Када поређамо метале по њиховим стандардним електродним потенцијалима добијемо напонски низ елемената који указују на релативне тенденције елемената да кородирају [3].

Основни параметри за идентификацију тока и интензитета процеса корозије су:

- Састав, структура и стање површинске обраде неког материјала;
- Температура и
- Концентрација јона водоника и кисеоника у електролиту.

Концентрација јона водоника као и кисеоника у електролиту снажно утичу на интензитет развоја процеса електрохемијске корозије. Што је већа концентрација кисеоника и јона водоника, већа је и брзина корозије. Дакле, брзина корозије нагло расте кад се киселост повећава (пада рН вредност), што је приказано на слици 6. На слици 7. приказан је однос између рН вредности и интензитета развоја корозије, а на слици 8. зависност брзине настанка корозије од јачине оксидационог средства.



Слика 6. Интензитет развоја процеса корозије  $I(\text{mm})$  у односу на  $\text{pH}$  вредност електролита при различитим концентрацијама кисеоника [3]



Слика 7. Зависност брзине настанка корозије од јачине оксидационог средства [3]

### 2.1.3 Врсте корозије према геометријском облику корозијског разарања

Корозиона разарања се могу догодити на различите начине и бити различитог интензитета. Различита корозиона разарања доводе до различитих облика корозије.

Врсте корозије према геометријском облику разарања могу бити:

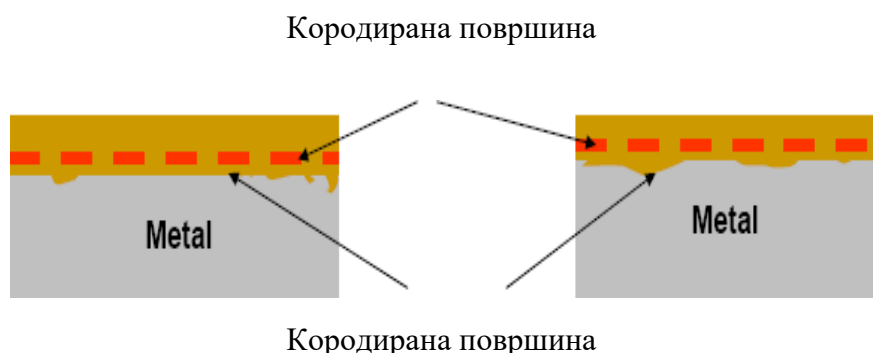
1. Општа корозија;
2. Локална корозија;
3. Селективна корозија и
4. Интеркристална корозија.

У пракси се више облика корозије може појавити истовремено. Тако се уз питинг корозију, под одређеним околностима појављују општа или пегаста корозија. Друге појаве корозије запажају се испод заштитних превлака или на местима њихових оштећења [1].

#### Општа корозија

Општа корозија је корозија која доводи до равномерног смањења дебљине метала. Она захвата читаву изложену површину материјала, а може бити равномерна и неравномерна. Равномерна општа корозија је најмање опасна јер се процес може лако пратити и предвидети када одређени део треба поправити или га заменити новим. Није свуда једнако брза, па уз њу глатка површина материјала постаје храпавија. Неравномерна општа корозија опаснија је од равномерне опште корозије.<sup>5</sup>

До опште корозије долази када је читава површина материјала изложена агресивној средини. Ова врста корозије најчешће се јавља на великим лимовима. То је приказано на слици 8.



**Слика 8.** Пример деловања равномерне и неравномерне опште корозије [8]

## Локална корозија

Локална корозија настаје најчешће на граници зрна материјала и делује убрзано на малом локалном подручју. Зрна материјала представљају катоду, а границе зрна аноду. Због недостатка кисеоника у подручју корозије, корозија продире дубље у метал стварајући рупице у материјалу [3].

Локална корозија се дели на:

Пегасту;  
Рупичасту или питинг;  
Потповршинску и  
Контактну.

**Пегаста корозија** је најраширенија појава локалне корозије и напада само неке делове изложене површине материјала. На слици 9. приказана је пегаста корозија.



**Слика 9.** Разарања материјала пегастом корозијом[9]

**Рупичаста или питинг корозија** је корозија код које настају рупичаста оштећења тј. шупљине које се протежу кроз метал. Рупичаста корозија се најчешће јавља када постоји велика катодна и мала анодна површина, због чега је јачина напада аноде велика. До разлика у потенцијалу може доћи због танке превлаке оксида, корозије због соли, рупица или пукотина, уља, гасова и делимичне уроњености метала. То је врло опасан облик корозије, чија се брзина повећава са растом температуре.

Услови успостављања питинг корозије су:

- 1) Постојање оксидног филма на површини метала;
- 2) Присутност агресивних јона у раствору –  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_2$  ;
- 3) Потенцијал мора прећи (и ако само на тренутак и локално) критичну вредност, критични питинг потенцијал или потенцијал иницијације рупичасте корозије и
- 4) Спољашња или унутрашња покретачка сила морају бити присутне.

Оцена стања површине се проводи проучавањем густине рупица, величине и дубине рупица. На слици 10. приказани су облици рупица који могу да настану на површини при рупичастој корозији.



**Слика 10.** *Облик рупица код рупичасте корозије [12]*

**Потповршинска корозија** је корозија где се жариште питинг корозије шири у дубину материјала раслојавајући га (листање, ексфолијација). Потповршинска корозија је најраширенија на ваљаним металима у додиру са морском водом и са киселинама. На површини материјала притом често настају мехури јер се у његовој унутрашњости гомилају чврсти корозијски продукти којима је волумен већи од волумена уништеног метала. Појаву потповршинске корозије треба разликовати од пукотина које на материјалу настају услед напонске корозије или корозијског замора. На слици 11 може се видети бубрење (лево) и листање (десно) код површинске корозије.



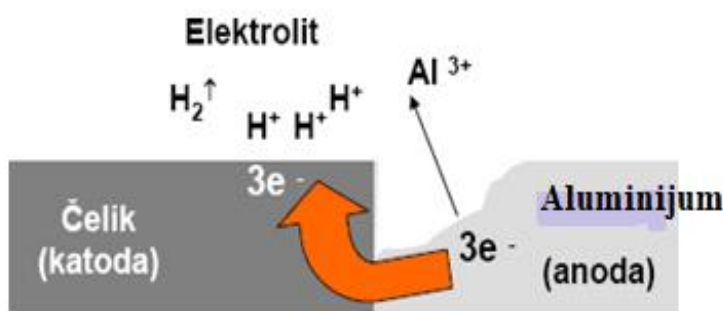
**Слика 11.** *Бубрење и листање материјала код потповршинске корозије [13]*

**Контактна корозија** дели се на:

- Галванску корозију и
- Корозију у зазорима.

Галванска корозија настаје када се два различита метала доведу у електрични контакт и уз присуство електролита настаје галвански елемент. Када настане галвански

елемент, један од метала постаје анода и кородира брзином већом од оне којом би кородирао да није спојен у галвански елемент, а други постаје катода и кородира мањом брзином него да није спојен у галвански елемент. Племенитији метал галванског елемента постаје катода и биће катодно поларизован у односу на сопствени корозиони потенцијал у истој корозионој средини. Приказ процеса настајања галванске корозије дат је на слици 12.



**Слика 12.** Галванска корозија [13]

Корозија у зазорима је слична рупичастој корозији, појављује се између два конструкцијска елемента (зазора) настанком разлике у концентрацији електролита (најчешће кисеоника у електролиту)[3].

### Селективна корозија

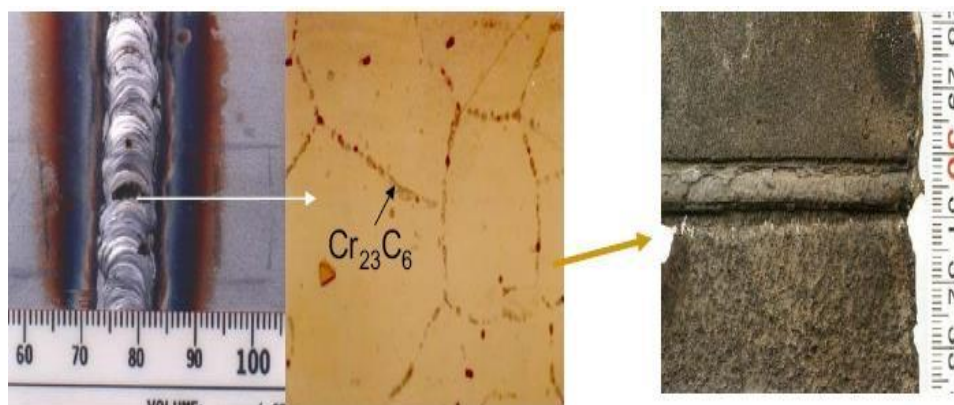
Селективна корозија представља врсту корозије при чему долази до селективног растварања мање племените компоненте легуре. Примери селективне корозије су децинковање и графитизација. Селективна корозија напада само једну од фаза или компоненту вишефазног или вишекомпонентног материјала. Очито је да селективна корозија може бити фазна само на вишефазним материјалима, а компонентна у вишекомпонентним материјалима (бронза, месинг). На слици 13. приказана је селективна корозија на цеви[13].



**Слика 13.** *Селективна корозија [14]*

### **Интеркристална корозија**

Интеркристална корозија је вид локалне корозије која разара материјал на границама зрна ширећи се на тај начин у дубину. Та врста корозије доводи до великог погоршања механичких карактеристика метала. Интеркристална корозија се најчешће јавља код нерђајућих челика и на легурама. Ова врста корозије је најопаснији облик корозије јер може дуго остати непримећена, а нагло смањује чврстоћу и жилавост материјала. Коначна последица интеркристалне корозије је лом или чак распад материјала. На слици 14. може се видети интеркристална корозија на различитим површинама.



**Слика 14.** *Интеркристална корозија [8]*

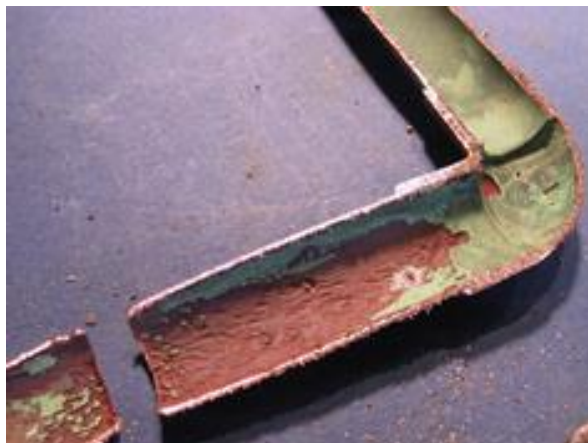
## Ерозиона корозија метала

Повећано трошење метала које настаје при кретању корозионе средине дуж површине метала назива се ерозиона корозија. Оштећење метала проузрокују електролити који се крећу великом брзином, који имају јаку турбуленцију и суспендоване чврсте честице.

При ерозији долази до уклањања заштитног слоја, услед чега се чист метал излаже корозији. Оштећене површине су обично чисте, јер флуид односи продукте корозије метала, који би у другим условима успорили разарање материјала.

Заштитни слојеви су важан фактор ерозионе корозије. Испитивања су показала да се легирањем метала може побољшати корозиона постојаност према ерозионој корозији. Ерозионој корозији подлежу сви уређаји који служе за провођење флуида. На таквим уређајима нарочито страдају кривине, славине и млазнице, цеви наоружања као и лопатице турбина. Оштећења се манифестују у облику удубљења, жљебова и округлих рупа које настају на правцу ударних таласа корозионе средине на метал.

На слици 15. дат је приказ ерозионе корозије на примеру водоводне цеви [2].



Слика 15. Ерозиона корозија [15]

Ерозиону корозију могу изазвати разне корозионе средине: водени раствори, органски растварачи, метали у течном стању и гасови. Разарање је интензивније ако се у флуиду налазе чврсте честице.

Посебан облик ерозионог напада је **кавитација**, која се јавља при брзом кретању метала и електролита, на пример пропелера, када притисак у електролиту може да буде толико смањен да се појаве вакуумски џепови који омогућују да електролит великом брзином удара у метал. Тиме се оштећује метал, површина постаје храпава и настаје дубинска корозија. Оштећења су већа на предметима код којих је продукт мекши од самог метала [2].

### **3. Методе заштите од корозија**

Применом различитих поступака заштите материјала од деловања агенаса корозије успешно се продужава век трајања материјала. Избор најадекватнијег поступка за заштиту металних површина од корозије зависи од врсте и стања површине метала, врсте обраде, начина производње, естетских захтева и слично.

Завршна обрада металних површина, без обзира да ли се обавља у циљу заштите од корозије или у декоративне сврхе, дели се на одмашћивање, чишћење и заштиту [2].

#### **3.1 Припрема металних површина одмашћивањем**

Пре наношења слоја на металним површинама обавља се отклањање остатака уља, масти, смола које су на површини предмета од претходних операција обраде, а које би својим даљим присуством ометале заштиту [2].

##### **3.1.1 Хемијско одмашћивање**

Хемијски поступци одмашћивања изводе се уз употребу органских растварача, киселина и алкалија. Хемикалије које се користе у овим процесима морају да задовољавају одређене услове:

- Интензивна способност одмашћивања;
- Неутралност у односу на металну површину;
- Минимална запаљивост и
- Погољна брзина испаравања [2].

##### **3.1.2 Електролитичко одмашћивање**

Електролитички поступак се често користи у великој серијској производњи код металних предмета са малом површином. Електролитичко одмашћивање је ефикасно и одмашћена површина је непрекорно чиста. Предност овог процеса је што кратко траје и дешава се у кади по принципу електролизе [2].

### 3.2 Чишћење металних површина

Припрема металних површина чишћењем од великог је значаја за дужину трајања заштитног средства и његово заштитно дејство. Често се боља заштита може остварити наношењем заштитног средства лошијег квалитета на добро очишћену површину [2].

#### 3.2.1 Механичко чишћење металних површина

Овај поступак подразумева отклањање корозије са површине механичким путем. Остварује се на три начина: чишћењем млазом абразива, чишћењем машинским алатом и чишћењем ручним алатом.

**Чишћење млазом абразива** спада у најквалитетније поступке при чему се добија добро очишћена и равномерно охрапављена површина за коју заштитно средство добро пријања.

**Чишћење механичким алатом** има велику примену и у поступку се користе машинске четке, брусилнице, тоцила и слично на електрични или пнеуматски погон.

**Чишћење ручним алатом** се користи када не може да се примени ни један други поступак [2].

#### 3.2.2 Хемијско третирање металних површина

Хемијско третирање је уклањање корозије са површине хемијским путем. У пракси овај поступак се назива хемијско декапирање у киселинама. Овај поступак подразумева потапање металних предмета у каде са одговарајућим растворима и користи се за производе прецизне механике [2].

#### 3.2.3 Електролитичко чишћење металних површина

Електролитичко чишћење је уклањање корозије потапањем елемената у електролитичко купатило. Најчешће су купатила са сумпорном киселином, одговарајућом струјом и напоном [2].

### 3.3 Заштита металних површина

Заштита металних површина врши се на више начина:

- Природна заштита;
- Заштита помоћу инхибитора;
- Заштита хемијским и електрохемијским брунирањем;

- Термичка заштита;
- Електролитичка заштита и
- Електрохемијска заштита [2].

### **3.3.1 Природна заштита**

Као што и сам назив каже овај поступак је заштита метала природним путем. На површини метала се ствара покривни слој који спречава у одређеној мери даље кородирање. До стварања заштитног слоја долази оксидацијом кисеоника из атмосфере [2].

### **3.3.2 Заштита помоћу инхибитора**

Под инхибиторима корозије подразумевају се разне супстанце које се додају у малим количинама са циљем да штите или видно умање дејство корозије на металној површини. Заштита помоћу инхибитора има ограничену ефикасност према корозији али је често незаменљива при завршним операцијама дораде и заштите [2].

### **3.3.3 Заштита хемијским и електрохемијских брунирањем**

Овај начин заштите другачије се назива и патинирање. Процес се састоји у превлачењу претходно фино обрађених металних површина слојем оксида у циљу заштите од корозије и примењује се када је битна естетика предмета који се обрађује [2].

### **3.3.4 Термичка заштита металних површина (метализација)**

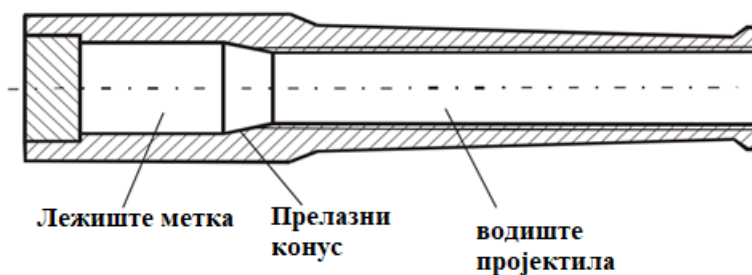
Термичка заштита се врши тако што се на површину метала наносе материјали на повишеним температурама који имају својство да штите основни метал од корозионе околине. Најчешће се користе материјали у облику жице или праха који се на основну површину, уз помоћ кисеоника и одређеног гаса, топљењем наносе специјалним алатима на одређена места, или целу површину која је унапред добро очишћена. Овакав поступак може бити хладан и топли [2].

### **3.3.5 Електролитичка заштита метала**

Електролитичка заштита метала обухвата процес који се дешава при електролизи односно при проласку једносмерне струје кроз раствор метала. Да би се успоставило струјно коло потребне су две електроде (једна позитивног и једна негативног наелектрисања). Електролитичким поступком се наноси превлака једног метала на други метал у циљу заштите од корозије, заштите од механичких утицаја и ради постизања естетских ефеката [2].

## 4. Цев артиљеријског наоружања

Цев је основни елемент сваког оруђа – оружја и представља топлотну машину у којој се одвијају динамички процеси претварања потенцијалне хемијске енергије барута у кинетичку и топлотну енергију у веома кратком интервалу. Сви процеси и појаве су импулсног карактера, јер је време за које се одвијају реда неколико  $\mu\text{s}$ , а ослобођена енергија реда MJ. У цеви се врши опаљење метка и лансирање пројектила са дефинисаном почетном брзином и правцем лета. Према конструкционом решењу, цев је начелно дебелозидни цилиндар чија се унутрашња шупљина назива канал цеви. На слици 16. приказан је пресек једне моноблок цеви [15].



Слика 16. Пресек моноблок цеви [15]

Канал цеви састоји се од лежишта метка, прелазног конуса и водишта пројектила. Лежиште метка је део у који се смешта метак. Прелазни конус спаја лежиште метка са водиштем пројектила. Водиште пројектила је предњи део цеви по којем се креће пројектил за време опаљења.

Облик израде наведених елемената цеви зависи од пуњења и вођења пројектила у цеви. Зидови цеви такође могу бити различито изведени. По својој спољашњој конфигурацији поједини делови цеви могу бити само цилиндрични или конусни. За цев се чврсто везују задњак са затварачем, омотач, гасна кочница или заштитник уста цеви, делови неопходни за повезивање цеви са противтрзајућим уређајем (ПТУ), односно огрлице и др.

Зависно од начина израде водишта пројектила у каналу цеви, постоје цеви са ожлебљеним (олученим) и глатким водиштем.

Према ојачању могу бити: ојачане и неојачане. Ојачане цеви могу бити вишеслојне, самоојачане и са омотачем.

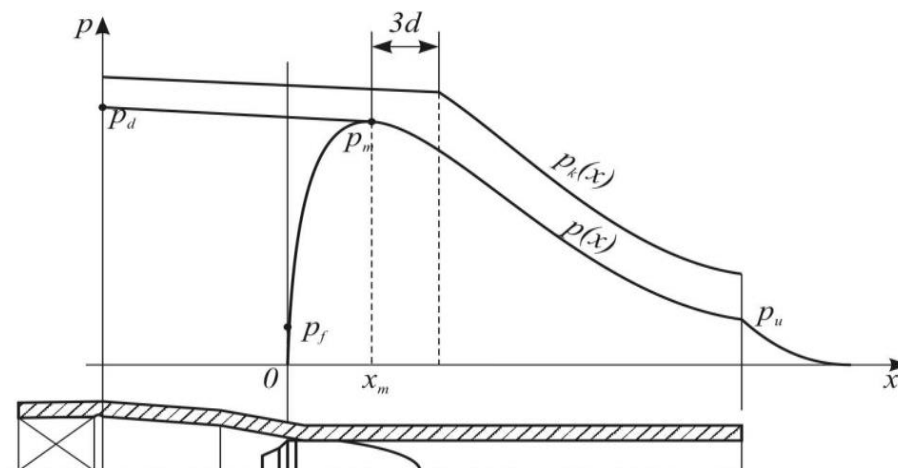
Први и основни захтев за цев као главни део оруђа проистиче из његове намене обезбеђења захтева балистике, тј. да се из цеви задатог калибра  $d$  при опаљењу метка пројектилу одређене масе  $m$  саопшти почетна брзина  $v_0$  и обезбеди стабилност лета у

потребном правцу. Из тога се види да је пре него што се приступи пројектовању цеви, неопходно имати елементе метка и унутрашњи балистички прорачун.

Најважнији задатак УБ је одређивање законитости кретања пројектила и развоја притиска барутних гасова у цеви оруђа – оружја у току процеса опаљења. Укупно повећање УБ криве притиска износи приближно (30–40)%. На тај начин добија се крива конструкционог притиска  $p_k(x)$ . Прорачун дебљине зидова цеви изводи се даље према овом фиктивном притиску, односно сили, по одређеној методологији.

Овај поступак је релативно једноставан и служи за прорачуне и провере отпорности моноблок цеви, а тачнија методологија при пројектовању цеви оруђа је са аспекта њене чврстоће, која је и експериментално потврђена [15].

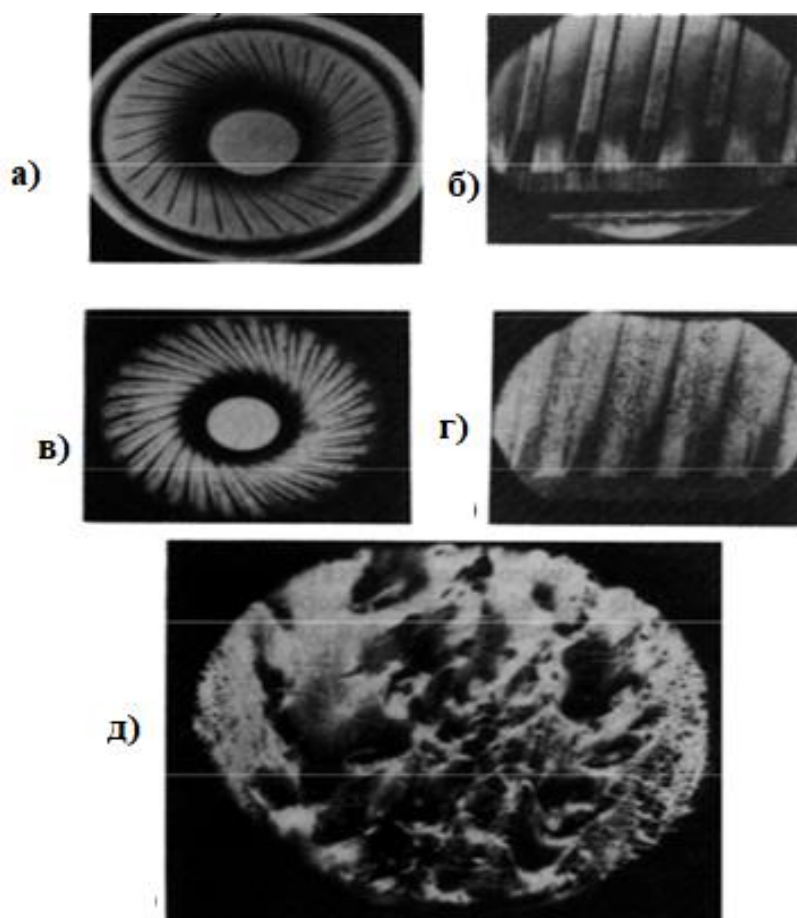
Ради поједностављења прорачуна отпорности цеви узима се да притисак делује нормално на површину канала цеви, да је пресек цеви кружни прстен који се равномерно деформише и да је материјал цеви хомоген и изотропан. Неопходно је да се основни дијаграм криве притиска барутних гасова коригује извесним коефицијентима сигурности. Да би се дошло до криве пожељне отпорности приказаној на слици 17.



Слика 17. Крива притиска барутних гасова дуж цеви  $p_k(x)$  [15]

## 5. Феномен ерозије цеви код артиљеријског оруђа

Бројни приступи су коришћени у карактеризацији механизма ерозије цеви, као и у прорачуну употребног века цеви оруђа. Преко једноставних термомеханичких и термохемијских модела, који се наводе у бројној литератури, још увек није добијен јединствен ваљан модел за прорачун ерозије и употребног века цеви, нити је он потпуно развијен. То указује на чињеницу да је проблем ерозије цеви сложен и комплексан, па је неопходно да се што боље сагледа и систематски изучи. Ерозија цеви укључује интеракцију већег броја термичких, механичких и хемијских фактора са површином канала цеви, који сви активно делују и у исто време са променљивим интензитетом дуж водишта пројектила и са различитим условима опаљења [16].



**Слика 18.** Оштећења површине цеви оруђа 105 mm M68 као резултат опаљења метка:

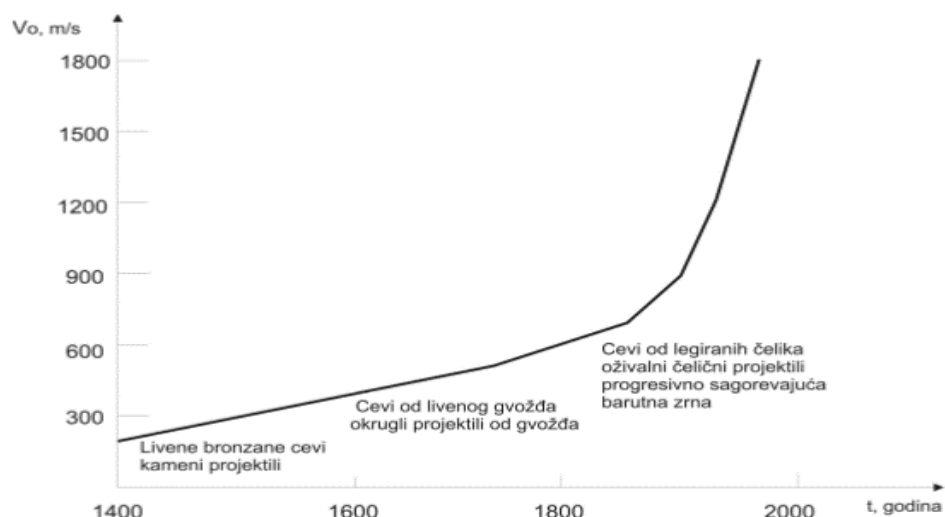
*а) изглед цеви после два опаљења, б) увеличан поглед почетка ожлебљеног дела након два опаљења, в) изглед цеви после 702 опаљења, г) увеличан поглед почетка ожлебљеног дела након два опаљења, д) увеличан поглед почетка ожлебљеног дела након 1744 опаљења[16].*

Ерозија цеви приказана на слици 18 може се дефинисати као прогресивна повреда или оштећење површине цеви и проширење пречника цеви (калибра) услед опаљења, која утиче на смањење: почетне брзине пројектила, тачности и ефективности оруђа. Наравно, када смањење почетне брзине пројектила пређе одређену величину или када пројектил премаше дозвољена одступања тачности погађања, забрањује се употреба цеви (цев се декласира и настаје „балистичка смрт“ цеви). Постоји и низ других појава и услова када се

цев артиљеријског оруђа забрањује за употребу, али они нису везани за ерозију. На пример, повећање механичких оштећења услед убоја, зареза, појава прскотина, кидања поља, надувавања цеви и др. Иако је проблем ерозије уочен врло рано, већ са првим ожлебљеним цевима, прве систематске студије овог проблема датирају од средине 20 века. Најаутентичнији радови настали су за време Другог светског рата под спонзорством националног бироа за истраживање (National Defense Research Committee – NDRC) и научног института за развој и истраживање (Office of the Scientific Research and Development) у САД. Резултати су сумирани у раду из 1946. под насловом „Хипербрзи топови и управљање ерозијом цеви“. После Другог светског рата занимљиви радови посвећени проблемима ерозије били су објављени на симпозијумима 1950. и 1952. године. Посебно интересовање за ефекте ерозије цеви било је у време Вијетнамског рата, када су интензивно коришћена артиљеријска оруђа и када се због ефеката ерозије мењао изглед и геометрија унутрашње површине цеви, што је директно утицало на тачност и прецизност артиљеријских оруђа. Од 1970. године проблем ерозије цеви је опште прихваћен у свету, а најпре је инициран у САД у бројним пројектима које је покренуло министарство одбране. Неки резултати ових пројеката саопштени су на симпозијумима 1977. и 1982. године. Истраживања у области ерозије и трошења цеви веома су значајна. Готово на свим симпозијумима U. S. Army Symposium on Gun Dynamics презентовани су радови из ове области, а на симпозијумима одржаним 1998. и 2001. године посебне секције пратиле су ову област истраживања.

У протеклих 600 година артиљеријска оруђа имала су стални тренд повећања почетне брзине пројектила. На слици 19 приказан је тренд повећања почетне брзине пројектила од почетка XV века.

Неке од цеви оруђа, према слици 19, биле су конструисане за почетне брзине пројектила веће од  $600\text{m/s}$ , укључујући и развој савремених артиљеријских оруђа са почетним брзинама пројектила до  $1800\text{m/s}$ . Овакав тренд повећања почетне брзине пројектила, ради повећања његове кинетичке енергије или домета и повећање брзине гађања, били су главни узрочник ерозије цеви. Историјски гледано, хаубице и минобацачи, због мањих оптерећења при опаљењу и нижих вредности претходно наведених величина, имале су мање износе трошења цеви и зато дужи животни век од цеви тенковских топова и противоклопних топова. Данас, међутим, савремене вучне или самоходне хаубице које имају цеви дужине око 7 метара и домете до  $50\text{km}$  имају и реалне проблеме са ерозијом цеви. Због великих оптерећења у цеви њихов животни век је и до 10 пута краћи. Према неким непотврђеним информацијама, животни век цеви код савремених хаубица, при максималном домету од  $50\text{km}$ , износи само око 100 метака [16].



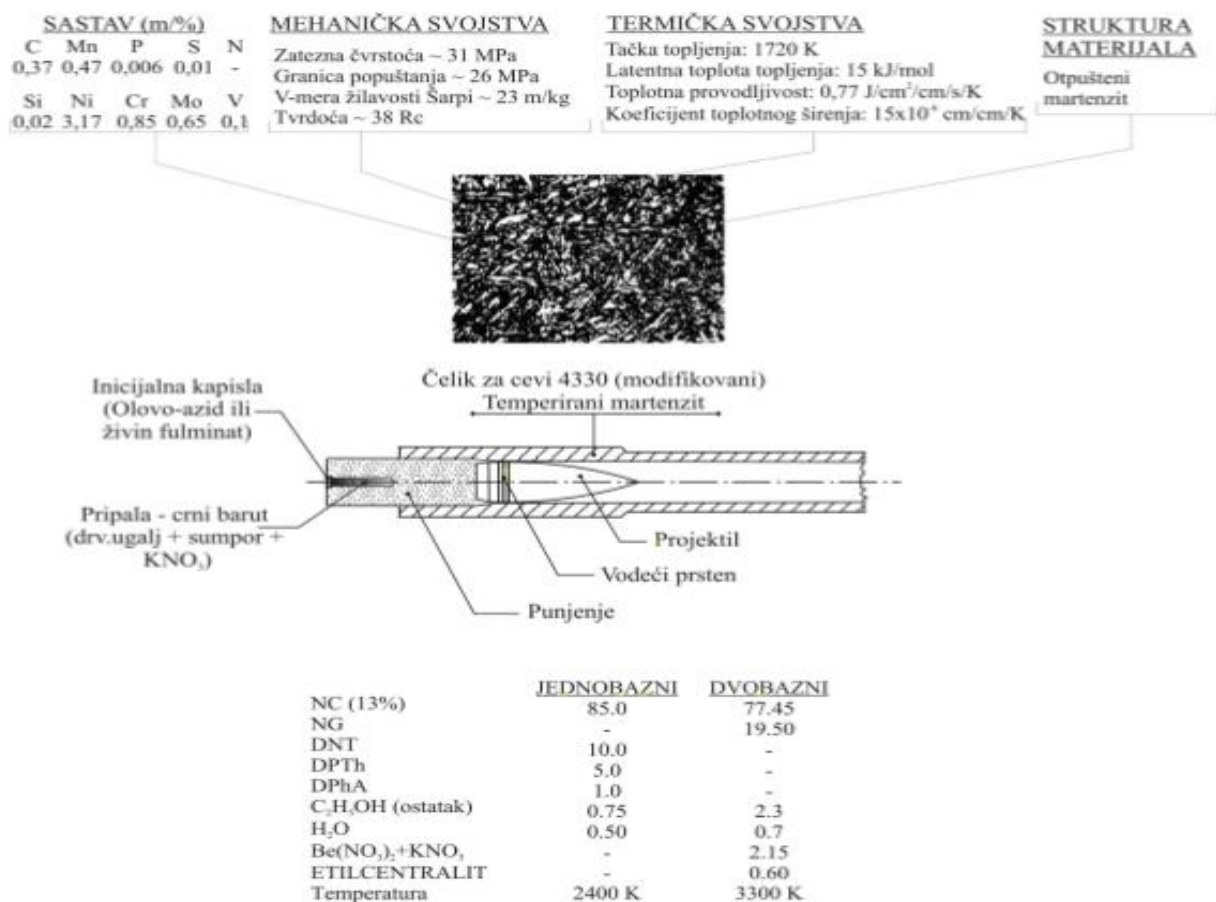
Слика 19. Тренд повећања почетне брзине пројектила од 1400. године [16]

Табела 1. Границе забране употребе цеви оруђа [17]

| Калибар                    | Граница Трошења у mm | Животни век пројектила (број опаљења) | Прорачунски животни век пројектила (број опаљења) | Почетна брзина $v_0$ , m/s | Пројектил   | Температура цеви $T$ , °C |
|----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|
| Противавионски топ 40mm M1 | 1,32                 | 12000                                 | 12000                                             | 875                        | M91(A1)     | 2160                      |
|                            | 349,25               |                                       |                                                   |                            |             |                           |
| Тенковски топ 90mm         | 2,54                 | 700                                   | 3000                                              | 914                        | M353        | 2700                      |
|                            | 628,65               |                                       |                                                   |                            |             |                           |
| Тенковски топ 105mm        | 1,91                 | 100                                   | 1000                                              | 1478                       | APDS-T      | 2766                      |
|                            | 641,35               |                                       |                                                   |                            |             |                           |
|                            | 1,91                 | 125                                   | 1000                                              | 1173                       | HEAT-T M456 | 2766                      |
|                            | 641,35               |                                       |                                                   |                            |             |                           |
|                            | 1,91                 | 1000                                  | 1000                                              | 1173                       | HEAT-T M456 | 2766                      |
|                            | 641,35               |                                       |                                                   |                            |             |                           |
| Хаубица 155mm M126         | 2,54                 | 3350                                  | 5000                                              | 684                        | M107        | 2200                      |
|                            | 762                  |                                       |                                                   |                            |             |                           |
| Хаубица 203mm              | 3,43                 | 10000                                 | 7500                                              | 762                        | M106        | 2426                      |
|                            | 1346,2               |                                       |                                                   |                            |             |                           |

У табели 1 дат је приказ цеви неких оруђа великих калибара које су декласиране због ерозије или прслина на унутрашњој површини цеви. Оруђа малих калибара, посебно са великом брзином гађања, имају ограничену величину ерозије. Тако, на пример, цев топа 20mm M61, зависно од брзине гађања, има животни век од 3 000 до 12 000 метака, а због ерозије није већи од 500 до 2 000 метака. Према наведеним подацима у табели 1 види се да су границе трошења и границе животног века цеви оруђа различите и међу њима не постоји никаква корелација, што значи да зависе и од других величина, као што су: врста пројектила, температура барутног пуњења, максимални притисак барутних гасова у цеви, брзина гађања, врста материјала од које је израђена цев, геометрија цеви, итд. С обзиром

на то да је производња цеви врло скупа, посебно је значајно да се у развоју нових цеви сагледају сви аспекти ерозије како би се њени ефекти минимизирали. На слици 20 приказани су главни елементи који се разматрају при ерозији.



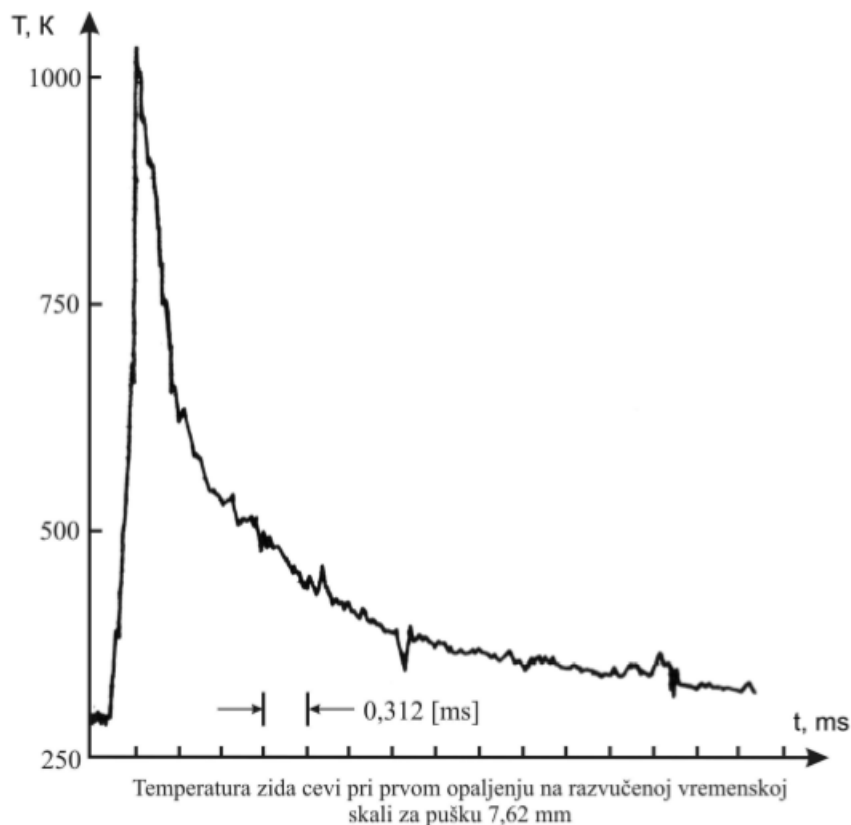
Слика 20. Саставни елементи ерозије цеви [17]

То су:

-цев која је израђена од челика са ожлебљеном површином водишта пројектила, чије су основне карактеристике и састав приказани на слици 21. и

-метак са барутним пуњењем, припалом, капислом и пројектилом. Пројектил има водећи и центрирајући прстен. Водећи прстен пројектила не обезбеђује само ротацију пројектила око уздужне осе, већ и заптивање барутних гасова ради добијања максималног притиска у цеви иза пројектила.

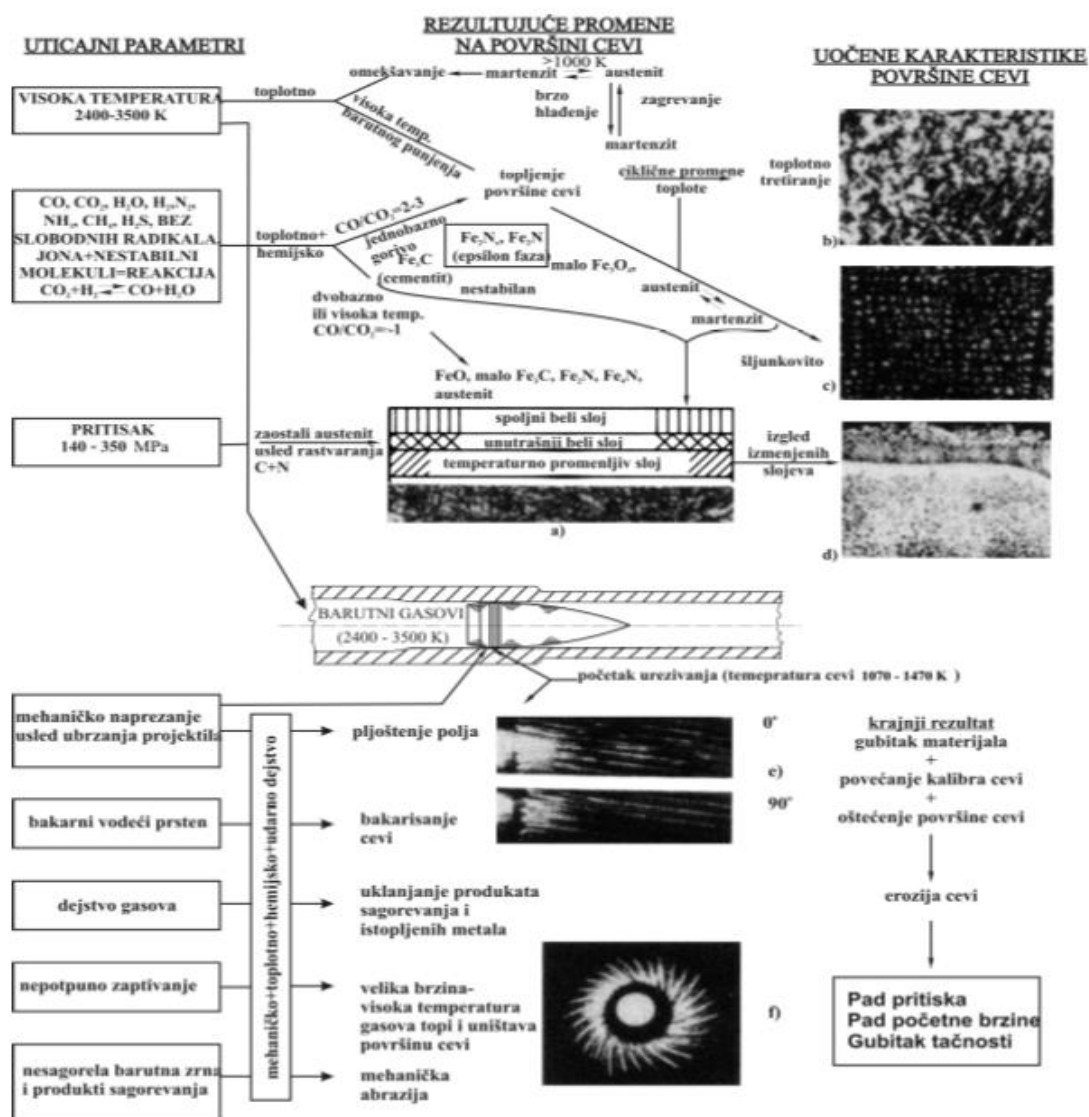
Опаљење метка прате висока температура (2526–2726)°C и притисак од око (140-550) МПа, зависно од величине запремине гасова иза пројектила насталих сагоревањем барутног пуњења. Главни састојци барутних гасова су: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. У гасовима су присутне и мале концентрације NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, NO и H<sub>2</sub>S, као и други молекули у занемарљивим количинама. Зависно од врсте барутног пуњења барутни гасови ће садржати веће или мање концентрације CO и H<sub>2</sub>. Наведене компоненте продуката сагоревања барутних гасова за време опаљења, као и после опаљења, на одређени начин хемијски реагују не само међусобно већ и са унутрашњом површином канала цеви[16].



**Слика 21.** Температурски профил површине цеви [17]

Код артиљеријских оруђа великих калибра, на пример америчке хаубице 175mm M113, време за које се пројектил нађе на устима цеви износи  $t_u=20ms$ , а код малих калибра аутоматског наоружања  $t_u=(1-2)ms$ . У току овог кратког периода под притиском барутних гасова, пројектил се креће према напред, а водећи прстен утиснут у жлеб водишта цеви ствара контактни притисак великог износа око 350MPa. Повећана температура међуконтакта пројектила и цеви може да топи површину водећег прстена стварајући скоро хидродинамичко подмазивање пројектила. Топлота се преноси од загрејаних гасова на површину цеви конвекцијом, повећавајући температуру површине цеви, која не само да смањује механичку чврстоћу цеви, већ изазива и хемијску интеракцију. Теоријски прорачун и експериментални мерни подаци, добијени у непосредној близини површине цеви, показали су да за првих неколико милисекунди на површини цеви, према сл. 22, долази до наглог температурног скока. У случају брзе паљбе из цеви великих почетних брзина температурски профил површине цеви се слично мења за краће време и може узроковати парцијално топлеење површине цеви. Неки од важних процеса који су укључени у дејство према површини канала цеви и утичу на стање површине цеви за време опаљења збирно су приказани на слици 21. Реакциони параметри укључују велики притисак и температуру, хемијски реактивне барутне гасове, напрезања водећег прстена и природу материјала цеви. Циклично понављање високих вредности температуре и притисака доводи до дифузија атома угљеника и азота, што изазива промену структуре и стања површине цеви и индукује феритно-аустенитну и мартензитно-аустенитну трансформацију челика. Фазне трансформације праћене су запреминским променама кристалне решетке и стварањем додатних напрезања на површини канала цеви од којих настају микропрслине. Појава оваковог стања на површини цеви назива се топлотно третирање и приказана је на слици 22. Ако барутно пуњење при сагоревању ослобађа високу температуру и ако је однос

гасова  $\text{CO}/\text{CO}_2$  око један, на површини цеви долази до локалног растапања  $\text{FeO}$  честица и аустенита. Ово парцијално топљење површине даје изглед „шљунковите површине“. Барутни гасови са нижом температуром нормално реагују са површином канала цеви, стварајући такозвани бели слој, који се састоји од  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементит) и тзв. гама и епсилон фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$  и  $\text{Fe}_2\text{N}_x$ ), малих количина  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , заосталог аустенита и нешто мартезитне фазе која настаје при брзом хлађењу. Следећи слој који се повремено јавља налази се између термички измењеног слоја и белог слоја и назива се унутрашњи бели слој. То је, у ствари, аустенит стабилизovan растварањем угљеника и азота и понекад може бити парцијално растопљен. Видљиво формирани унутрашњи бели слој претходи спољашњем белом слоју. Поступно формирање ових слојева је шематски приказано на слици 22. Тачка топљења ових слојева је  $(1096-1146)^\circ\text{C}$  и за приближно  $(246-326)^\circ\text{C}$  нижа од тачке топљења челика. Велике брзине истицања барутних гасова ка устима цеви доводе до одношења ових растопљених продуката.

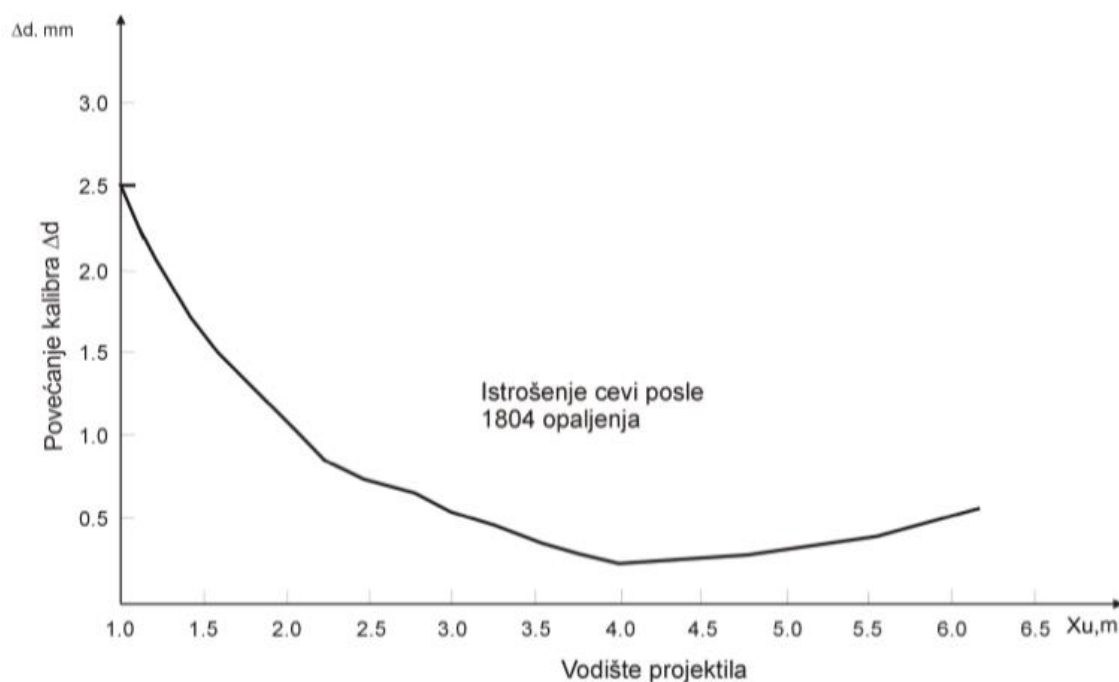


Слика 22. Термофизички и хемијски процеси на површини цеви за време опаљења [16]

Гасна струја често прелази преко водећег прстена пројектила (случај непотпуног заптивања), па се по каналу жлеба разнесе растопљени материјал водећег прстена, што доводи до тзв. бакарисања цеви. Непотпуно заптивање водећег прстена утиче на функцију

водећег прстена пројектила и на повећање ерозије цеви. Наиме, наношење бакра у површинске прслине може убрзати њихово ширење по дубини зида цеви.

Несагореле честице барутног пуњења на устима цеви изазивају механичку абразију површине цеви. Сви наведени фактори доприносе скидању дела материјала са унутрашње површине цеви, што неизбежно води ка повећању калибра цеви. Ове појаве су најизраженије на почетку ожлебљеног дела цеви. Типичан облик промене калибра неке еродиранице приказан је на слици 23. Карактер промене пречника цеви услед ерозије утврђен је експериментално, тј. мерењем на експерименталној цеви 155mm XM 199 америчке производње, после 1804 испалења пројектила. Утврђени максимум ерозије унутрашњости цеви био је на удаљености од 0,92m од задњег пресека цеви, где се управо налазио почетак ожлебљеног дела цеви.



Слика 23. Промена пречника цеви услед ерозије [17]

Може се закључити да је током опаљења, унутар одређених периода мерених у милисекундама, површина цеви изложена:

- високим температурама,
- високим напрезањима услед притиска барутних гасова,
- хемијским интеракцијама са барутним гасовима,
- напрезању услед урезавања водећег прстена, силе трења и интеракције површине цеви са водећим прстеном,
- деловању топлотних и механичких ефеката услед недовољног (непотпуног) заптивања водећег прстена,
- испирању површине струјом истицања барутних гасова и
- абразији услед судара несагорелих честица барутног пуњења са површином цеви.

Наведени топлотни, хемијски и механички фактори комплексно делују и стално мењају услове дуж цеви оруђа за време балистичког (цикличког) оптерећења. После сваког опаљења неминовно долази до ерозије цеви, а њене последице су:

- повећање пречника цеви (калибра) и оштећење површине цеви,

- пад почетне брзине пројектила,
- пад домета и губитак тачности гађања, односно повећано растурање пројектила на циљу.

Може се рећи да је употребни век цеви екстремно кратак. На пример, код хаубице  $105mm$  пројектил напусти уста цеви након  $10ms$  од тренутка опаљења. Ако је употребни век цеви ограничен на 1000 пројектила, због ерозије, то значи да ће цев имати само 10 секунди ефективног рада. Обично цеви већег калибра раније постају неупотребљиве од прогнозираног века употребе због ерозије, осим ако се додатно не користе адитиви, аблативи и други додаци у барутном пуњењу.

Мањи калибри који имају већу брзину гађања такође имају краћи животни век у односу на предвиђени животни век одређен прорачунским путем. Интензивна експлоатација цеви код које се одступа од прописаног режима паљбе излаже унутрашњи канал повишеним напрезањима, а посебно температурним. У том случају знатно ће се умањити нормални (пројектовани животни век) радни век цеви оруђа [16].

## Закључак

На основу изнетих чињеница може се закључити:

- ерозија цеви укључује интеракцију већег броја термичких, хемијских и механичких фактора са површином цеви, који активно делују при сваком опаљењу и променљивим интензитетом дуж водишта пројектила;
- механизам деловања ерозије због међусобне условљености релевантних фактора врло је сложен и до данас још увек не постоји реалан и поуздан модел одређивања ерозије и животног века цеви;
- постоје у литератури бројни мање или више поједностављени термомеханички и термохемијски модели који су добро постављени, али који само парцијално решавају неке од проблема ерозије;
- према извршеним истраживањима и мерењима доминантан утицај на ерозију цеви има термички фактор, затим хемијски и, на крају, механички. Ову градацију фактора ерозије треба схватити условно, јер су наведена три међусобно условљена фактора. Другим речима, најефикаснији резултати у смањењу ерозије могу се постићи смањењем температуре на површини водишта пројектила;
- установљени су и истражени и други пратећи „нуспроизводи“ ерозивног процеса у цеви (микропрслине, беле мрље, кидање поља) који доводе до механичких оштећења цеви;
- ниже температуре сагоревања барута, односно коришћење такозваних „хладних“ барута знатно утиче на смањење ефеката ерозије цеви;
- установљено је да хемијски састав барута, односно главни продукти сагоревања барута, утичу на ерозију цеви. Препоручује се да смеша барутних гасова садржи што мање концентрације  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а да се по-већају концентрације  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ ;
- феномен ерозије цеви, иако одавно откривен (XIX век), са несмањеном пажњом и даље се истражује не само код конвенционалних оруђа великих калибара већ и будућих – нових концепција оруђа, као што су течни и гасни топови, електромагнетни топови и др. Предвиђа се да ће бити потребно вршити правилну идентификацију материјала и конструкције ради смањења ефеката ерозије и за неконвенционална артиљеријска оруђа;
- у нашој земљи проблем ерозије није адекватно третиран у дужем периоду, у теоријском и експериментално-истраживачком смислу. Зато су сазнања о овом проблему недовољна. Због оваквог стања у нашој пракси проблему ерозије цеви треба приступити систематски, корак по корак, практично од почетка, са тежиштем на математичком моделовању у односу на експерименталне провере које морају да сачекају боља времена.
- ради бољег сагледавања релевантних величина и фактора који интерактивно и непрестано делују у процесу опаљења, неопходно је да се на основу познатих теорија и метода примењене механике кретања тела, механике оруђа, унутрашње и спољашње балистике, постави теоријско-нумерички модел који је тачнији и поузданији за одређивање релевантних података који ће омогућити објективнију оцену стања цеви, односно ерозије.

Проблем ерозије цеви и дефинисања метода за предвиђање употребног века цеви је, по проблематици коју решава, врло сложен и мултидисциплинаран. За његово решавање

неопходан је тимски рад стручњака којим би биле покривене области: механике наоружања, унутрашње и спољашње балистике, механике флуида, термодинамике, отпорности материјала, металургије, физичке хемије и одржавања, односно дијагностике. Објективна оцена радне способности цеви даје добар предуслов да се изврши релативно поуздана прогноза употребног века цеви у будућности.

## Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазих, Н. Ратковић, Д. Адамовић, Машински материјали, МФКГ, 2003
- [2] З. Гулијаш, Ч. Лачњевац, Корозија и заштита материјала, ИТНМС, Београд, 2012
- [3] U.R. Evans, Corrosion doctors, 1948
- [4] R. Pearson, Am. Chem. Soc. 85, 3533–3539, 1963
- [5] М. В.Томић, Узроци корозије у термоенергетским постројењима и начин превенције, (620.193.194:624.311.3.22), 2009
- [6] Х. Пожар, "Техничка енциклопедија" (Корозија метала), Графички завод Хрватске, 1987
- [7] Доступно на: [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2015. P. Marcus, Angew. Chem. 1993, 105, 1161–1172, (јул 2016)
- [8] [www.ffri.hr](http://www.ffri.hr); Интернет страница: [www.ffri.hr/~zvonimir/05%20Metali.pdf](http://www.ffri.hr/~zvonimir/05%20Metali.pdf), приступљено 15.06.2019.
- [9] [www.riteh.hr](http://www.riteh.hr); Интернет страница: [www.riteh.hr/zav\\_katd\\_sluz/zm/osn\\_pod/SKRIPTA%20\(zastita%materijala\).pdf](http://www.riteh.hr/zav_katd_sluz/zm/osn_pod/SKRIPTA%20(zastita%materijala).pdf), приступљено 15.06.2019.
- [10] [www.pfst.hr](http://www.pfst.hr); Интернет страница: [www.pfst.hr/data/materijali/skriptaFSB.pdf](http://www.pfst.hr/data/materijali/skriptaFSB.pdf), приступљено 25.06.2019.
- [11] [www.corrosionproject.info](http://www.corrosionproject.info); Интернет страница: [www.corrosionproject.info/Predavanje/EKM/Predavanje082006.pdf](http://www.corrosionproject.info/Predavanje/EKM/Predavanje082006.pdf), приступљено 27.06.2019.
- [12] [www.riteh.hr](http://www.riteh.hr); Интернет страница: [www.riteh.hr/zav\\_katd\\_sluz/zm/osn\\_pod/SKRIPTA%20\(zastita%materijala\).pdf](http://www.riteh.hr/zav_katd_sluz/zm/osn_pod/SKRIPTA%20(zastita%materijala).pdf), приступљено 02.07.2019.
- [13] <https://www.cdcorrosion.com>; Интернет страница: [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_selective\\_gb.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_selective_gb.htm), приступљено 03.07.2019.
- [14] <https://www.duffnerengineering.com>; Интернет страница: <https://www.duffnerengineering.com/erosion-corrosion-of-copper-tube/>, приступљено 06.07.2019.
- [15] Ристић, З.. Механика артиљеријских оруђа, Војна академија, Београд, 2010
- [16] Јарамаз, С., Методе за предвиђање ерозије цеви артиљеријских оруђа, Тех-нички извештај, 02–240–63, ВТИ Београд, 1983.
- [17] ТУ ССНО: Упутство о оштећењима цеви артиљеријских оруђа и начини оцене исхабаности, ТУ ЈНА, билтен бр. 25, Београд, 1959.